

122-123 Практическая работа №5. Расчёт заземляющего устройства.

Выбрать заземляющее устройство для электропотребителя по варианту №

№	Грунт			Клим. зона	Вид заземления
	Основной	Верхний слой	Толщина		
1	Глина	Чернозём	1 м	II	Рабочее
2	Суглинок	-	-	II	Рабочее
3	Суглинок	Торф	0,7 м	III	Повторное
4	Супесок	Садовая земля	0,5 м	II	Повторное
5	Лёсс	-	-	II	Повторное
6	Мергель	Торф	1 м	III	Повторное
7	Суглинок	Садовая земля	0,7 м	II	Рабочее
8	Супесок	Торф	1 м	III	Повторное
9	Супесок	-	-	III	Повторное
10	Лёсс	Чернозём	0,7 м	III	Повторное
11	Глина	Садовая земля	0,5 м	III	Рабочее
12	Суглинок	Торф	0,7 м	III	Повторное
13	Суглинок	-	-	II	Рабочее
14	Супесок	Садовая земля	0,5 м	II	Повторное
15	Лёсс	Садовая земля	0,5 м	II	Повторное
16	Мергель	Садовая земля	0,5 м	III	Повторное
17	Суглинок	-	-	II	Рабочее
18	Супесок	-	-	III	Повторное
19	Лёсс	Торф	0,5 м	III	Повторное
20	Глина	Торф	0,5 м	III	Повторное
21	Лёсс	-	-	II	Повторное
22	Суглинок	Чернозём	0,7 м	II	Повторное
23	Супесок	Садовая земля	0,5 м	II	Повторное
24	Лёсс	Торф	0,5 м	II	Повторное
25	Мергель	Торф	1 м	III	Повторное
26	Супесок	-	-	III	Повторное
27	Суглинок	Садовая земля	0,7 м	II	Рабочее
28	Супесок	Торф	1 м	III	Повторное
29	Лёсс	-	-	II	Повторное
30	Лёсс	Чернозём	0,5 м	III	Повторное

Нормируемое сопротивление рабочего заземлителя для системы питания *TN-C-S* напряжением 380 В равно 4 Ом, повторного – 10 Ом. Если удельное сопротивление грунта $\rho > 100$ Ом·м, нормируемое сопротивление увеличивается в $\rho / 100$ раз, но не более чем в 10 раз.

Расчёт сопротивления заземления

Для расчёта заземления нужно знать удельное электрическое сопротивление грунта ρ , определяемое по таблице 1 или экспериментально.

Таблица 1. Удельное электрическое сопротивление грунтов ρ , Ом·м.

Вид грунта	Удельное электрическое сопротивление, Ом·м	
	Пределы колебаний	При влажности 10-20 %
Глина	8 – 70	40
Суглинок	40 – 150	100
Песок	400 – 700	700
Супесок	150 – 400	300
Торф	10 – 30	20
Чернозём	9 – 53	20
Лёсс (желтозём)	-	250
Мергель	-	150
Мергель глинистый	-	50
Садовая земля	-	40
Каменистый	500-800	-

Заземлитель состоит из стержней и соединительных полос. При расчёте сопротивлений растеканию тока стержней и полос нужно учитывать коэффициенты сезонности ψ_C и ψ_P (таблица 2).

Таблица 2. Коэффициенты сезонности ψ_C и ψ_P

Климатическая зона	Значения коэффициентов сезонности при влажности		
	повышенной	нормальной	малой
Вертикальный электрод (стержень) длиной до 3 м			
I	1,9	1,7	1,5
II	1,7	1,5	1,3
III	1,5	1,3	1,2
IV	1,3	1,1	1,0
Вертикальный электрод(стержень) длиной 4 – 5 м			
I	1,5	1,4	1,3
II	1,4	1,3	1,2
III	1,3	1,2	1,1
IV	1,2	1,1	1,0
Горизонтальный электрод (полоса) длиной до 50 м			
I	7,2	4,5	3,6
II	4,8	3,0	2,4
III	3,2	2,0	1,6
IV	2,2	1,4	1,2

Длина вертикальных электродов для ручной забивки до 3 м, для виброзабивки – до 5 м.

