

Министерство науки и высшего образования РФ
Рубцовский индустриальный институт (филиал)
ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет
им. И.И. Ползунова»

О.П. БАЛАШОВ

РАСЧЕТ ЗАЩИТНОГО ЗАЗЕМЛЕНИЯ

Методические указания к выполнению расчетного задания
по дисциплине «Электробезопасность» для студентов, обучающихся
по направлению «Электроэнергетика и электротехника»
всех форм обучения

Рубцовск 2021

УДК 621.31

Балашов О.П. Расчет защитного заземления: Методические указания к выполнению расчетного задания по дисциплине «Электробезопасность» для студентов, обучающихся по направлению «Электроэнергетика и электротехника» всех форм обучения /Рубцовский индустриальный институт. – Рубцовск, 2021. – 13 с. [ЭР].

В методических указаниях рассмотрен расчет защитного заземления и приводится содержание расчетного задания по дисциплине «Электробезопасность». Предназначено для студентов направления «Электроэнергетика и электротехника» всех форм обучения.

Рассмотрены и одобрены
на заседании кафедры
электроэнергетики РИИ.
Протокол № 2 от 26.02.2021.

© Рубцовский индустриальный институт, 2021

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Для защиты людей от поражения электрическим током при повреждении изоляции должны быть применены по отдельности или в сочетании следующие меры защиты при косвенном прикосновении: защитное заземление, автоматическое отключение питания, защитное электрическое разделение цепей, двойная или усиленная изоляция, малое напряжение, уравнивание и выравнивание потенциалов; изолирующие (непроводящие) помещения.

Заземлением называется преднамеренное электрическое соединение какой-либо точки сети, электроустановки или оборудования с заземляющим устройством.

Заземление осуществляется с помощью заземляющего устройства (ЗУ), которое состоит из заземлителей и заземляющих проводников. **Заземлителем** называется металлический проводник или группа проводников, находящихся в соприкосновении с землей. Заземляющий проводник - проводник, соединяющий заземляемую часть ЭУ с заземлителем.

Различают естественные и искусственные заземлители.

В качестве естественных заземлителей могут быть использованы:

- металлические и железобетонные конструкции зданий и сооружений, находящиеся в соприкосновении с землей;
- металлические трубы водопровода, проложенные в земле;
- обсадные трубы буровых скважин;
- свинцовая оболочка бронированных кабелей, проложенных в земле.

Алюминиевые оболочки кабелей использовать в качестве заземлителей не допускается.

УСТРОЙСТВО ЗАЗЕМЛЕНИЯ

По расположению заземлителей относительно защищаемого оборудования заземления подразделяются на выносные и контурные.

Выносное заземление располагается на некотором удалении от заземляемого оборудования (рисунок 1). При контурном - заземлители располагаются по контуру вокруг заземляемого оборудования (или внутри площадки, где оно располагается). Все заземлители соединяются электрически друг с другом.

Последовательность работ при устройстве заземлителей складывается из следующих операций.

1. Выкапывание траншеи глубиной 0,5–0,8 м (предпочтительно с северной стороны здания), ниже уровня промерзания грунта в районе устройства заземлителей — для механической и погодной изоляции проводника (полосы) и верхушек электродов (рисунок 2).

