

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Курганский государственный университет»

Кафедра «Цифровая энергетика»

ДИПЛОМНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

Методические указания
к выполнению раздела «Электробезопасность»
выпускной квалификационной работы
для студентов очной и заочной формы обучения
направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Курган 2023

Кафедра: «Цифровая энергетика».

Дисциплина: «Дипломное проектирование»
(направление 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»).

Составили: канд. техн. наук, доцент И. И. Копытин,
ст. преподаватель С. Ю. Помялов.

Печатается в соответствии с планом издания, утвержденным
методическим советом университета «16» декабря 2021 года.

Утверждены на заседании кафедры «21» ноября 2022 года.

Содержание

Введение	4
1 Общие положения	4
2 Методика расчета заземляющего устройства электроустановок до 35 кВ	8
3 Методика расчета заземляющего устройства для электроустановок 110 кВ и выше	12
4 Пример расчёта контура защитного заземления подстанции 110/10 кВ	16
5 Пример расчета заземляющего устройства подстанции 35/10 кВ	21
6 Методика расчета молниезащиты	23
7 Пример расчета молниезащиты подстанции 35/10 кВ	29
8 Список рекомендуемой литературы	31

ВВЕДЕНИЕ

Выпускная квалификационная работа является завершающим этапом подготовки бакалавра по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», итогом всей учебной и практической работы студента. Он представляет собой самостоятельную работу, при выполнении которой студент должен уметь применять знания, полученные в процессе обучения в университете, и подтвердить свою профессиональную пригодность для работы в сфере:

- энергетических систем;
- системы электроснабжения объектов техники и отраслей хозяйства;
- электрических станций и подстанций, линий электропередач;
- энергетических установок, электростанций и комплексов на базе нетрадиционных и возобновляемых источников энергии;
- устройств автоматического управления и релейной защиты в электроэнергетике.

Цель выполнения выпускной квалификационной работы – реализация теоретических и практических знаний, полученных в процессе обучения в университете, при выполнении самостоятельной проектно-конструкторской работы в соответствии с полученным заданием.

Основными задачами, решаемыми при выполнении выпускной квалификационной работы, являются:

- анализ основных тенденций развития конструкций линий электропередач, понизительных подстанций, электрических аппаратов и распределительных устройств и др. в соответствии с полученным заданием на проектирование;
- обоснование выбранной конструкции, подтверждаемое необходимыми расчетами;
- оценка безопасности и экологичности проекта;
- расчет технико-экономических показателей проекта.

Одним из разделов выполнения выпускной квалификационной работы является раздел «Электробезопасность».

1 Общие положения

Этот раздел является неотъемлемой частью проекта, в котором должны быть рассмотрены и обеспечены основные безопасные условия труда в соответствии с законодательством.

Устройство электроустановок должно соответствовать требованиям правил устройства электроустановок, строительных норм и правил, государственных стандартов, правил безопасности труда и другой нормативно-технической документации (НТД). Организация эксплуатации и ремонта электроустановок должна соответствовать требованиям правил эксплуатации, государственных стандартов, правил по охране труда при эксплуатации электроустановок и других нормативных актов по охране труда и техники безопасности.

Основные требования указанных правил и НТД должны учитываться при оформлении графической части и отражены в расчетно-пояснительной записке (РПЗ) в краткой форме, в соответствии с требованиями, указанными в [6].

Объем РПЗ (без учета расчета заземляющих устройств и молниезащиты электроустановок) должен составлять 5–7 страниц.

Основными НТД для обеспечения безопасности обслуживания действующих электроустановок являются Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей, требования которых изложены в гл. 1.7 этих Правил, утвержденных Минэнерго РФ приказом №6 от 13.01.2003г., и Правила по охране труда при эксплуатации электроустановок, утвержденных приказом Министерства труда и социальной защиты РФ от 24.07.2013 №328 Н.

На вновь сооруженные и реконструированные электроустановки (в том числе при проектировании) распространяются Правила устройства электроустановок (ПУЭ) – 7-е издание Министерства топлива и энергетики и Нормы технологического проектирования подстанций переменного тока с высшим напряжением 35 – 750 кВ (НТП ПС), утвержденные приказом ОАО «ФСК ЕЭС» от 13.04.2009 г. №136.

В тексте в обязательном порядке необходимо отразить следующие вопросы.

1.1 Безопасные условия труда при проектировании и эксплуатации электроустановок

Виды и характеристика помещений (где эксплуатируются электроустановки) в отношении опасности поражения людей электрическим током (гл.1.1. ПУЭ 7-е издание).

Меры защиты от поражения электрическим током в нормальном режиме, которые должны применяться по отдельности или в сочетании от прямого прикосновения (гл. 1.7 ПУЭ 7-е издание).

Меры защиты от поражения электрическим током в случае повреждения изоляции, которые должны применяться по отдельности или в сочетании при косвенном прикосновении (гл. 1.7 ПУЭ 7-е издание).

Средства защиты, используемые от поражения электрическим током:

а) изолирующие электрозащитные средства:

– основные и дополнительные изолирующие электрозащитные средства для электроустановок напряжением выше 1000 В;

– основные и дополнительные изолирующие электрозащитные средства для электроустановок до 1000 В.

б) средства индивидуальной защиты.

в) нормы комплектования средствами защиты для распределительных устройств (РУ) напряжением до и выше 1000 В с постоянным дежурным персоналом и при обслуживании подстанции и РУ оперативно-выездными бригадами (гл. 1.1.5; 1.1.6; 1.1.8, Приложение 8 инструкции по применению и испытанию средств защиты, используемых в электроустановках СО 153-34.03.603-2003).

1.2 Пожарная безопасность электроустановок зданий и сооружений

Первичные средства пожаротушения.

Мероприятия по пожарной безопасности электроустановок, зданий, сооружений (гл. 1.7 ПТЭЭП-2003) Правила пожарной безопасности (ППБ) для энергетических предприятий – СО153-34.03.301-95, п.4.2.70 ПУЭ 7-е издание.

1.3 Охрана окружающей среды

Меры по предупреждению вредного воздействия на окружающую среду выбросов загрязняющих веществ в атмосферу и сбросов в водные объекты, снижение звукового давления, вибрации, электрических и магнитных полей и иных вредных физических воздействий (гл. 1.7 и 2.2 ПТЭЭП, гл. XXIV Правил по охране труда при эксплуатации электроустановок – 2014, гл. 4.2 ПУЭ, Сан ПиН – 2.2.4-723-98 (уровень магнитных полей), Санитарные нормы допустимого шума (СН 3077-84), СО 153-34.20.187-2003).

1.4 Освещение

Отразить устройство освещения проектируемого объекта с указанием вида применяемого освещения, типа и места, и их мощность (гл. 6.1; 6.2, 6.3 ПУЭ 7-е издание, гл. 6.4 НТП ПС. Приложение к приказу ОАО «ФСК УЭС» от 13.04.2009 г. №136).

1.5 Расчетная часть

а) расчет заземляющих устройств электроустановок.

б) расчет и выбор молниезащиты электроустановок.

Указанные расчеты необходимо выполнять, используя существующие методики расчетов и другие НТД, например:

– СО – 153.34.21. – 122 – 2003 г. «Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций».

– РД 153.34.3.35. – 125 – 99 (руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от внутренних и грозовых перенапряжений).

– РД 34.21.122-87 «Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений».

ГОСТ 12.1.019-79 (2001) ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.

– ПУЭ – гл. 1.7 – заземление и защитные меры электробезопасности, глава 4.2. «Распределительные устройства и подстанции напряжением выше 1 кВ».

– Шеховцов В. П. Расчет и проектирование схем электроснабжения: методическое пособие для курсового проектирования / В. П. Шеховцов. – Москва : Форум: ИНФА, 2010. – 214 с.

Проектирование заземляющих устройств (ЗУ) следует выполнять в соответствии с требованиями гл. 1.7 ПУЭ 7-е издания и нормированием по допустимому напряжению прикосновения или по допустимому сопротивлению, а также с учетом требований по снижению импульсных помех для обеспечения работы релейной защиты и автоматики.

