

## РАЗДЕЛ ТРЕТИЙ

### Расчет заземляющих устройств

#### 3.1. Удельное электрическое сопротивление земли

Все вещества по своим электропроводным свойствам разделяются на проводники ( $\rho \leq 10^{-5}$  Ом · м), изоляторы ( $\rho \geq 10^8$  Ом · м) и полупроводники ( $10^{-5}$  Ом · м  $< \rho < 10^8$  Ом · м). Горные породы, различные структуры земли и естественные водные среды, как правило, относятся к полупроводникам.

Удельное электрическое сопротивление различных горных пород (табл. 3.1), измеренное при температуре 15—30°C и при промышленной частоте 50—60 Гц, приведено в табл. 3.2. Значения удельного сопротивления для отдельного минерала в ряде случаев отличаются на несколько порядков. Эти изменения обусловлены влиянием примесей и различной структурой минеральных зерен, на которых проводились измерения. Микроскопические трещины и окисления поверхности в пределах индивидуальных зерен вызывают значительные изменения значений измеряемых сопротивлений.

В табл. 3.3 приведены удельные сопротивления водосодержащих пород. Эти данные также относятся к температуре порядка 20°C и к промышленной частоте. Электропроводность породы, если она не содержит высоких концентраций проводящих минералов, при обычных температурах определяется количеством присутствующей в ней воды, минерализацией воды и характером распределения воды в породе.

Таблица 3.1. Классификация наиболее распространенных обломочных и глинистых пород

Структура породы	Размеры зерен, мм	Несцементированные породы			Сцементированные породы
		Несвязные		Связные	
		Неокатанные	Окатанные		
Крупнообломочная	От 500 до 1000	Глыбы	Валуны	—	Конгломерат
	100—40	Дресва	Галька	—	»
	40—2	Щебень	Гравий	—	»
Среднеобломочная	2—0,05	Песок различной крупности		—	Песчаник
Мелкообломочная, пылеватая	0,05—0,005	—	—	Супесь, лёсс, алевролит	Алевролит
Тонкая	0,005	—	—	Суглинок, глина	Аргиллит, глинистый сланец

Таблица 3.2. Удельное электрическое сопротивление горных пород  $\rho$

Горная порода	$\rho, \text{ Ом} \cdot \text{ м}$										
	$10^{-4}$	$10^{-3}$	$10^{-2}$	$10^{-1}$	$10^0$	$10^1$	$10^2$	$10^3$	$10^4$	$10^5$	$10^6$
Графит	■	■									
Магнетит		■	■								
Сульфиды			■	■							
Уголь антрацит				■	■						
Вода морская, подземная					■	■					
Песок с соленой водой						■	■				
Песчаник рыхлый							■	■			
Глина								■	■		
Доломит									■	■	
Вода речная										■	■
Известняк рыхлый, ракушечник											■
Мергель											■
Песок с пресной водой											■
Уголь бурый											■
Уголь каменный											■
Песчаник плотный											■
Сланец глинистый											■
Известняк плотный											■
Вода дождевая											■
Гнейс											■
Базальт											■
Габбро											■
Гранит											■
Диабаз											■
Каменная соль											■

Сопротивление  $\rho$  водосодержащих пород можно сопоставить с содержанием воды, используя эмпирическую формулу

$$\rho = a \rho_w \Phi^{-m} S^{-n}, \quad (3.1)$$

Таблица 3.3. Пределы электрического удельного сопротивления водосодержащих пород  $\rho$

Геологический возраст пород	Удельное сопротивление $\rho, \text{ Ом} \cdot \text{ м}$				
	Морской песок, глинистый сланец	Континентальные пески, песчаник	Вулканические породы (базальты, туфы)	Граниты, габбро	Известняки, доломиты, ангидриты, соль
Третичный, четвертичный	1—10	15—20	$10—2 \cdot 10^2$	$5 \cdot 10^2—2 \cdot 10^3$	$50—5 \cdot 10^3$
Мезозойский	5—20	$25—10^2$	$20—5 \cdot 10^2$	$5 \cdot 10^2—2 \cdot 10^3$	$10^2—10^4$
Карбоновый	10—40	$50—3 \cdot 10^2$	$50—10^3$	$10^3—5 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^2—10^5$
Докарбоновый палеозой	40—200	$10^2—5 \cdot 10^2$	$10^2—2 \cdot 10^3$	$10^3—5 \cdot 10^3$	$10^4—10^5$
Докембрийский	$10^2—2 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^2—5 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^2—5 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^3—20 \cdot 10^3$	$10^4—10^5$