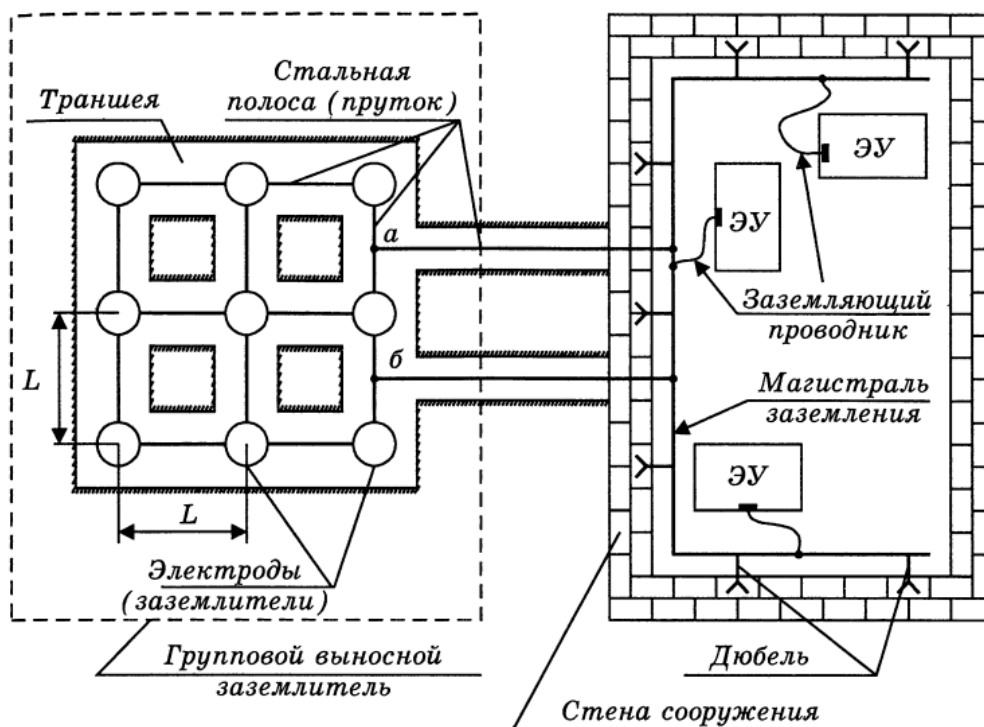


Рисунок 1 – Заземляющее устройство сооружения с групповым выносным заземлителем

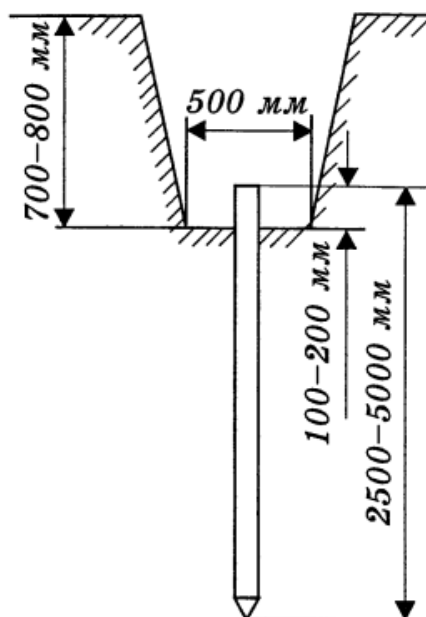


Рисунок 2 - Установка стержневого электрода в траншее

2. Заглубление вертикальных электродов длиной не менее 1,5–2,0 м посредством механизмов и приспособлений (копров, машины пневмоударной, вибрационных и ударно-вибрационных заглубителей, машины для ввертывания электродов) или кувалдой. Для лучшего растекания тока электроды помещают на расстоянии один от другого, равном не менее ординарной длины стержней.

3. Приваривание к верхним концам электродов горизонтальных соединительных полос, установленных на ребро. Конец полосы вводят в здание, где к ней приваривают магистральную шину.

4. Засыпка землёй, очищенной от щебня и мусора.

5. Уплотнение грунта.

Все соединения, расположенные в земле, должны выполняться посредством сварки, а к корпусам аппаратов, машин и опорам ВЛ — болтовым соединением (для обеспечения возможности производства измерений).

На каждое заземляющее устройство, находящееся в эксплуатации, должен быть паспорт — паспорт заземляющего устройства, в который вносятся: дата ввода в эксплуатацию, исполнительная схема заземления, основные технические характеристики, данные о результатах проверок состояния устройства, характер ремонтов и изменений, внесенных в это устройство и др. (п. 2.7.15 ПТЭ). К паспорту должны быть приложены результаты визуальных осмотров, осмотров со вскрытием грунта, протоколы измерения параметров заземляющего устройства, данные о характере ремонтов и изменениях, внесенных в конструкцию устройства.