Сопротивление растеканию тока одиночного стержня R_C , Ом

$$R_C = \frac{\psi_C \cdot \rho}{2\pi L_C} \left(\ln \frac{2L_C}{d} + 0,5 \ln \frac{4T + L_C}{4T - L_C} \right),$$

где ψ_C – коэффициент сезонности для стержня, ρ – удельное сопротивление грунта, Ом·м; L_C – длина стержня, м; d – диаметр стержня из труб или приведенный диаметр стержня из уголка (0,95 полки), м; T – расстояние от поверхности земли до середины стержня, м.

$T = 0,5 L_C + t$, где t – заглубление, м.

Если заземлитель располагается в двуслойной земле, то необходимо учитывать толщину верхнего слоя H . В этом случае вместо ρ применяется эквивалентное удельное сопротивление грунта ρ_{Σ} , которое определяется с учётом удельного сопротивления верхнего слоя ρ_1 и нижнего слоя ρ_2 , длины стержня L_C , а также заглубления заземлителя t .

$$\rho_{\Sigma} = \frac{\rho_1 \cdot \rho_2 \cdot L_C}{\rho_1 (L_C + t - H) + \rho_2 (H - t)}, \text{ Ом}\cdot\text{м}.$$

Если заглубление заземлителя t больше, чем толщина верхнего слоя земли H , считаем что заземлитель весь лежит в нижнем слое, $\rho_{\Sigma} = \rho_2$.

Предварительное количество n заземляющих стержней определяется исходя из нормированного «Правилами устройства электроустановок» (ПУЭ) значения сопротивления R_H , Ом, заземляющего устройства

$$n = R_C / R_H$$

Длина соединительной полосы L_{Π} при расположении стержней в ряд

$$L_{\Pi} = (n - 1) a; \text{ по контуру } L_{\Pi} = n a,$$

где a – расстояние между стержнями, м.

Сопротивление растеканию тока соединительной полосы R_{Π} , Ом

$$R_{\Pi} = \frac{\psi_{\Pi} \cdot \rho}{2\pi L_{\Pi}} \ln \frac{2L_{\Pi}^2}{b \cdot t},$$

где ψ_{Π} – коэффициент сезонности для полосы; ρ – удельное сопротивление грунта, Ом·м; L_{Π} – длина полосы, м; b – ширина полосы, м; t – заглубление (расстояние от поверхности земли до полосы), м.

Результирующее расчетное сопротивление заземлителя R_p , Ом

$$R_p = \frac{R_C R_{\Pi}}{R_C \eta_{\Pi} + R_{\Pi} \eta_C} \leq R_H,$$

где η_C – коэффициент использования вертикальных стержней (таблица 3), η_{Π} – коэффициент использования горизонтальных полос (таблица 4).

Таблица 3. Коэффициенты использования вертикальных стержней η_c

Число стержней	Отношение расстояния между стержнями к их длине a/L_c					
	1	2	3	1	2	3
	при размещении в ряд			при размещении по контуру		
2	0,85	0,91	0,94	-	-	-
4	0,73	0,83	0,89	0,69	0,78	0,85
6	0,65	0,77	0,85	0,61	0,73	0,8
10	0,59	0,74	0,81	0,55	0,68	0,76
20	0,48	0,67	0,76	0,47	0,63	0,71
40				0,41	0,58	0,66
60				0,39	0,55	0,64
100				0,36	0,52	0,62