где  $\rho_w$  — удельное электрическое сопротивление содержащейся в породе воды;

$\Phi$  — пористость;

$S$  — доля порового объема, заполненного водой;

$a, m, n$  — эмпирические параметры.

Параметр  $m$  принимает значения от 1,3 для рыхлого песка до 2,5 для плотно сцементированной зернистой породы. В табл. 3.4 приведены значения  $\Phi, a$  и  $m$ . Значение  $n$  в уравнении очень близко по значению к 20 для случая, когда вода заполняет более 30% порового пространства. Для пород, у которых вода не смачивает зерна минералов, параметр  $n$  может достигать 10.

Значения удельного электрического сопротивления грунтовых вод приведены в табл. 3.5.

Таблица 3.4. Значения пористости  $\Phi$ , параметров  $a$  и  $m$  для водонасыщенных пород

Формации водонасыщенных пород	$\Phi$	$a$	$m$
Песок (девон, мел, эоцен)	0,15—0,367	0,62	2,15
Песчаник (юра)	0,14—0,23	0,62	2,1
Чистый миоценовый песчаник	0,11—0,26	0,78	1,92
Чистый меловой песчаник	0,08—0,25	0,47	2,23
Чистый ордовикский песчаник	0,07—0,15	1,3	1,71
Сланцевый песчаник (эоцен)	0,09—0,22	1,8	1,64
Сланцевый песчаник (олигоцен)	0,07—0,26	1,7	1,65
Сланцевый песчаник (мел)	0,07—0,31	1,7	1,8
Оолитовый известняк (мел)	0,07—0,19	2,3	1,64
Оолитовый известняк (юра)	0,09—0,26	0,73	2,1
Кремнистый известняк (девон)	0,07—0,3	1,2	1,88
Известняк (мел)	0,08—0,3	2,2	1,65

Таблица 3.5. Удельное электрическое сопротивление грунтовых вод

Образец породы	Сопротивление при 20°C Ом · м	
	Пределы изменения	Среднее значение
Изверженные породы	3—40	7,6
Современные и плейстоценовые континентальные осадки	1—27	3,9
Третичные осадки	0,7—3,5	1,4
Мезозойские осадочные породы	0,31—47	2,5
Палеозойские осадочные породы	0,29—7,1	0,93
Хлоридные воды нефтяных месторождений	0,049—0,95	0,16
Сульфатные воды нефтяных месторождений	0,43—5	1,2
Бикарбонатные воды нефтяных месторождений	0,24—10	0,98

Таблица 3.6. Температурная зависимость удельного электрического сопротивления породы вблизи 0°C

Горная порода	Пористость, $\Phi$	$\rho(T = -12^\circ\text{C})$ $\rho(T = 20^\circ\text{C})$	Горная порода	Пористость, $\Phi$	$\rho(T = -12^\circ\text{C})$ $\rho(T = 20^\circ\text{C})$
	0,068	80	Гранит	0,034	430
Конгломерат	0,018	87	Красный порфир	0,122	343
	0,21	73		0,1	100
Ортокварцит	0,038	76	Сиенит	0,049	27
	0,041	175	Нефелиновый сиенит	0,008	62
	0,087	375			
Глинистый сланец	0,101	255	Мариуполит	0,008	47
Известняк тонкозернистый	0,22	17	Пироксенит	0	32
			Базальт	0,064	21
Известняк	0,011	4	Метакварцит	0,098	10
	0,073	178		0,071	40