При выполнении ЗУ необходимо использовать все имеющиеся естественные заземлители. Сопротивление естественных заземлителей определяется их измерением с учетом коэффициента сезонности.

Допустимое сопротивление ЗУ по нормам при наличии искусственного и естественного заземлителей

$$R_3 = \frac{R_{II} \cdot R_E}{R_{II} + R_E}. \quad (1)$$

Искусственные заземлители могут быть из черной или оцинкованной стали, или медными и не должны иметь окраски. Материал и наименьшие размеры заземлителей должны соответствовать приведенным в таблице 1.

Сопротивление растеканию каждого отдельного электрода зависит от удельного сопротивления грунта с учетом его сезонных изменений: формы, размеров и материала электрода; расположения электродов и глубины погружения его в землю, а также наличия вблизи него других электродов, электрически соединенных с ним.

Вследствие эффекта экранирования проводимость заземлителя понижается, что оценивается коэффициентом использования $\eta_{ИС}$.

Сопротивление заземляющего устройства R_3 , состоящее из вертикальных электродов (уголков, стержней, труб) и горизонтальных полос, определяется:

$$R_3 = \frac{R_B}{n \cdot \eta_{ИС.В}} \parallel \frac{R_\Gamma}{\eta_{ИС.Г}} = \frac{R_B \cdot R_\Gamma}{R_B \cdot \eta_{ИС.Г} + R_\Gamma \cdot n \cdot \eta_{ИС.В}} \quad (\text{рисунок 3}). \quad (2)$$

Таблица 1 – Наименьшие размеры заземлителей и заземляющих проводников, проложенных в земле