Таблица 4. Коэффициенты использования горизонтальных полос $\eta_{п.}$

Отношение a / L_c	Число стержневых заземлителей							
	2	4	6	10	20	40	60	100
Стержни размещены в ряд								
1	0,85	0,77	0,72	0,62	0,42			
2	0,94	0,89	0,84	0,75	0,56			
3	0,96	0,92	0,88	0,82	0,68			
Стержни размещены по контуру								
1	-	0,45	0,4	0,34	0,27	0,22	0,2	0,19
2	-	0,55	0,48	0,4	0,32	0,29	0,26	0,23
3	-	0,7	0,64	0,56	0,45	0,39	0,36	0,33

Если результирующее расчётное сопротивление R_p больше или значительно меньше требуемого ПУЭ, можно уточнить количество стержней n , расстояния между ними, коэффициенты использования стержней η_c и полосы $\eta_{п.}$ и окончательно определить результирующее расчётное сопротивление заземляющего устройства R_p .

Расстояние от системы заземления до здания принимают $0,6 R_p$, м.

Таблица 5. Наименьшие размеры стальных заземляющих проводников

Наименование и форма	В зданиях	В наружных установках	В земле
Круглые диаметром, мм	5	6	10
Прямоугольные: сечение, мм ² толщина, мм	24	48	48
	3	4	4
Угловая сталь, толщина полок, мм	2	2,5	4
Водогазопроводные трубы, толщина стенки, мм	2,5	2,5	3,5

Пример № 1. Расчёт сопротивления рабочего заземления в однородном грунте

Произвести расчёт заземляющего устройства для системы *TN-C-S* напряжением 380 В. Грунт – суглинок. Климатическая зона II. Цех имеет в плане размеры 20 x 30 м. Нормируемое значение сопротивления $R_H = 4$ Ом.

Решение.

1 Разместим стержни по контуру цеха. Примем в качестве вертикальных заземлителей стальные трубы длиной $L_C = 3$ м с диаметром $d = 50$ мм (0,05 м). Глубина заложения стержней $t = 0,5$ м от поверхности земли. Соединение заземлителей произведём сваркой стальной полосой шириной $b = 40$ мм (0,04 м).

2 Удельное сопротивление суглинка при нормальной влажности примем $\rho = 100$ Ом·м. Коэффициент сезонности для стержня $\psi_C = 1,5$.

3 Сопротивление растеканию тока одиночного стержня

$$R_C = \frac{\psi_C \cdot \rho}{2\pi L_C} \left(\ln \frac{2L_C}{d} + 0,5 \ln \frac{4T + L_C}{4T - L_C} \right) = \frac{1,5 \cdot 100}{2\pi \cdot 3} \left(\ln \frac{2 \cdot 3}{0,05} + 0,5 \ln \frac{4 \cdot 2 + 3}{4 \cdot 2 - 3} \right) = 41,2 \text{ Ом.}$$

при расстоянии от центра стержня до поверхности

$$T = t + 0,5L_C = 0,5 + 0,5 \cdot 3 = 2 \text{ м.}$$

4 Предварительное количество вертикальных стержней

$$n = R_C / R_H = 41,2 / 4 = 10,3 \approx 10, \text{ где } R_H = 4 \text{ Ом по ПУЭ.}$$

5 Длина соединительной полосы по контуру цеха $L_{\Pi} = 2(20 + 30) = 100$. Расстояние между стержнями $a = L_{\Pi} / n = 100 / 10 = 10$ м. $a / L_C = 3,3$.

6 Коэффициент сезонности для полосы $\psi_{\Pi} = 3$.

7 Сопротивление растеканию тока соединительной полосы

$$R_{\Pi} = \frac{\psi_{\Pi} \cdot \rho}{2\pi L_{\Pi}} \ln \frac{2L_{\Pi}^2}{b \cdot t} = \frac{3 \cdot 100}{2\pi \cdot 100} \ln \frac{2 \cdot 100^2}{0,04 \cdot 0,5} = 6,6 \text{ Ом.}$$

8 По таблице 3 примем $\eta_C = 0,76$, по таблице 4 примем $\eta_{\Pi} = 0,56$.