Таблица 3.7. Рекомендуемые расчетные значения удельного электрического сопротивления верхнего слоя земли (мощностью не более 50 м)

Слой земли	Сопротивление земли, Ом · м
Песок (при температуре выше 0°C):	
сильноувлаженный грунтовыми водами	10—60
умеренно увлажненный	60—130
влажный	130—400
слегка влажный	400—1500
сухой	1500—4200
Суглинок:	
сильно увлажненный грунтовыми водами (при температуре выше 0°C)	10—60
промерзший слой (при температуре —5°C)	60—190
Глина (при температуре выше 0°C)	20—60
Торф:	
при температуре около 0°C	40—50
при температуре выше 0°C	10—40
Солончаковые почвы (при температуре выше 0°C)	15—25
Щебень:	
сухой	Не менее 5000
мокрый	Не менее 3000
Дресья (при температуре выше 0°C)	5500
Гранитное основание (при температуре выше 0°C)	22 500

Удельное электрическое сопротивление породы зависит также от температуры. Для водосодержащих пород влияние температуры на сопротивление породы такое же, как и влияние температуры на электросопротивление находящейся в породе воды в интервале температур между точками ее замерзания и кипения. Изменения сопротивления, вызванные температурными изменениями в растворе электролита, приближенно выражаются формулой

$$\rho_T = \rho_{20} e^{-0,022(T-20)}, \quad (3.2)$$

где  $\rho_T$ ,  $\rho_{20}$  — сопротивления при температурах  $T$  и 20°C соответственно.

Таблица 3.6 демонстрирует резкое возрастание удельного электрического сопротивления горных пород при замерзании поровой влаги.

В табл. 3.7 приведены рекомендуемые для использования в проектных расчетах значения удельного электрического сопротивления верхнего слоя земли мощностью до 50 м.

### 3.2. Сопротивление одиночных заземлителей

Сопротивление растеканию одиночного заземлителя определяется по формуле

$$R = \frac{\rho}{\pi\Gamma} C, \quad (3.3)$$

где  $\Gamma$  — главный (наибольший) линейный размер заземлителя, м;  
 $C$  — безразмерный коэффициент, зависящий от формы заземлителя и условий его заглубления.

Главный линейный размер соответственно для сферы или полусферы равен:

$$\Gamma = D,$$

где  $D$  — диаметр сферы или полусферы.

Для протяженного электрода

$$\Gamma = l,$$

где  $l$  — длина протяженного электрода.

Значения коэффициента  $C$  для наиболее характерных условий заглубления одиночных электродов приведены в табл. 3.8.

### 3.3. Сопротивление сложных заземлителей

Сопротивление растеканию сложных заземлителей (горизонтальных секток и вертикальных электродов), а также взаимное сопротивление между горизонтальной сеткой и вертикальными электродами определяются выражением

$$R = \frac{\rho}{\pi\Gamma} C_{ij}, \quad (3.4)$$


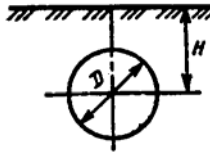
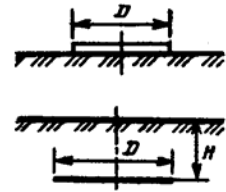
где  $\Gamma$  — расчетный линейный размер сложного заземлителя;  
 $C_{ij}$  — безразмерный коэффициент, зависящий от конструктивных параметров сложного заземлителя.

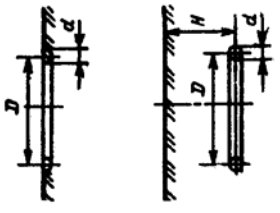
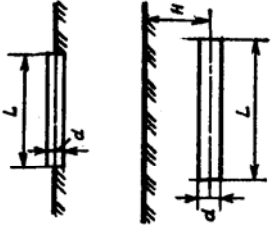
Расчетный линейный размер горизонтальной сетки равен:

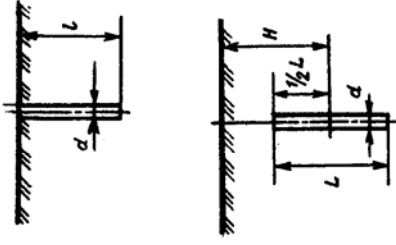
$$\Gamma = L,$$

где  $L$  — суммарная длина всех горизонтальных проводников сетки.