При реконструкции (модернизации, техническом перевооружении) проектируемого объекта В РПЗ необходимо указать данные о наличии и использовании существующего контура защитного заземления, который проверяется на соответствие требованиям гл. 1.7 ПУЭ.

В случае необходимости дополнительно делается его усиление (мероприятия по снижению допустимого напряжения прикосновения или допустимого сопротивления гл. 5.3 НТП ПС).

Для этого следует произвести проверочный расчет, используя данные установленных горизонтальных и вертикальных заземлителей существующего ЗУ.

Расчет и выбор молниезащитных устройств зданий и сооружений в зависимости от назначения, интенсивности грозовой деятельности района, ожидаемого количества поражений молний в год следует выполнять в соответствии с категорией устройств молниезащиты и типом зоны защиты.

Существуют три категории по устройству молниезащиты:

1 Здания и сооружения со взрывоопасными помещениями классов В-1 и

В-2 по ПУЭ (к данной категории относятся также здания электростанций и подстанций).

2 Другие здания и сооружения со взрывоопасными помещениями, не относящиеся к первой категории.

3 Остальные здания и сооружения (в том числе пожароопасные).

Подстанции напряжением 35–220 кВ, как правило, согласно гл. 7.3.41 ПУЭ относятся к взрывоопасной зоне класса В-1а (вторая категория).

По категории устройства молниезащиты и ожидаемому числу поражений молнией в год (N) защищаемого объекта определяют тип зоны защиты (А или Б). Объекты первой категории молниезащиты со степенью надежности $>99,5\%$ относятся всегда к зоне А.

Объекты второй категории рассчитываются по типу А при $N > 1$ и по типу Б при $N \leq 1$.

Объекты третьей категории рассчитываются по типу А, если $N > 2$, для остальных помещений данной категории, не относящихся к взрывно- и пожароопасным (независимо от величины N), принимается зона защиты типа Б (степень надежности от 95 до 99,5%).

Наиболее часто применяют для защиты стержневые молниеотводы (в том числе для открытых распределительных устройств (ОРУ) подстанций напряжением выше 35 кВ), тросовые используют для защиты длинных и узких сооружений (как правило для защиты ВЛ > 35 кВ – в виде грозозащитного троса), а также в виде заземленной сетки, накладываемой на защитное сооружение (здание), аналогично действию обычного молниеотвода.

При выборе молниезащиты электроустановок (в случае реконструкции проектируемого объекта) расчет зоны молниезащиты выполняется с учетом использования данных установленных ранее молниеотводов, а также изменения высоты защищаемого сооружения и расширения площади главной понизительной подстанции (ГПП).

Исходные данные и задание по расчету заземляющих устройств и молниезащиты выдается студенту руководителем или консультантом проекта.

В конце раздела делается вывод.

В графической части проекта рекомендуется на 1 листе выполнить чертеж молниезащиты и заземления.

2 Методика расчета заземляющего устройства электроустановок до 35 кВ

Расчеты выполняются в соответствии с требованиями [1;2;5;7;9], по методике, приведенной в [11].

Рассчитать заземляющее устройство (ЗУ) в электроустановках (ЭУ) с изолированной нейтралью (ИН) и глухозаземленной нейтралью (ГН) — это значит:

- определить расчетный ток замыкания на землю (I_3) и сопротивление ЗУ (R_3);
- определить расчетное сопротивление грунта (ρ_p);
- выбрать электроды и рассчитать их сопротивление;
- уточнить число вертикальных электродов и разместить их на плане.

Примечание. При использовании естественных заземлений

$$R_{и} = \frac{R_e R_3}{R_e - R_3},$$

где $R_{и}$, R_e — сопротивление искусственных и естественных заземлений, Ом.

Сопротивление заземления железобетонных фундаментов здания, связанных между собой металлическими конструкциями, определяется по формуле

$$R_e = \frac{\rho}{\sqrt{S}},$$

где ρ — удельное сопротивление грунта

S — площадь, ограниченная периметром здания, м².

Определение I_3 и R_3

В любое время года согласно ПУЭ

$$R_3 \leq \frac{250}{I_3},$$

где R_3 — сопротивление заземляющего устройства, Ом (не более 10 Ом);

I_3 — расчетный ток замыкания на землю, А (не более 500 А).

Расчетный (емкостный) ток замыкания на землю определяется приближенно

$$I_3 = \frac{V_H (35L_{кл} + L_{вл})}{350},$$

где V_H — номинальное линейное напряжение сети, кВ;

$L_{кл}$, $L_{вл}$ — длина кабельных и воздушных электрически связанных линий, км.

Примечание. В электроустановках с ИН до 1 кВ

$$R_3 \leq \frac{125}{I_3} \text{ (не более 4 Ом).}$$

При мощности источника до 100 кВ·А — не более 10 Ом.

По этой же формуле рассчитывают R_3 , если ЗУ выполняется общим для сетей до и выше 1 кВ.

Определение ρ_p грунта

$$\rho_p = K_{\text{сез}} \rho,$$

где ρ_p – расчетное удельное сопротивление грунта, Ом · м;

$K_{\text{сез}}$ – коэффициент сезонности, учитывающий промерзание и просыхание грунта,

$K_{\text{сез}} = F$ (климатическая зона, вид заземлителей), принимается по таблице 2.2.

Выбор и расчет сопротивления электродов

Выбор электродов — по таблице 2.4.

Приблизительно сопротивление одиночного вертикального заземления определяется по формуле

$$r_b = 0,3\rho_p.$$

Сопротивление горизонтального электрода (полосы) определяется по формуле

$$r_p = \frac{0,4\rho_p}{L_{\text{п}}} \lg \frac{2L_{\text{п}}^2}{bt},$$

где $L_{\text{п}}$ – длина полосы, м;

b – ширина полосы, м; для круглого горизонтального заземлителя $b = 1,1d$;

t – глубина заложения, м.

Определение сопротивлений с учетом коэффициента использования.

$$R_b = \frac{r_b}{\eta_b}; \quad R_r = \frac{r_r}{\eta_r},$$

где R_b и R_r – сопротивление вертикального и горизонтального электродов с учетом:

коэффициентов использования, Ом;

η_b и η_r – коэффициенты использования вертикального и горизонтального электродов, определяются по таблице 2.5:

$$\eta = F(\text{тип ЗУ, вид заземлителя, } \frac{a}{L}, N_b),$$

где a – расстояние между вертикальными заземлителями, м;

L – длина вертикального заземлителя, м;

N_b – число вертикальных заземлителей.

Необходимое сопротивление вертикальных заземлителей с учетом соединительной полосы

$$R_b \leq \frac{R_r R_3}{R_r - R_3}.$$

Уточнение числа вертикальных электродов

Необходимое число вертикальных заземлителей определяется следующим образом:

$$N'_B = \frac{R_B}{R_{и} \eta_B} \quad (\text{при использовании естественных и искусственных заземлителей});$$

заземлителей);

$$N'_B = \frac{R_B}{R_3 \eta_B} \quad (\text{при использовании только искусственных заземлителей});$$

$$N_B = \frac{r_B}{R_{и} \eta_{B, \text{ут}}},$$

где $\eta_{B, \text{ут}}$ – уточненное значение коэффициента использования вертикальных заземлителей.

Таблица 2.1 – Наибольшие допустимые значения R_3 для трехфазных сетей

Напряжение сети, кВ	Режим нейтрали	$R_{3, \text{нб}}$, Ом	Вид ЗУ
110 и выше	ЗН	0,5	Заземление
3...35	ИН	10	
0,66	ГЗН	2	Зануление
0,38		4	
0,22		8	
0,66; 0,38; 0,22	ИН	4	Заземление

Примечание. При удельном электрическом сопротивлении грунта более 100 Ом·м допускается увеличивать указанные выше значения в 0,01ρ раз, но не более 10-кратного.