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

*- Диаметр каждой проволоки

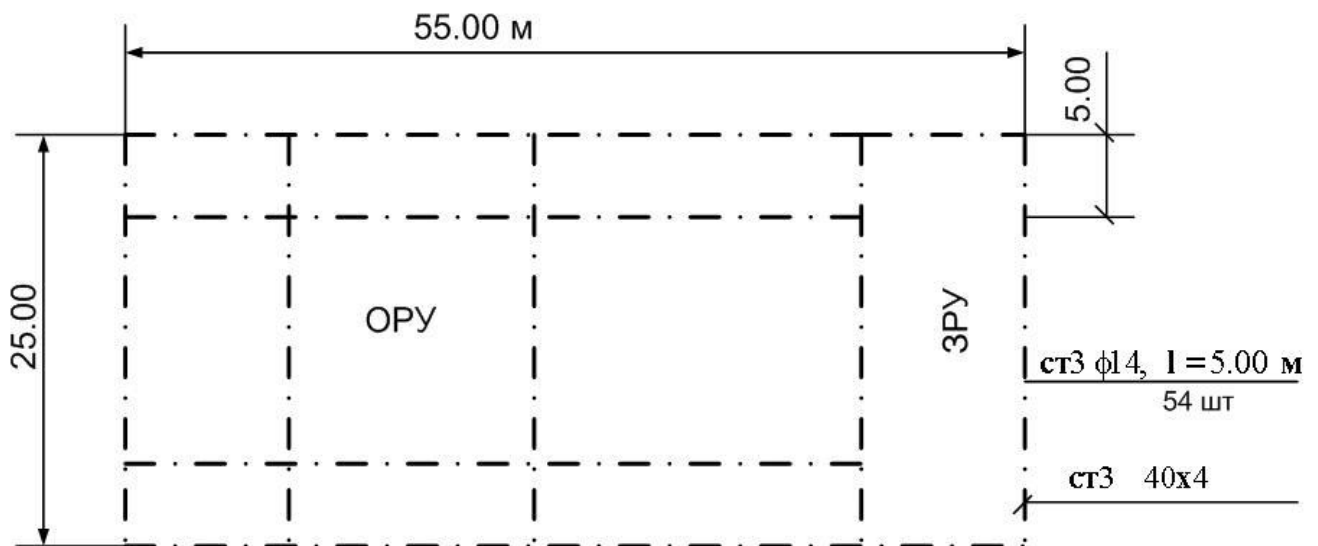


Рисунок 3 – План заземляющего устройства подстанции

РАСЧЕТ ЗАЩИТНОГО ЗАЗЕМЛЯЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

Расчет ЗУ сводится к расчету количества вертикальных заземлителей, так как заземляющие проводники в большинстве случаев принимаются по условиям механической прочности и стойкости к коррозии по ПУЭ.

Расчет сопротивления заземлителя проводится *методом коэффициентов использования* в следующем порядке.

1. В соответствии с ПУЭ устанавливается допустимое сопротивление ЗУ (R_3). Если ЗУ является общим для установок на различное напряжение, то за расчетное сопротивление ЗУ принимается наименьшее из допустимых:

а) для ЭУ напряжением выше 1000 В с эффективно заземленной нейтралью ЗУ должно иметь в любое время года сопротивление не более 0,5 Ом с учетом сопротивления естественных и искусственных заземлителей.

б) для ЭУ напряжением выше 1000 В с изолированной нейтралью сопротивление ЗУ при прохождении расчетного тока замыкания на землю в любое время года с учетом сопротивления естественного заземлителя должно быть:

$$R_3 = \frac{250}{I_3} \leq 10 \text{ Ом}, \quad (3)$$

где 250 В – расчетное напряжение.

Расчетный ток замыкания на землю I_3 можно определить, зная длину электрически связанных кабельных линий l_K , км, воздушных линий l_B , км, и напряжение сети U_H , кВ, по формуле:

$$I_3 = \frac{U_H(35 \cdot l_K + l_B)}{350}. \quad (4)$$

в) При использовании ЗУ одновременно для ЭУ напряжением до 1 кВ с глухозаземленной нейтралью R_3 должно быть не более указанного в пункте 2.

2) Для ЭУ напряжением до 1 кВ в сетях с глухозаземленной нейтралью должно быть выполнено зануление. Сопротивление ЗУ, к которому присоединены нейтрали генератора или трансформатора, или выводы источника однофазного тока, в любое время года должно быть при линейном напряжении:

$$660 \text{ В} - R_3 \leq 2 \text{ Ом};$$

$$380 \text{ В} - R_3 \leq 4 \text{ Ом};$$

$$220 \text{ В} - R_3 \leq 8 \text{ Ом}.$$

2. При наличии естественных заземлителей и если $R_E < R_3$, то искусственные заземлители не требуются.

Если $R_E > R_3$, то необходимо сооружение искусственных заземлителей, сопротивление которого определяется:

$$R_H = \frac{R_E \cdot R_3}{R_E - R_3}. \quad (5)$$

Далее расчет ведется по R_H .

3. По таблицам 2 и 3 определяются удельное сопротивление грунта и коэффициенты сезонности k_C , зависящие от климатической зоны, вида заземлителя и учитывающие высыхание грунта летом и промерзание его зимой.

Расчетное удельное сопротивление грунта для вертикальных стержневых заземлителей определяют по формуле:

$$\rho_{РАСЧ.В} = \rho \cdot k_C; \quad (6)$$

для протяженного горизонтального заземлителя

$$\rho_{РАСЧ.Г} = \rho \cdot k'_C. \quad (7)$$

Таблица 2 – Приближенные значения удельных сопротивлений грунтов и воды

Наименование грунта	Удельное сопротивление, Ом·м
Песок	500 – 700
Супесок	300
Суглинок	100
Глина	40
Садовая земля	40
Глина (слой 7-10м) и гравий	70
Мергель, известняк, крупный песок с	1000 – 2000
Скала, валуны	2000 – 4000
Чернозем	20 – 30
Торф	20
Речная вода (на равнинах)	10 – 100
Морская вода	0,2 – 1