Таблица 3.8. Значение коэффициента  $C$  для расчета одиночных заземлителей

Заземлитель	Условия заложения	Коэффициент $C$	Условия
1. Полусфера ( $\Gamma = D$ )		1	—
2. Сфера ( $\Gamma = D$ )		$\frac{1}{2} \left( 1 + \frac{1}{4} \frac{D}{H} \right)$	$H > \frac{D}{2}$
3. Круглая пластина ( $\Gamma = D$ )		$\frac{\pi}{2} \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{\pi}{2} \arcsin \frac{D}{\sqrt{16H^2 + D^2}} \right)$	$H > \frac{D}{2}$

Землятель	Условия заложения	Коэффициент C	Условия
4. Кольцо ( $\Gamma = D$ )		$\frac{1}{\pi} \ln \frac{8D}{d}$ $\frac{1}{\pi} \ln \frac{8D}{d} \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{\ln(\pi D / 2H)}{\ln(8D/d)} \right];$ $\frac{1}{\pi} \ln \frac{8D}{d} \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{\pi D / 4H}{\ln(8D/d)} \right]$	$D \gg d^*$ $D \gg d,$ $H \ll D,$ $D \gg d,$ $H \gg D$
5. Горизонтальный стержень ( $\Gamma = L$ )		$\ln \frac{2L}{d}$ $\frac{1}{2} \left( 1 + \frac{\ln \frac{L}{2H}}{\ln \frac{L}{d}} \right) \ln \frac{2L}{d};$ $\frac{1}{2} \left( 1 + \frac{\ln \frac{L}{4H}}{\ln^2 \frac{L}{d}} \right) \ln \frac{2L}{d}$	$L \gg d^*$ $L \gg d,$ $H \ll L,$ $L \gg d,$ $H \gg L$

Землятель	Условия заложения	Коэффициент C	Условия
6. Вертикальный стержень ( $\Gamma = l$ )		$\frac{1}{2} \ln \frac{4l}{d}$ $\frac{1}{2} \left( \ln \frac{4l}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4H+1}{4H-1} \right)$	$l \gg d$ $l \gg d,$ $H > l$

\* Для плоской ленты шириной  $b$  следует принимать  $d = b/2$ .

Расчетный линейный размер совокупности вертикальных электродов

$$\Gamma = nl,$$

где  $l$  — длина каждого вертикального электрода;

$n$  — число вертикальных электродов в рассматриваемой совокупности.

Значения коэффициента  $C$  для горизонтальной сетки, совокупности вертикальных электродов и взаимного сопротивления между горизонтальной сеткой и рассматриваемой совокупностью вертикальных электродов даны в табл. 3.9.

В общем случае сопротивление сложного заземлителя, состоящего из горизонтальной сетки и вертикальных электродов, определяется выражением

$$R = \frac{\rho}{\pi L} \frac{\lambda C_{11} C_{22} - C_{12}^2}{C_1 + \lambda C_{22} - 2C_{12}}, \quad (3.5)$$

где  $\lambda = L/nl$ .

### 3.4. Расчет заземляющих и зануляющих проводников

Собственное сопротивление заземляющего проводника в диапазоне частот до  $5 \cdot 10^3$  Гц с погрешностью, не превышающей 5%, Ом/км,

$$Z = r_a + j\omega \left( L - \frac{\mu}{2} 10^{-4} \right), \quad (3.6)$$

где  $r_a$  — активное сопротивление проводника, Ом/км; в тех случаях, когда в качестве токопроводящих элементов проводника используется медь или алюминий, активное сопротивление принимается равным сопротивлению проводника постоянному току;

$\omega$  — круговая частота,  $\text{с}^{-1}$ ;

$\mu$  — магнитная проницаемость проводника (для медных и алюминиевых проводников  $\mu = 1$ );

$L$  — коэффициент самоиндукции проводника, Гн/км.