Таблица 2.2 – Коэффициенты сезонности $K_{\text{сез}}$

Климатическая зона	Вид заземлителя		Дополнительные сведения
	вертикальный	горизонтальный	
I	2	3	4
I	1,9	5,8	Глубина заложения вертикальных заземлителей от поверхности земли 0,5...0,7 м
II	1,7	4,0	Глубина заложения горизонтальных заземлителей 0,3...0,8 м
III	1,5	2,3	
IV	1,3	1,8	

Примечание. Зона I имеет наиболее холодный, IV – теплый климат; ρ – удельное сопротивление грунта, измерено при нормальной влажности, Ом·м, принимается по таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Удельное сопротивление грунта (ρ)

Грунт	Торф	Глина, земля садовая	Чернозем	Суглинок	Каменистая почва	Супесь	Песок с галькой
ρ , Ом \times м	20	40	50	100	200	300	800

Таблица 2.4 – Рекомендуемые электроды

Вид электрода	Размеры, мм	L , м	t , м
Стальной уголок	50 \times 50 \times 5	2,5...3	0,5...0,7
	60 \times 60 \times 6		
	75 \times 75 \times 8		
Круглая сталь	\varnothing 12...16	5...6	
Труба стальная	\varnothing 60	2,5	
Полоса стальная	40 \times 4	Расчетная	
Пруток стальной	\varnothing 10...12		

Таблица 2.5 – Значения коэффициентов использования электродов

N_B	$\frac{a}{L}$						Дополнительные сведения
	1		2		3		
	η_B	η_r	η_B	η_r	η_B	η_r	
4	0,69	0,45	0,78	0,55	0,85	0,7	Числитель для контурного ЗУ, а знаменатель — для рядного
	0,74	0,77	0,83	0,89	0,88	0,92	
6	0,62	0,4	0,73	0,48	0,8	0,64	
	0,63	0,71	0,77	0,83	0,83	0,88	
10	0,55	0,34	0,69	0,4	0,76	0,56	
	0,59	0,62	0,75	0,75	0,81	0,82	
20	0,47	0,27	0,64	0,32	0,71	0,45	
	0,49	0,42	0,68	0,56	0,77	0,68	
30	0,43	0,24	0,6	0,3	0,68	0,41	
	0,43	0,31	0,65	0,46	0,75	0,58	

3 Методика расчета заземляющего устройства для электроустановок 110 кВ и выше

Расчеты выполняются в соответствии с требованиями [1;2;5;7;9], по методике, приведенной в [10].

Исходные данные для расчёта заземлителя:

- удельное сопротивление верхнего слоя ρ_1 ;

- удельное сопротивление нижнего слоя ρ_2 ;
- величина тока короткого замыкания;
- площадь подстанции;
- площадь контура защитного заземления;
- время действия релейной защиты;
- время отключения выключателя.

Заземлитель предполагается выполнить из горизонтальных полосовых электродов сечением 4×40 мм и вертикальных стержневых электродов длиной L_B и диаметром d .

Глубина заложения электродов в землю t .

Расчетная длительность воздействия электрического тока определяется по выражению:

$$\tau_B = t_{p.з.} + t_{o.в.}$$

Определяем наибольшее допустимое напряжение прикосновения согласно таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Допустимое напряжение прикосновения [10]

Длительность воздействия τ_B, c	до 0,1	0,2	0,5	0,7	1	1-3
$U_{пр. доп}, В$	500	400	200	130	100	65

Зная наибольшее допустимое напряжение прикосновения, определяется напряжение на заземлителе:

$$U_3 = \frac{U_{пр. доп.}}{k_{\Pi}},$$

где k_{Π} – коэффициент напряжения прикосновения;
для сложных заземлителей он определяется по формуле:

$$k_{\Pi} = \frac{M \cdot \beta}{\left(\frac{l_B \cdot L_r}{a \cdot \sqrt{S}} \right)^{0,45}},$$

где L_r – длина горизонтальных заземлителей,;

a – расстояние между вертикальными заземлителями;

M – параметр, зависящий от соотношения ρ_1/ρ_2 (таблица 3.2).

Таблица 3.2 – Величина параметра M

ρ_1/ρ_2	0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	10	12	16
M	0,36	0,5	0,62	0,69	0,72	0,77	0,79	0,8	0,82	0,83	0,83	0,84

\sqrt{S} – площадь контура защитного заземления;

β – коэффициент, определяемый по сопротивлению тела человека R_q и сопротивлению растекания тока от ступней R_c

$$\beta = \frac{R_q}{R_q + R_c}.$$

В расчетах принимаем: $R_q = 1000 \text{ Ом}$, $R_c = 1,5 \cdot \rho_1$.

Таким образом, коэффициент прикосновения:

Потенциал на заземлителе:

$$U_3 = \frac{U_{\text{пр.доп.}}}{k_{\Pi}},$$

предел допустимого (меньше 10 кВ).

Сопротивление заземляющего устройства:

$$R_{\text{з.доп.}} = \frac{U_3}{I_3},$$

где I_3 – ток, протекающий через заземляющее устройство при расчетном КЗ, за который принимаем ток трехфазного КЗ.

Действительный план заземляющего устройства преобразуем в расчетную модель квадратной формы, площадь которой и суммарная длина горизонтальных заземлителей такие же, как в реальной модели.

Число ячеек на стороне квадрата:

$$m = \frac{L_r}{2 \cdot \sqrt{S}} - 1.$$

Длина полос в расчетной модели:

$$L'_r = 2 \cdot \sqrt{S} \cdot (m + 1).$$

Длина сторон ячейки:

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

Число вертикальных заземлителей по периметру контура:

$$n_b = \frac{\sqrt{S} \cdot 4}{0,9 \cdot a}.$$

Общая длина вертикальных заземлителей:

$$L_B = l_B \cdot n_B.$$

Определяем относительное эквивалентное удельное сопротивление грунта расчетной модели ρ_1/ρ_2 .

$$\text{Для } \rho_1/\rho_2; a/l_B = 1 \text{ и } \frac{h_1 - t}{l_B}.$$

Определяем соотношение ρ_3/ρ_2 с учетом таблицы 3.3 [10].

Таблица 3.3 – Относительное эквивалентное удельное сопротивление грунта для сеток с вертикальными заземлителями ρ_3/ρ_2

ρ_1/ρ_2	a/l_B	Относительная толщина слоя $(h_1-t)/l_B$						
		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

Определяем ρ_3 .

По расчетной модели определяем сопротивление реального заземляющего устройства, для чего рассчитывается относительная глубина заложения заземлителя:

$$\frac{l_B + t}{\sqrt{S}}.$$

Найдем значение параметра A , необходимого для уточненного значения сопротивления заземляющего устройства. Если относительная глубина заложения заземлителя входит в промежуток: $0,1 \leq \frac{l_B + t}{\sqrt{S}} \leq 0,5$, то параметр A определяется:

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

Если относительная глубина заложения заземлителя входит в промежуток: $0 \leq \frac{l_B + t}{\sqrt{S}} \leq 0,1$, то параметр А определяется:

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

Находим общее сопротивление сложного заземлителя:

$$R_3 = A \cdot \frac{\rho_3}{\sqrt{S}} + \frac{\rho_3}{L'_r + L_B}.$$

Напряжение прикосновения:

$$U_{пр} = k_{п} \cdot I_3 \cdot R_3.$$

Если значения сопротивления заземлителя и напряжение прикосновения не соблюдаются, предлагается применить подсыпку гравия толщиной 20 см по всей территории подстанции.

Следовательно, удельное сопротивление верхнего слоя (гравия) будет ρ_{gp} , определяем новые значения $k_{п}$; U_3 ; $R_{3 доп}$; $U_{пр}$.

Проверим термическую стойкость горизонтальной полосы. Минимальное сечение полосы по условиям термической стойкости при замыкании на землю при приведенном времени прохождения тока замыкания

$$F = I_3 \cdot \frac{\sqrt{t_{п}}}{C},$$

где $C = 74$ – коэффициент шин, постоянный для стали. Полученное значение F сравниваем с площадью сечения горизонтальной полосы заземлителя.

4 Пример расчёта контура защитного заземления подстанции 110/10 кВ

Расчеты выполняются в соответствии с требованиями [1;2;5;7;9], по методике, приведенной в [10].