Таблица 3 - Признаки климатических зон и коэффициенты сезонности k_C

Данные климатических зон и типы применяемых заземляющих электродов	Климатические зоны России			
	I	II	III	IV
Климатические признаки зон: средняя многолетняя низшая температура января; средняя многолетняя высшая температура июля;	от -20 до -15 ⁰ С	от -14 до -10 ⁰ С	от -10 до - 0 ⁰ С	от -0 до +5 ⁰ С
	от + 16 до + 18 ⁰ С	от + 18 до + 22 ⁰ С	от + 22 до + 24 ⁰ С	от + 24 до + 26 ⁰ С
Среднегодовое количество осадков, мм	400	500	500	300-500
Продолжительность заморозания вод, дн	190-170	150	100	0
Значение коэффициента k_C при применении стержневых электродов длиной 2-3 м и на глубине 0,5 – 0,8 м	1,8 – 2,0	1,5 – 1,8	1,4 – 1,6	1,2 – 1,4
Значение коэффициента k'_C при применении протяженных электродов и глубине заложения =0,8 м	4,5 – 7,0	3,5 – 4,5	2,0 – 2,5	1,5 – 2,0
Значение коэффициента k_C при длине стержней длиной 5м и глубине заложения их вершины 0,7 – 0,8 м	1,35	1,25	1,15	1,1

4. Сопротивление растеканию (сопротивление, которое оказывает электрическому току грунт) одного вертикального заземлителя круглого сечения рассчитывается по формуле:

$$R_B = \frac{0,366 \cdot \rho_{РАСЧ,В}}{l} \left(\lg \frac{2 \cdot l}{d} + \frac{1}{2} \cdot \lg \frac{4 \cdot t' + l}{4 \cdot t' - l} \right), \text{ при } l \gg d, \quad t > 0,5m, \quad (8)$$

где $\rho_{РАСЧ,В}$ – расчетное удельное сопротивление грунта, Ом·м;

l – длина стержня, м;

t' – глубина заложения, равная расстоянию от поверхности земли до середины заземлителя, м;

d – диаметр стержня, м.

Если в качестве вертикальных электродов используется уголок, то диаметр уголка с шириной полки b принимают равным $d = 0,95 \cdot b$.

5. По плану ЭУ определяется конфигурация ЗУ (в ряд или по контуру).

Ориентировочное число вертикальных заземлителей, при предварительно принятом по таблице 4 или по таблице 5 коэффициенте использования вертикальных электродов $\eta_{И.В}$ (причем расстояние между вертикальными электродами должно быть принято не менее их длины), определяется по формуле:

$$n_B = \frac{R_B}{R_{И} \cdot \eta_{И.В}}. \quad (9)$$

Таблица 4 – Коэффициенты использования η_e вертикальных электродов из труб, уголков или стержней, размещенных в ряд без учета влияния полосы связи

Отношение расстояния между электродами к их длине a/l	Число электродов n_e	η_e
1	3	0,76 – 0,80
	5	0,67 – 0,72
	10	0,56 - 0,62
	15	0,51 – 0,56
	20	0,47 – 0,50
2	2	0,90– 0,92
	3	0,85 – 0,88
	5	0,79 – 0,83
	10	0,72 - 0,77
	15	0,66 – 0,73
	20	0,65 – 0,70
3	2	0,93 – 0,95
	3	0,90 – 0,92
	5	0,85 – 0,88
	10	0,79 - 0,83
	15	0,76 - 0,80
	20	0,74 – 0,79

6. Сопротивление растеканию горизонтальных электродов R_{Γ} рассчитывается по формуле:

$$R_{\Gamma} = \frac{0,366 \cdot \rho_{\text{РАСЧ.Г}}}{l} \cdot \lg \frac{2 \cdot l^2}{d \cdot t'}, \quad \text{при } l \gg d, \quad l > 4 \cdot t'; \quad (10)$$

для полосы шириной b получаем $d = 0,95 \cdot b$;

$l = 1,05 \cdot n_{\epsilon} \cdot a$ – длина горизонтального электрода, м,

a – расстояние между вертикальными электродами, м.