9 Результирующее сопротивление заземляющего устройства

$$R_p = \frac{R_C R_{\Pi}}{R_C \eta_{\Pi} + R_{\Pi} m \eta_C} = \frac{41,2 \cdot 6,6}{41,2 \cdot 0,56 + 6,6 \cdot 10 \cdot 0,76} = 3,72 \leq R_H = 4 \text{ Ом.}$$

Располагаем 10 стержней по 4 вдоль длинной стороны, по 3 вдоль короткой.

Пример № 2. Расчёт повторного заземления в однородном грунте при вводе в объект

Произвести расчёт повторного заземляющего устройства на вводе в объект для системы *TN-C-S* напряжением 380 В. Грунт – супесок. Климатическая зона III. Нормируемое значение сопротивления $R_H = 10 \text{ Ом}$.

Решение.

1 Разместим стержни в ряд. Примем в качестве вертикальных заземлителей стальные трубы диаметром $d = 50 \text{ мм}$ (0,05 м), длиной $L_C = 4 \text{ м}$. Глубина заложения стержней $t = 0,5 \text{ м}$ от поверхности земли. Соединение заземлителей произведём сваркой стальной полосой шириной $b = 50 \text{ мм}$ (0,05 м).

2 Удельное сопротивление супеска при нормальной влажности примем $\rho = 300 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Так как удельное сопротивление грунта $\rho > 100$ требуемое нормируемое сопротивление увеличится в $300 / 100 = 3$ раза и составит $R'_H = 30 \text{ Ом}$. Коэффициента сезонности для стержня $\psi_C = 1,2$.

3 Сопротивление растеканию тока одиночного стержня

$$R_C = \frac{\psi_C \cdot \rho}{2\pi L_C} \left(\ln \frac{2L_C}{d} + 0,5 \ln \frac{4T + L_C}{4T - L_C} \right) = \frac{1,2 \cdot 300}{2\pi \cdot 4} \left(\ln \frac{2 \cdot 4}{0,05} + 0,5 \ln \frac{4 \cdot 2,5 + 4}{4 \cdot 2,5 - 4} \right) = 77,6 \text{ Ом.}$$

при расстоянии от центра стержня до поверхности

$$T = t + 0,5L_C = 0,5 + 0,5 \cdot 4 = 2,5 \text{ м.}$$

4 Предварительное количество вертикальных стержней

$$n = R_C / R'_H = 77,6 / 30 = 2,6 \approx 3, \text{ где } R'_H = 30 \text{ Ом (уточнённое значение).}$$

5 Примем расстояние между стержнями $a = 3 \cdot L_C = 12 \text{ м}$. $a / L_C = 3$.

Длина соединительной полосы $L_{\Pi} = (n - 1) a = (3 - 1) \cdot 12 = 24 \text{ м}$.

6 Коэффициент сезонности для полосы $\psi_{\Pi} = 2$.

7 Сопротивление растеканию тока соединительной полосы

$$R_{\Pi} = \frac{\psi_{\Pi} \cdot \rho}{2\pi L_{\Pi}} \ln \frac{2L_{\Pi}^2}{b \cdot t} = \frac{2 \cdot 300}{2\pi \cdot 24} \ln \frac{2 \cdot 24^2}{0,05 \cdot 0,5} = 43 \text{ Ом.}$$

8 По таблице 3 путём интерполяции примем $\eta_C = 0,915$, по таблице 4 путём интерполяции примем $\eta_{\Pi} = 0,94$.

9 Результирующее сопротивление заземляющего устройства

$$R_p = \frac{R_C R_{\Pi}}{R_C \eta_{\Pi} + R_{\Pi} m \eta_C} = \frac{77,6 \cdot 43}{77,6 \cdot 0,94 + 43 \cdot 3 \cdot 0,915} = 17,5 \leq R'_H = 30 \text{ Ом.}$$

Расчётное сопротивление намного меньше нормируемого.