Исходные данные для расчёта заземлителя:

- удельное сопротивление верхнего слоя $\rho_1 = 180$ Ом·м (супесь);
- удельное сопротивление нижнего слоя $\rho_2 = 90$ Ом·м (суглинок);
- величина тока короткого замыкания $I_{к.з.} = 5520$ А;
- площадь подстанции $S_{ПС} = 64 \times 45 = 2880$ м²;
- площадь контура защитного заземления $S_{кзз} = 60 \times 41 = 2460$ м²;
- время действия релейной защиты $t_{р.з.} = 0,1$ с;
- время отключения выключателя $t_{о.в.} = 0,035$ с.

Заземлитель предполагается выполнить из горизонтальных полосовых электродов сечением 4×40 мм и вертикальных стержневых электродов длиной $L_B=5$ м и диаметром $d=20$ мм. Глубина заложения электродов в землю $t = 0,8$ м.

Расчетная длительность воздействия электрического тока определяется по выражению:

$$\tau_B = t_{p.з.} + t_{o.в.};$$

$$\tau_B = 0,1 + 0,035 = 0,135 \text{ с.}$$

Таблица 4.1 – Допустимое напряжение прикосновения [10]

Длительность воздействия $\tau_B, \text{с}$	до 0,1	0,2	0,5	0,7	1	1-3
$U_{\text{пр. доп}}, \text{В}$	500	400	200	130	100	65

Согласно требованиям правил устройства электроустановок, при $t = 0,135$ с наибольшее допустимое напряжение прикосновения $U_{\text{пр. доп.}} = 400$ В.

Зная наибольшее допустимое напряжение прикосновения, определяется напряжение на заземлителе:

$$U_3 = \frac{U_{\text{пр. доп.}}}{k_{\Pi}},$$

где k_{Π} – коэффициент напряжения прикосновения; для сложных заземлителей он определяется по формуле:

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

где L_{Γ} – длина горизонтальных заземлителей, $L_{\Gamma} = 5 \cdot 60 + 4 \cdot 41 = 464$ м;

a – расстояние между вертикальными заземлителями, $a = 5$ м;

M – параметр, зависящий от соотношения ρ_1/ρ_2 . Для значения $\rho_1/\rho_2 = 2$ значение $M = 0,62$.

\sqrt{S} – площадь контура защитного заземления;

β – коэффициент, определяемый по сопротивлению тела человека $R_{\text{ч}}$ и сопротивлению растекания тока от ступней $R_{\text{с}}$

$$\beta = \frac{R_{\text{ч}}}{R_{\text{ч}} + R_{\text{с}}}.$$

В расчетах принимаем: $R_{\text{ч}} = 1000$ Ом, $R_{\text{с}} = 1,5 \cdot \rho_1 = 1,5 \cdot 180 = 270$ Ом.

Определим недостающие параметры:

$$\beta = \frac{1000}{1000 + 270} = 0,787.$$

Таким образом, коэффициент прикосновения:

$$k_{\text{п}} = \frac{0,62 \cdot 0,787}{\left(\frac{5 \cdot 464}{5 \cdot \sqrt{2460}} \right)^{0,45}} = 0,178.$$

Потенциал на заземлителе:

$$U_3 = \frac{400}{0,178} = 2241 \text{ В},$$

что в пределах допустимого (меньше 10 кВ).

Сопротивление заземляющего устройства:

$$R_{\text{з.доп.}} = \frac{U_3}{I_3},$$

где I_3 – ток, протекающий через заземляющее устройство при расчетном КЗ, $I_3 = 5520 \text{ А}$.

$$R_{\text{з.доп.}} = \frac{2241}{5520} = 0,406 \text{ Ом}.$$

Действительный план заземляющего устройства преобразуем в расчетную модель квадратной формы, площадь которой и суммарная длина горизонтальных заземлителей такие же, как в реальной модели.

Число ячеек на стороне квадрата:

$$m = \frac{L_{\text{г}}}{2 \cdot \sqrt{S}} - 1;$$

$$m = \frac{464}{2 \cdot \sqrt{2460}} - 1 = 3,68,$$

принимаем $m = 4$.

Длина полос в расчетной модели:

$$L'_{\text{г}} = 2 \cdot \sqrt{S} \cdot (m + 1);$$

$$L'_{\text{г}} = 2 \cdot \sqrt{2460} \cdot (4 + 1) = 496 \text{ м}.$$

Длина сторон ячейки:

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

$$b = \frac{\sqrt{2460}}{4} = 12,4 \text{ м}.$$

Число вертикальных заземлителей по периметру контура:

$$n_{\text{в}} = \frac{\sqrt{S} \cdot 4}{0,9 \cdot a};$$

$$n_B = \frac{\sqrt{2460} \cdot 4}{0,9 \cdot 5} = 44,08,$$

принимая $n_B = 44$ шт.

Общая длина вертикальных заземлителей:

$$L_B = l_B \cdot n_B;$$

$$L_B = 5 \cdot 44 = 220 \text{ м.}$$

Определяем относительное эквивалентное удельное сопротивление грунта расчетной модели ρ_1/ρ_2 .

$$\text{Для } \rho_1/\rho_2 = 2; \quad a/l_B = 1 \text{ и } \frac{h_1 - t}{l_B} = \frac{1 - 0,8}{5} = 0,04.$$

Определяем $\rho_3/\rho_2 = 1,03$ (таблица 3.3), тогда

$$\rho_3 = 1,03 \cdot \rho_2 = 1,03 \cdot 90 = 92,7 \text{ Ом} \cdot \text{м.}$$

По расчетной модели определяем сопротивление реального заземляющего устройства, для чего рассчитывается относительная глубина заложения заземлителя:

$$\frac{l_B + t}{\sqrt{S}} = \frac{5 + 0,8}{\sqrt{2460}} = 0,117.$$

Найдем значение параметра A , необходимого для уточненного значения сопротивления заземляющего устройства. Так как относительная глубина заложения заземлителя входит в промежуток : $0,1 \leq \frac{l_B + t}{\sqrt{S}} \leq 0,5$, то параметр A определяется:

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

$$A = 0,385 - 0,25 \cdot 0,117 = 0,356.$$

Находим общее сопротивление сложного заземлителя:

$$R_3 = A \cdot \frac{\rho_3}{\sqrt{S}} + \frac{\rho_3}{L'_r + L_B};$$

$$R_3 = 0,356 \cdot \frac{92,7}{\sqrt{2460}} + \frac{92,7}{496 + 220} = 0,794 \text{ Ом},$$

что больше допустимого $R_{3, \text{доп.}} = 0,406 \text{ Ом}$.

Напряжение прикосновения:

$$U_{\text{пр}} = k_{\text{п}} \cdot I_3 \cdot R_3;$$

$$U_{\text{пр}} = 0,178 \cdot 5520 \cdot 0,794 = 780 \text{ В},$$

что больше допустимого значения 400 В.

Так как значения сопротивления заземлителя и напряжение прикосновения не соблюдаются, предлагается применить подсыпку гравия толщиной 20-30 см по всей территории подстанции.

Следовательно, удельное сопротивление верхнего слоя (гравия) будет $\rho_{гр} = 3000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, тогда:

$$\beta = \frac{1000}{1000 + (1,5 \cdot 3000)} = 0,18;$$

$$k_{п} = \frac{0,62 \cdot 0,18}{\left(\frac{5 \cdot 464}{5 \cdot \sqrt{2460}}\right)^{0,45}} = 0,041;$$

$$U_3 = \frac{400}{0,041} = 9705 \text{ В};$$

$$R_{з,доп.} = \frac{9705}{5520} = 1,758 \text{ Ом}.$$

Таким образом, $R_3 = 0,794 \text{ Ом}$, меньше допустимого $R_{з,доп.} = 1,758 \text{ Ом}$, следовательно, условие выполняется.

Напряжение прикосновения:

$$U_{пр} = 0,041 \cdot 5520 \cdot 0,794 = 179,69 \text{ В}.$$

По результатам расчетов напряжение прикосновения получилось меньше, чем предельно допустимое напряжение $U_{пр,доп.} = 400 \text{ В}$, следовательно, условие защиты от напряжения прикосновения выполняется.