Расчетное сопротивление растеканию горизонтальных электродов равно:

Таблица 5 - Коэффициенты использования η_{ϵ} вертикальных электродов из труб, уголков или стержней, размещенных по контуру без учета влияния полосы связи

Отношение расстояния между электродами к их длине a/l	Число электродов n_{ϵ}	η_{ϵ}
1	2	3
	4	0,66 – 0,72
	6	0,58 – 0,65
	10	0,52 – 0,58
	20	0,44 – 0,50
	40	0,38 – 0,44
	60	0,36 – 0,42
	100	0,33 – 0,39
2	4	0,76 – 0,80
	6	0,71 – 0,75
	10	0,66 – 0,71
	20	0,61 – 0,66
	40	0,55 – 0,61
	60	0,52 – 0,58
	100	0,49 – 0,55
3	4	0,84 – 0,86
	6	0,78 – 0,82
	10	0,74 – 0,78
	20	0,68 – 0,73
	40	0,64 – 0,69
	60	0,62 – 0,67
	100	0,59 – 0,65

$$R_{\text{РАСЧ.Г}} = \frac{R_{\Gamma}}{\eta_{\text{И.Г}}}, \quad (11)$$

где $\eta_{\text{И.Г}}$ – коэффициент использования горизонтальной полосы определяется по таблице 6 или 7.

Таблица 6 - Коэффициенты использования η_z горизонтального полосового электрода из трубы, уголка или полосы, при размещении вертикальных электродов в ряд

Отношение расстояния между электродами к длине a/l	η_z при числе электродов в ряд							
	4	5	8	10	20	30	50	65
1	0,77	0,74	0,67	0,62	0,42	0,42	0,21	0,20
2	0,89	0,86	0,79	0,75	0,56	0,56	0,36	0,34
3	0,92	0,90	0,85	0,82	0,68	0,68	0,49	0,47

Таблица 7 - Коэффициенты использования η_z горизонтального полосового электрода из трубы, уголка или полосы, при размещении вертикальных электродов по контуру

Отношение расстояния между электродами к длине a/l	η_z при числе электродов в контуре заземления								
	4	5	8	10	20	30	50	70	100
1	0,45	0,40	0,36	0,34	0,27	0,24	0,21	0,20	0,19
2	0,55	0,48	0,43	0,40	0,32	0,30	0,28	0,26	0,24
3	0,65	0,64	0,60	0,56	0,45	0,41	0,37	0,35	0,33

7. Необходимое сопротивление вертикальных электродов с учетом проводимости горизонтальных соединительных электродов уточняется по формуле:

$$R'_B = \frac{R_{РАСЧ,Г} \cdot R_{II}}{R_{РАСЧ,Г} - R_{II}}. \quad (12)$$

8. Уточненное количество вертикальных заземлителей определяется:

$$n'_B = \frac{R_B}{R'_B \cdot \eta_{II.B}}. \quad (13)$$

Согласно ПУЭ (седьмое издание) в целях выравнивания электрического потенциала и обеспечения присоединения электрооборудования ЭУ напряжением выше 1000 В в сетях с эффективно заземленной нейтралью к заземлителю на территории, занятой оборудованием, следует прокладывать продольные и поперечные горизонтальные заземлители и объединять их между собой в заземляющую сетку.