Рекомендуем уменьшить количество стержней до 2 и пересчитать.

Пример № 3. Расчёт повторного заземления при двухслойном грунте

Произвести расчёт повторного заземляющего устройства на вводе в здание для системы $TN-C-S$ напряжением 380 В. Верхний слой грунта толщиной $H = 1$ м – почва, нижний – суглинок. Климатическая зона III. Нормируемое значение сопротивления $R_H = 10$ Ом.

Решение.

1 Разместим стержни в ряд. Примем в качестве вертикальных заземлителей стальные прутки диаметром 12 мм, ($d = 0,012$ м) длиной $L_C = 2$ м. Глубина заложения стержней $t = 0,7$ м от поверхности земли. Соединение заземлителей произведём сваркой стальной полосой шириной $b = 12$ мм (0,012 м).

2 Удельное сопротивление верхнего слоя грунта (почвы) при нормальной влажности примем $\rho_1 = 200$ Ом·м. Удельное сопротивление нижнего слоя грунта – суглинок – примем $\rho_2 = 100$ Ом·м. Эквивалентное удельное сопротивление грунта составит

$$\rho_{\Sigma} = \frac{\rho_1 \cdot \rho_2 \cdot L_C}{\rho_1 (L_C + t - H) + \rho_2 (H - t)} = \frac{200 \cdot 100 \cdot 2}{200(2 + 0,7 - 1) + 100(1 - 0,7)} = 108 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

Коэффициента сезонности для стержня $\psi_C = 1,3$.

3 Сопротивление растеканию тока одиночного стержня

$$R_C = \frac{\psi_C \cdot \rho_{\Sigma}}{2\pi L_C} \left(\ln \frac{2L_C}{d} + 0,5 \ln \frac{4T + L_C}{4T - L_C} \right) = \frac{1,3 \cdot 108}{2\pi \cdot 2} \left(\ln \frac{2 \cdot 2}{0,012} + 0,5 \ln \frac{4 \cdot 1,7 + 2}{4 \cdot 1,7 - 2} \right) = 68 \text{ Ом}.$$

при расстоянии от центра стержня до поверхности

$$T = t + 0,5L_C = 0,7 + 0,5 \cdot 2 = 1,7 \text{ м}.$$

4 Предварительное количество вертикальных стержней

$$n = R_C / R_H = 73,4 / 10 = 7,3 \approx 7, \text{ где } R_H = 10 \text{ Ом по ПУЭ}.$$

5 Примем расстояние между стержнями $a = L_C = 2$ м. $a / L_C = 1$.

Длина соединительной полосы $L_{\Pi} = (n - 1) a = (7 - 1) \cdot 2 = 12$ м.

6 Коэффициент сезонности для полосы $\psi_{\Pi} = 2$.

7 Сопротивление растеканию тока соединительной полосы

$$R_{\Pi} = \frac{\psi_{\Pi} \cdot \rho_{\Sigma}}{2\pi L_{\Pi}} \ln \frac{2L_{\Pi}^2}{b \cdot t} = \frac{2 \cdot 108}{2\pi \cdot 12} \ln \frac{2 \cdot 12^2}{0,012 \cdot 0,7} = 29 \text{ Ом}.$$

8 По таблице 3 примем $\eta_C = 0,65$, по таблице 4 примем $\eta_{\Pi} = 0,72$.

9 Рассчитаем значение результирующего сопротивления

$$R_p = \frac{R_C R_{\Pi}}{R_C \eta_{\Pi} + R_{\Pi} \eta_C} = \frac{68 \cdot 29}{68 \cdot 0,72 + 29 \cdot 0,65} = 10,9 \text{ Ом}.$$

10 Уточняем значение нормируемого сопротивления т.к. $\rho > 100$ Ом·м

$$R'_H = R_H \cdot \rho_{\Sigma} / 100 = 10 \cdot 108 / 100 = 10,8 \text{ Ом} \approx R_p = 10,9.$$

С небольшой погрешностью считаем расчёт законченным. $n = 7$.