Проверим термическую стойкость горизонтальной полосы $40 \times 4 \text{ мм}^2 = 160 \text{ мм}^2$. Минимальное сечение полосы по условиям термической стойкости при замыкании на землю при приведенном времени прохождения тока замыкания $t_{п} = 0,135 \text{ с}$:

$$F = I_3 \cdot \frac{\sqrt{t_{п}}}{C},$$

где $C = 74$ – коэффициент шин, постоянный для стали.

$$F = 5520 \cdot \frac{\sqrt{0,135}}{74} = 27,5 \text{ мм}^2.$$

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

Окончательно принимаем число вертикальных заземлителей – 44 шт. Расстояние между вертикальными заземлителями – 5 м. В качестве вертикальных заземлителей применяем круглые стальные стержни диаметром 20 мм, в качестве горизонтальных заземлителей – стальные полосы $40 \times 4 \text{ мм}$.

5 Пример расчета заземляющего устройства подстанции 35/10 кВ

Расчеты выполняются в соответствии с требованиями [1; 2; 5; 7; 9], по методике, приведенной в [11].

Исходные данные для расчета:

- площадь подстанции $S = 44 \times 32 = 1408 \text{ м}^2$;
- контур искусственного заземлителя имеет форму прямоугольника длиной 40 м и шириной 28 м;
- грунт в месте сооружения подстанции – суглинок;
- удельное сопротивление грунта: $\rho = 100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Сопротивление заземления:

$$R_3 = \frac{125}{I_3},$$

где I_3 – расчетный ток замыкания на землю;

$$I_3 = \frac{U_{ном} \cdot (35 \cdot l_k + l_g)}{350},$$

где l_k – общая длина электрически связанных между собой кабельных линий, км;

l_g – общая длина электрически связанных между собой воздушных линий, км

$$I_3 = \frac{35 \cdot (35 \cdot 8,4 + 0)}{350} = 29,4 \text{ А};$$

$$R_3 = \frac{125}{I_3}; \quad R_3 = \frac{125}{29,4} = 4,3 \text{ Ом}.$$

Принимается $R_3 \leq 4 \text{ Ом}$.

Расчетные удельные сопротивления:

- для горизонтальных заземлителей $\rho_{расч.г} = 5,8 \cdot \rho = 5,8 \cdot 100 = 580 \text{ Ом} \cdot \text{м}$;
- для вертикальных заземлителей $\rho_{расч.в} = 1,9 \cdot \rho = 1,9 \cdot 100 = 190 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Сопротивление растеканию тока одного вертикального заземлителя длиной $l = 5$ м при погружении его ниже уровня земли на 0,8 м:

$$r_{в.} = \frac{\rho_{расч.в}}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \left(\ln \frac{2 \cdot l}{d} + \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{4 \cdot t + l}{4 \cdot t - l} \right),$$

где $d = 20 \text{ мм} = 0,02 \text{ м}$ – диаметр заземлителя;

$t = t_0 + 0,5 \cdot l_g$:

$$t = 0,8 + 0,5 \cdot 5 = 3,3 \text{ м};$$

$$r_{в.} = \frac{190}{2 \pi \cdot 5} \cdot \left[\ln \frac{2 \cdot 5}{0,02} + \frac{1}{2} \ln \frac{4 \cdot 3,3 + 5}{4 \cdot 3,3 - 5} \right] = 40,3 \text{ Ом}.$$

Определяется расчетное сопротивление растеканию тока горизонтального заземлителя:

$$r_r = \frac{\rho_{расч.г.}}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln \frac{2 \cdot l^2}{b \cdot t},$$

где $B = 40 \text{ мм} = 0,04 \text{ м}$ – ширина полосы;

$t = t_0 = 0,7 \text{ м}$ – глубина заложения заземлителя.

$$r_r = \frac{580}{2\pi \cdot 124} \ln \frac{124^2}{0,04 \cdot 0,7} = 10,3 \text{ Ом.}$$

Для предварительно принятого контурного заземления при отношении: $a / l_g = 4 / 5 = 0,8$, определяем коэффициенты использования заземлителя:

$\eta_g = 0,22$ - коэффициент использования горизонтального заземлителя;

$\eta_g = 0,42$ - коэффициент использования вертикальных заземлителей.

$$N_g = \frac{r_g}{R_{3V} \cdot \eta_g}; \quad N_B = \frac{40,3}{4 \cdot 0,42} = 24 \text{ шт.}$$

Сопротивление полосы в контуре:

$$R_r = \frac{r_r}{\eta_r};$$

$$R_r = \frac{10,3}{0,22} = 46,8 \text{ Ом.}$$

Необходимое сопротивление вертикальных заземлителей:

$$R_B = \frac{R_r \cdot R_{3V}}{R_r - R_{3V}};$$

$$R_B = \frac{46,8 \cdot 4}{46,8 - 4} = 4,2 \text{ Ом.}$$

Необходимое число вертикальных заземлителей.

Уточненное число заземлителей:

$$N''_g = \frac{r_g}{R_{3V} \cdot \eta''_g};$$

$$N''_B = \frac{40,3}{4,0 \cdot 0,42} = 23,9 \text{ шт.}$$

принимается 24 заземлителя.

Сопротивление вертикальных заземлителей при $N''_g = 2$

$$R_g = \frac{r_g}{N''_B \cdot \eta''_g};$$

$$R_B = \frac{40,3}{24 \cdot 0,42} = 3,99 \text{ Ом.}$$

Сопротивление ЗУ подстанции в целом:

$$R_{3V} = \frac{R_r \cdot R_B}{R_r + R_B};$$

$$R_{3y} = \frac{46,8 \cdot 3,99}{46,8 + 3,99} = 3,7 \text{ Ом.}$$

Расчетное сопротивление $R_{3y} = 3,7 \text{ Ом} < R_{3y\text{доп.}} = 4 \text{ Ом}$, следовательно, рассчитанный контур заземления удовлетворяет необходимым требованиям.

6 Методика расчета молниезащиты

Расчеты выполняются в соответствии с требованиями [3;4;7;9], по методике, приведенной в [11].

Расчитать молниезащиту — это значит определить тип защиты, ее зону и параметры (таблица 6.1).

По типу молниезащита (м/з) может быть следующей:

- одностержневой;
- двухстержневой одинаковой или разной высоты;
- многократной стержневой;
- одиночной тросовой;
- многократной тросовой.

По степени надежности защиты различают два типа зон:

- А — степень надежности защиты $> 99,5 \%$;
- Б — степень надежности защиты $95 \dots 99,5 \%$.

Параметрами молниезащиты являются:

- h — полная высота стержневого молниеотвода, м;
- h_0 — высота вершины конуса стержневого молниеотвода, м;
- h_x — высота защищаемого сооружения, м;
- h_m — высота стержневого молниеприемника, м;
- h_a — активная высота молниеотвода, м;
- r_0, r_x — радиусы защиты на уровне земли и на высоте защищаемого сооружения, м;
- h_c — высота средней части двойного стержневого молниеотвода, м;
- $2r_c, 2r_x$ — ширина средней части зоны двойного стержневого молниеотвода на уровне земли и на высоте защищаемого объекта, м;
- α — угол защиты (между вертикалью и образующей), град;
- L — расстояние между двумя стержневыми молниеотводами, м;
- a — длина пролета между опорами троса, м;
- $h_{оп}$ — высота опоры троса, м;
- $r_x + r'_x$ — ширина зоны тросового молниеотвода на уровне защищаемого сооружения, м;

$a + 2r_{cx}$ — длина зоны двойного тросового молниеотвода на уровне защищаемого сооружения, м;

$a + 2r_c$ — длина зоны двойного тросового молниеотвода на уровне земли, м.