Продольные заземлители должны быть проложены вдоль осей электрооборудования со стороны обслуживания на глубине 0,5 – 0,7 м от поверхности земли и на расстоянии 0,8 – 1,0 м от фундаментов или оснований

оборудования. Допускается увеличение расстояний от фундаментов до 1,5 м с прокладкой одного заземлителя для двух рядов оборудования, если стороны обслуживания обращены друг к другу, а расстояние между основаниями или фундаментами двух рядов не превышает 3,0 м.

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

СОДЕРЖАНИЕ РАСЧЕТНОГО ЗАДАНИЯ

1. С учетом сопротивления заземления естественных заземлителей определить допустимую величину стационарного сопротивления контура заземления. Исходные данные по вариантам приведены в таблице 2.

2. Определить параметры контура заземления (длину и число вертикальных электродов, шаг сетки), обеспечивающие допустимую величину его стационарного сопротивления заземления.

Таблица 2 - Исходные данные

Вариант	Напряже- ние подстан- ции, кВ	ЛЭП		Климати- ческая зона	Грунт	Горизонталь- ный заземлитель, размером, мм	Вертикальный заземлитель, размером, мм
		длина ВЛ, км	длина КЛ, км				
		1 цифра		2 цифра		3 цифра	4 цифра
1	110/35	30	6	I	глина	полоса 50x4	сталь круглая Ø 20, L=5 м
2	110/10	35	10	II	суглина	полоса 40x4	сталь круглая Ø 18, L=5 м
3	110/6	25	10	III	супесок	сталь круглая Ø10	сталь круглая Ø 16, L=4,5 м
4	35/10	15	-	IV	чернозем	сталь круглая Ø12	сталь круглая Ø 14, L=5 м
5	35/0,4	-	10	I	садовая земля	сталь круглая Ø14	сталь круглая Ø 12, L=4 м
6	10/0,4	10	-	II	каменистая почва	полоса 50x5	стальной уголок 40x40x4, L=3м
7	10/0,23	7	3	III	торф	полоса 40x5	стальной уголок 45x45x4, L=2,5м
8	10/0,66	12	-	IV	глина	полоса 40x4	стальной уголок 50x50x5, L=3м
9	6/0,66	-	6	II	суглина	сталь круглая Ø10	стальной уголок 60x60x6, L=2,5м

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ И УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

1. Электробезопасность: учебное пособие / Е.Е. Привалов, А.В. Ефанов, С.С. Ястребов, В.А. Ярош; под ред. Е.Е. Привалова. – Москва; Берлин: Директ-Медиа, 2018. – 210 с.: ил., схем., табл. – Режим доступа: по подписке. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=493604>
2. Сибикин, Ю.Д. Электробезопасность при эксплуатации электроустановок промышленных предприятий [текст]/ Ю.Д. Сибикин, М.Ю. Сибикин. - М.: Академия, 2010. - 240 с.
3. Привалов, Е.Е. Основы электробезопасности: учебное пособие: в 3 ч. / Е.Е. Привалов. – Москва; Берлин: Директ-Медиа, 2016. – Ч. 2. Заземление электроустановок систем электроснабжения. – 156 с.: ил., схем., табл. – Режим доступа: по подписке. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=436755>
4. Привалов, Е.Е. Основы электробезопасности: учебное пособие: в 3 ч. / Е.Е. Привалов. – Москва; Берлин: Директ-Медиа, 2016. – Ч. 3. Защита от напряжения прикосновения и шага в электрических сетях. – 180 с.: ил., схем., табл. – Режим доступа: по подписке. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=436756>
5. Правила устройства электроустановок: [Текст]: Все действующие разделы, 2007. -853с., ил.
6. Нормативные основы устройства и эксплуатации электроустановок: [Текст]: – Нормативно-технический сборник. – Барнаул, 2002. – 976с.
7. Парфенова Н.А., Балашов О.П. Электроэнергетика. Часть II: Задания и методические указания к выполнению контрольных работ для студентов специальности 140211 всех форм обучения /Рубцовский индустриальный институт. – Рубцовск, 2010. - 105 с.