Пример № 4. Расчёт рабочего заземления при двухслойном грунте

Произвести расчёт рабочего заземляющего устройства для системы TN-C-S напряжением 380 В. Верхний слой грунта толщиной $H = 1$ м – чернозём, нижний – глина. Климатическая зона III. Нормируемое значение сопротивления $R_H = 4$ Ом.

Решение.

1 Разместим стержни по контуру. Примем в качестве вертикальных заземлителей стальные прутки диаметром 20 мм, ($d = 0,02$ м) длиной $L_C = 3$ м. Глубина заложения стержней $t = 0,5$ м от поверхности земли. Соединение заземлителей произведём сваркой стальной полосой шириной $b = 20$ мм (0,02 м).

2 Удельное сопротивление верхнего слоя грунта (чернозёма) при нормальной влажности примем $\rho_1 = 20$ Ом·м. Удельное сопротивление нижнего слоя грунта – глины – примем $\rho_2 = 40$ Ом·м. Эквивалентное удельное сопротивление составит

$$\rho_{\Sigma} = \frac{\rho_1 \cdot \rho_2 \cdot L_C}{\rho_1 (L_C + t - H) + \rho_2 (H - t)} = \frac{20 \cdot 40 \cdot 3}{20(3 + 0,5 - 1) + 40(1 - 0,5)} = 34,3 \text{ Ом·м.}$$

Коэффициент сезонности для стержня $\psi_C = 1,3$.

3 Сопротивление растеканию тока одиночного стержня

$$R_C = \frac{\psi_C \cdot \rho_{\Sigma}}{2\pi L_C} \left(\ln \frac{2L_C}{d} + 0,5 \ln \frac{4T + L_C}{4T - L_C} \right) = \frac{1,3 \cdot 34,3}{2\pi \cdot 3} \left(\ln \frac{2 \cdot 3}{0,02} + 0,5 \ln \frac{4 \cdot 2 + 3}{4 \cdot 2 - 3} \right) = 14,43 \text{ Ом.}$$

при расстоянии от центра стержня до поверхности

$$T = t + 0,5L_C = 0,5 + 0,5 \cdot 3 = 2 \text{ м.}$$

4 Предварительное количество вертикальных стержней

$$n = R_C / R_H = 14,43 / 4 = 3,6 \approx 4, \text{ где } R_H = 4 \text{ Ом по ПУЭ.}$$

5 Примем расстояние между стержнями $a = L_C = 3$ м. $a / L_C = 1$.

Длина соединительной полосы $L_{\Pi} = n \cdot a = 4 \cdot 3 = 12$ м.

6 Коэффициент сезонности для соединительной полосы $\psi_{\Pi} = 2$.

7 Сопротивление растеканию тока соединительной полосы

$$R_{\Pi} = \frac{\psi_{\Pi} \cdot \rho_{\Sigma}}{2\pi L_{\Pi}} \ln \frac{2L_{\Pi}^2}{b \cdot t} = \frac{2 \cdot 34,3}{2\pi \cdot 12} \ln \frac{2 \cdot 12^2}{0,02 \cdot 0,5} = 9,35 \text{ Ом.}$$

8 По таблице 3 примем $\eta_C = 0,69$, по таблице 4 примем $\eta_{\Pi} = 0,45$.

9 Рассчитаем значение результирующего сопротивления

$$R_p = \frac{R_C R_{\Pi}}{R_C \eta_{\Pi} + R_{\Pi} n \eta_C} = \frac{14,43 \cdot 9,35}{14,43 \cdot 0,45 + 9,35 \cdot 4 \cdot 0,69} = 4,18 \text{ Ом.}$$

Расчётное сопротивление превышает нормируемое. Рекомендуем увеличить расстояние между стержнями до $a = 3,5$ м и повторить расчёт.