Ожидаемое количество поражений (N) молнией в год производится по формулам:

— для сосредоточенных зданий и сооружений (дымовые трубы, вышки, башни)

$$N = 9\pi h_x^2 n \cdot 10^{-6},$$

где h_x — наибольшая высота здания или сооружения, м;

n — среднегодовое число ударов молнии в 1 км^2 земной поверхности в месте нахождения здания или сооружения (т. е. удельная плотность ударов молнии в землю), $1/(\text{км}^2 \cdot \text{год})$, определяется по таблице 2.2;

— для зданий и сооружений прямоугольной формы

$$N = [(B + 6h_x)(A + 6h_x) - 7, 7h_x^2] n \cdot 10^{-6},$$

где A и B — длина и ширина здания или сооружения, м.

Примечание. Если здание и сооружение имеют сложную конфигурацию, то A и B — это стороны прямоугольника, в который вписывается на плане защищаемый объект.

Таблица 6.1 – Расчетные формулы молниеотводов при $h \leq 150 \text{ м}$

Зона А	Зона Б
1	2
Одиночные стержневые молниеотводы (рисунок 6.1)	
$h_o = 0,85h$ $r_o = (1,1 - 2 \cdot 10^{-3}h)h$ $r_x = (1,1 - 2 \cdot 10^{-3}h)(h - 1,2 h_x)$	$h_o = 0,92 h$ $r_o = 1,5h$ $r_x = 1,5(h - 1,1h_x)$
Двойные стержневые молниеотводы одинаковой высоты (рисунок 6.2)	
При $L \leq h$ $h_c = h_o$; $r_{cx} = r_x$; $r_c = r_o$:	
При $h < L \leq 2h$ $h_c = h_o - (0,17 + 3 \cdot 10^{-4}h)(L - h)$ $r_c = r_o$ $r_{cx} = r_o (h_c - h_x) \frac{1}{h_c}$	При $h < L \leq 6h$ $h_c = h_o - 0,14(L - h)$ $r_c = r_o$ $r_{cx} = r_o (h_c - h_x) \frac{1}{h_c}$
При $h < L \leq 4h$ $h_c = h_o - (0,17 + 3 \cdot 10^{-4}h)(L - h)$ $r_c = r_o [1 - \frac{0,2}{h}(L - 2h)]$ $r_{cx} = r_c (h_c - h_x) \frac{1}{h_c}$	
При $L > 4h$ Молниеотводы рассматривать как одиночные	При $L > 6h$ Молниеотводы рассматривать как одиночные

Продолжение таблицы 6.1

Двойные стержневые молниеотводы разной высоты (рисунок 6.3)	
Габаритные размеры торцевых областей зон защиты $h_{01}, h_{02}, r_{01}, r_{02}, r_{x1}, r_{x2}$ определяются как для одиночных стержневых молниеотводов. Габаритные размеры внутренней области зоны защиты определяются по формулам	
$r_c = 0,5(r_{01}+r_{02}); h_c = 0,5(h_{c1}+h_{c2}); r_x = (h_c - h_x) \frac{r_c}{h_c}$.	
Значения h_{c1} и h_{c2} определяются как для двойных стержневых молниеотводов одинаковой высоты.	
Многократные стержневые молниеотводы (рисунок 6.4)	
Зона защиты строится посредством попарно взятых соседних стержневых молниеотводов. Основным условием защищенности одного или нескольких объектов высотой с надежностью зон А или Б является $r_{cx} > 0$	
Одиночные тросовые молниеотводы (рисунок 6.5)	
$h_0 = 0,85h$ $r_0 = (1,35-25 \cdot 10^{-4}h)$ $r_x = (1,35-25 \cdot 10^{-4}h)(h-1,2h_x)$	$h_0 = 0,92h$ $r_0 = 1,7h$ $r_x = 1,7(h-1,1h_x)$
Двойные тросовые молниеотводы одинаковой высоты (рисунок 6.6)	
При $L \leq h$ $h_c = h_x$ $r_{cx} = r_x$ $r_c = r_0$	
При $h < L \leq 2h$ $h_c = h_0 - (0,14 + 5 \cdot 10^{-4}h)(L-h)$ $r'_x = \frac{L(h_0 - h_x)}{2(h_0 - h_c)}$ $r_c = r_0$ $r_{cx} = r_0(h_c - h_x) \frac{1}{h_c}$	При $h < L \leq 6h$ $h_c = h_0 - 0,12(L-h)$ $r'_x = \frac{L(h_0 - h_x)}{2(h_0 - h_c)}$ $r_c = r_0$ $r_{cx} = r_0(h_c - h_x) \frac{1}{h_c}$
Двойные тросовые молниеотводы разной высоты (рисунок 6.7)	
Значения $h_{01}, h_{02}, r_{01}, r_{02}, r_{x1}, r_{x2}$ определяются по формулам одиночных тросовых молниеотводов. Для определения размеров r_c и h_c используются формулы $r_c = 0,5(r_{01}+r_{02}); h_c = (h_{c1}+h_{c2})$. Значения $h_{c1}, h_{c2}, r'_{x1}, r'_{x2}, r_{cx}$ вычисляются по выше приведенным формулам двойного тросового молниеотвода.	

Примечание. Для одиночного тросового молниеотвода h — это высота троса в середине пролета. С учетом провеса троса сечением 35...50 мм² при известной высоте опор ($h_{оп}$) и длине пролета (a) высота троса (h в метрах) определяется по формулам

$$h = h_{оп} - 2 \text{ — при } a \leq 120 \text{ м;}$$

$$h = h_{оп} - 3 \text{ — при } 120 < a \leq 150 \text{ м.}$$

Таблица 6.2 – Зависимость $n = F(t_{cp})$

t_{cp} , ч/ГОД	10...20	21...40	41...60
n , 1/(км ² -ГОД)	1	2	4
t_{cp} , ч/ГОД	61...80	81...100	101 и более
n , 1/(км ² -ГОД)	5,5	7	8,5

Примечание. t_{cp} — среднегодовая продолжительность гроз, ч/год. Определяется по картам, составленным на основании метеосводок за 10 лет.

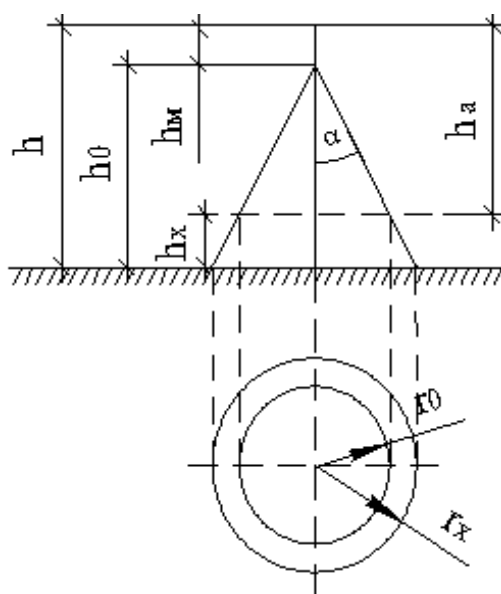


Рисунок 6.1 – Зона защиты одиночного стержневого молниеотвода

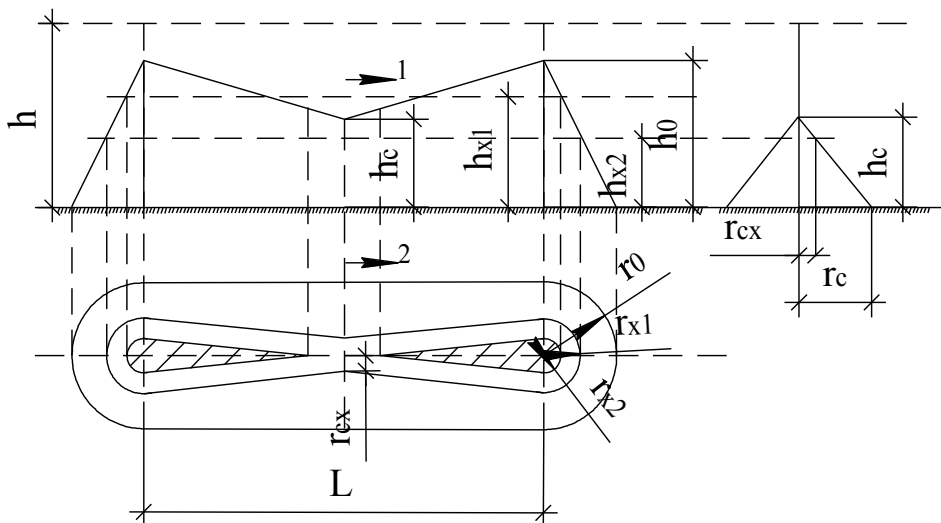


Рисунок 6.2 – Зона защиты двойного стержневого молниеотвода равной длины

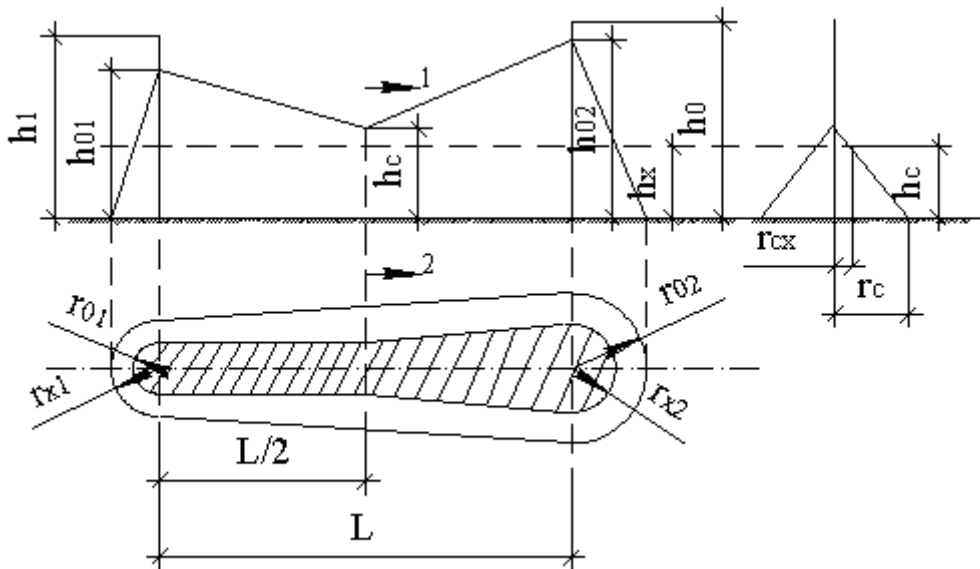


Рисунок 6.3 – Зона защиты двойного стержневого молниеотвода разной длины

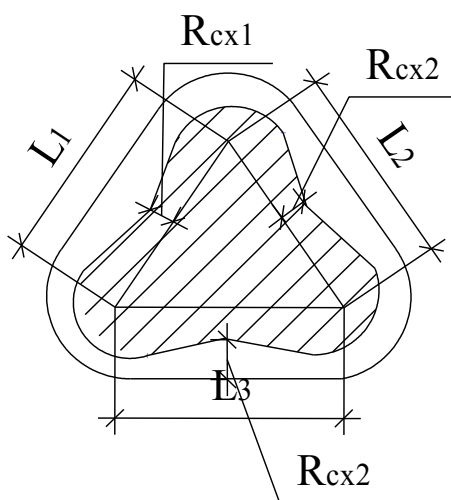


Рисунок 6.4 – Зона защиты (в плане) многократного стержневого молниеотвода

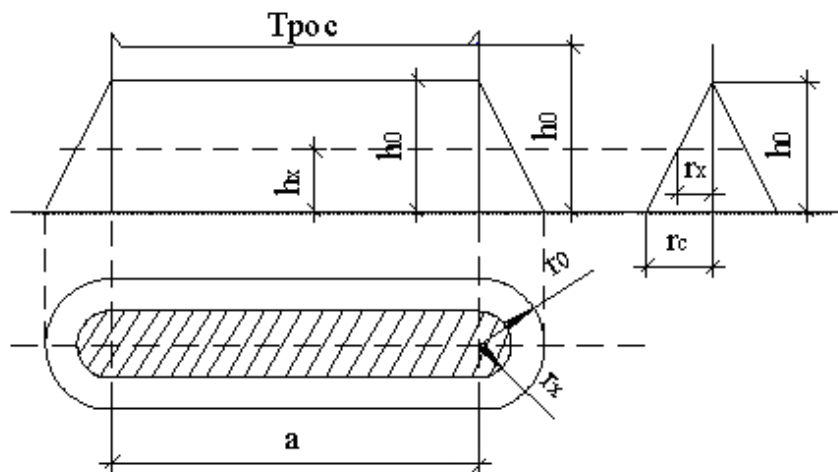


Рисунок 6.5 – Зона защиты одиночного тросового молниеотвода

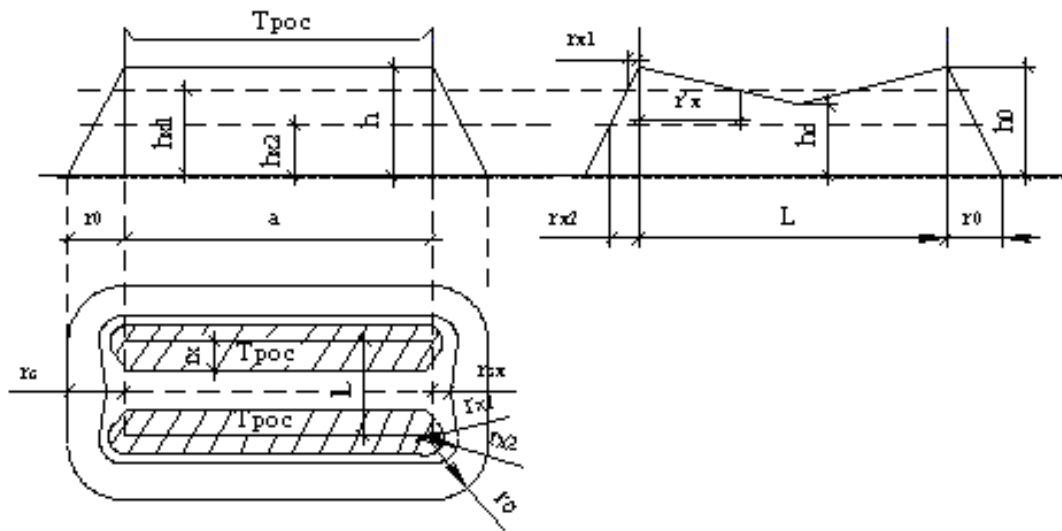


Рисунок 6.6 – Зона защиты двойного тросового молниеотвода

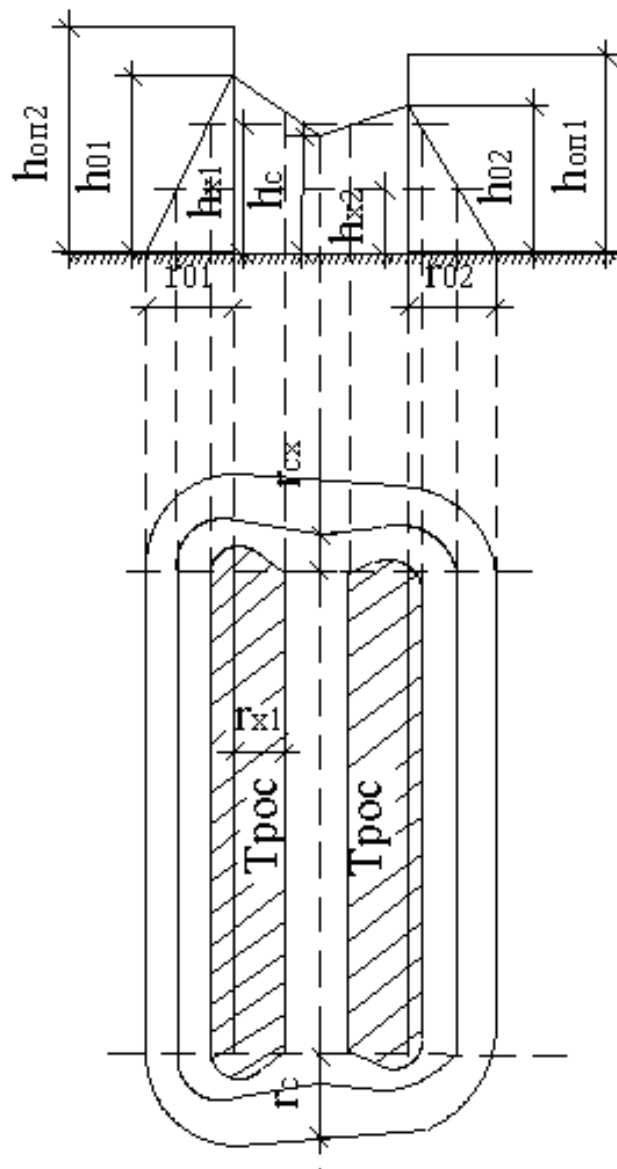


Рисунок 6.7 – Зона защиты двух тросовых молниеотводов разной высоты

7 Пример расчета молниезащиты подстанции 35/10 кВ

Расчеты выполняются в соответствии с требованиями [3; 4; 7; 9], по методике, приведенной в [11].

Для защиты подстанции используется 4 одиночно стоящих стержневых молниеотвода типа МК-18 (молниеотвод конический). Полная высота составляет $h = 18$.

Площадь подстанции $S = 44 \times 32 = 1408 \text{ м}^2$.

Определяем количество N поражений молнией в год для зданий и сооружений прямоугольной формы производится по формуле:

$$N = [(S + 6h)(L + 6h) - 7,7h^2]n \cdot 10^{-6},$$

где h — наибольшая высота здания или сооружения, м;

S, L — соответственно ширина и длина здания или сооружения, м;

n — среднегодовое число ударов молнии в 1 км земной поверхности (удельная плотность ударов молнии в землю) в месте нахождения здания или сооружения.

Удельная плотность ударов молнии в землю n определяется исходя из среднегодовой продолжительности гроз в часах и равна 4 для Курганской области.

$$N = [(44 + 6 \cdot 8)(32 + 6 \cdot 8) - 7,7 \cdot 8^2] \cdot 4 \cdot 10^{-6} = 0,031.$$

Согласно таблице 7.1 тип зоны защиты — зона Б; категория молниезащиты — II.

Таблица 7.1 – Тип зоны защиты и категория молниезащиты

Здания и сооружения	Местоположение	Тип зоны защиты при использовании стержневых и тросовых молниеотводов	Категория молниезащиты
Наружные установки и открытые склады, создающие согласно ПУЭ зону классов В-1а	В местностях со средней продолжительностью гроз 20 ч в год и более	При $0,01 < N$	II

Проводится непосредственный расчет молниезащиты подстанции:

– высота молниеотводов $h = 18 \text{ м}$;

– высота основного коммутационного оборудования ОРУ 35 кВ $h_{x1} = 8 \text{ м}$;

– расстояние между молниеотводами М1 и М2 (М3 и М4) составляет $L = 24 \text{ м}$; между М1 и М4 (М2 и М3) $L = 36 \text{ м}$.

Расстояние между молниеотводами М1 и М3 (М2 и М4) составляет

$$L = \sqrt{a^2 + b^2},$$

где $a = 36$ м и $b = 24$ м соответственно расстояние между молниеотводами М1 и М4; М1 и М2.

$$L = \sqrt{36^2 + 24^2} = 43 \text{ м}.$$

Зона Б: габаритные размеры торцевых областей зон защиты на уровне земли:

$$\begin{aligned} h_0 &= 0,92 \cdot h; \\ h_0 &= 0,92 \cdot 18 = 16,6 \text{ м}; \\ r_0 &= 1,5 \cdot h; \\ r_0 &= 1,5 \cdot 18 = 27 \text{ м}. \end{aligned}$$

Радиус защиты на высоте защищаемого объекта

$$r_{x1} = 1,5 \cdot (h - h_x / 0,92);$$

где h – высота молниеотвода;

h_x – горизонтальное сечение зоны защиты на высоте защищаемого сооружения.

$$r_{x1} = 1,5 \cdot (18 - 8 / 0,92) = 14,0 \text{ м}.$$

Для молниеотводов М1 и М2 (М3 и М4), $L = 24$ м. Для случая, когда при

$$h < L < 6h$$

$$h_{c1} = h_{c2} = 16,6 - 0,14 \cdot (24 - 18) = 15,8 \text{ м};$$

$$r_c = r_0 = 27 \text{ м};$$

$$r_{cx} = 1,5 \cdot (15,8 - 8 / 0,92) = 10,7 \text{ м}.$$

Для молниеотводов М2 и М3 (М1 и М4) определяем h_c и r_{cx} . Этот случай характеризуется как $h < L < 6h$, $L = 36$ м.

Тогда параметры зоны защиты определяются аналогично:

$$h_{c1} = h_{c2} = 16,6 - 0,14 \cdot (36 - 18) = 14,1 \text{ м};$$

$$r_c = r_0 = 27 \text{ м};$$

$$r_{cx1} = 1,5 \cdot (14,1 - 8 / 0,92) = 8,1 \text{ м}.$$

Для молниеотводов М1 и М3 (М2 и М4) определяем h_c и r_{cx} . Этот случай характеризуется как $h < L < 6h$, $L = 43$ м.

$$h_{c1} = h_{c2} = 16,6 - 0,14 \cdot (43 - 18) = 12,1 \text{ м}.$$

Техническая характеристика молниеотводов:

Категория молниезащиты – II;

Тип защиты – Б;

Высота молниеотводов – 18000 мм;

Молниеприемник – стальной прут диаметром 20 мм.

Молниеотводы изготавливаются на базе опор освещения. В качестве искусственного заземлителя принята металлическая заделка в фундаменте под опорой, к которой болтовым соединением крепится нижний фланец опоры.

Искусственный заземлитель длиной 5000 мм, из того же материала что и опора молниеотвода.

8 Список рекомендуемой литературы

1 ГОСТ 12.1.019-79 (2001) ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.

2 ГОСТ 12.1.030-81 (2001) ССБТ. Электробезопасность. Защитное заземление. Зануление.

3 Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений.

РД 34.21.122 – 87/Минэнерго СССР. – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 56 с.

4 Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций. СО – 153.34.21. – 122 – 2003 г. Министерство энергетики РФ. – Москва : ЦПТИ ОРГРЭС, 2004. – 60 с.

5 Межотраслевые правила по охране труда (правила безопасности) при эксплуатации электроустановок (с изм. и доп.). – Москва : Изд-во НЦ ЭНАС, 2004. – 192 с.

6 Мошкин В. И. Методические указания к выполнению выпускной квалификационной работы для студентов направления 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» / В. И. Мошкин – Курган : Изд. КГУ, 2022. – 62 с.

7 Нормы технологического проектирования понижающих подстанций с высшим напряжением 35 – 750 кВ. – 4-е изд. – Москва : Энергия, 2009. – 40 с.

8 Правила пожарной безопасности для энергетических предприятий. – 3-е изд., с изм. и доп. – Москва : Энергоатомиздат, 2000. – 91 с.

9 Правила устройства электроустановок ПУЭ. – 7-е изд., перераб. и доп. – Москва : Энергоатомиздат, 2005. – 640 с.

10 Рожкова Л. Д. Электрооборудование станций и подстанций / Л. Д. Рожкова, В. С. Козулин – Москва: Энергоатомиздат, 1987. – 648 с.

11 Шеховцов В. П. Расчет и проектирование схем электроснабжения. Методическое пособие для курсового проектирования / В. П. Шеховцов. – Москва : Форум: ИНФА, 2010. – 214 с.

Копытин Игорь Иванович
Помялов Станислав Юрьевич

ДИПЛОМНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

Методические указания
к выполнению раздела «Электробезопасность»
выпускной квалификационной работы
для студентов очной и заочной формы обучения
направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Редактор Н. М. Быкова

Подписано в печать 17.02.2023	Формат 60×84 1/16	Бумага 80 г/м ²
Печать цифровая	Усл. печ. л. 2,0	Уч.-изд. л. 2,0
Заказ 06	Тираж 25	

Библиотечно-издательский центр КГУ.
640020, г. Курган, ул. Советская, 63/4.
Курганский государственный университет.