Коэффициент самоиндукции бесконечно длинного проводника, расположенного на высоте  $h$  над поверхностью однородной земли, рассчитывается по формуле [2]

$$L = \left( 2 \ln \frac{2}{\gamma |k| R} + 1 - j \frac{\pi}{2} - \frac{8jkh}{3} \right) 10^{-4}, \quad (3.7)$$

где  $k$  — физический параметр, характеризующий электромагнитные свойства системы ( $k^2 = -4\pi j\omega\sigma$ ); величина  $3/k$  определяет глубину зоны растекания обратного тока в земле, см;

Таблица 3.9. Значение коэффициента  $C$  для расчета сложных заземлителей

Заземлитель	Конструктивные особенности	Коэффициент $C_{ij}$	Условия
Горизонтальная сетка ( $\Gamma = L$ )	Для проводников сетки, заложенных на глубине $H$ , $d' = \sqrt{Hd}$ ,  для проводников сетки, проложенных на поверхности земли, $d' = d$	$C_{11} = \ln \frac{4L}{d'} + k_1 \frac{L}{\sqrt{S}} - k_2$	$L \gg d'$
Вертикальные электроды ( $\Gamma = nl$ )	—	$C_{22} = \frac{1}{2} \left[ \ln \frac{8l}{d} - 1 + \frac{2k_1 l}{\sqrt{S}} (\sqrt{n-1})^2 \right]$	$l \gg d$
Взаимное сопротивление между горизонтальной сеткой и вертикальными электродами ( $\Gamma = L$ )	—	$C_{12} = \ln \frac{4L}{l} + k_1 \frac{L}{\sqrt{S}} - k_2 + 1$	Вертикальные электроды размещены в пределах площади, ограниченной горизонтальной сеткой

- Примечания: 1. Коэффициенты  $k_1, k_2$  [находятся по зависимостям  $k_1(\epsilon), k_2(\epsilon)$ ] представлены на рис. 3.1, 3.2.  
 2.  $L$  — суммарная длина всех горизонтальных проводников сетки;  $d$  — диаметр проводника сетки.  
 3.  $l$  — длина каждого электрода;  $d$  — диаметр электрода;  $n$  — число электродов, размещенных на рассматриваемой площади.



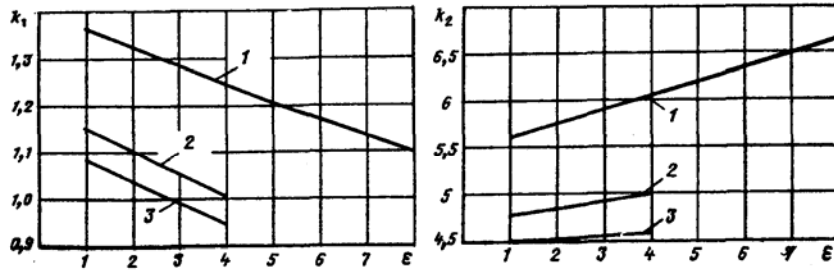


Рис. 3.1. Зависимость  $k_1(\epsilon)$ :

$$1 - H = 0; \quad 2 - H = 0,1\sqrt{S}; \\ 3 - H = 0,6\sqrt{S}$$

Рис. 3.2. Зависимость  $k_2(\epsilon)$ :

$$1 - H = 0; \quad 2 - H = 0,1\sqrt{S}; \\ 3 - H = 0,6\sqrt{S}$$

$\sigma$  — удельная проводимость земли в единицах  $\mu_0$  системы СГС; в электромагнитной системе СГС единица удельной проводимости имеет размерность  $\text{с}/\text{см}^2$  ( $1 \text{ с}/\text{см}^2 = 10^{11} \text{ См}/\text{м}$ );

$\gamma$  — постоянная Эйлера ( $\gamma = 1,781$ );

$R$  — расчетный радиус провода, см;

$h$  — высота провода над поверхностью земли, см.

В дальнейшем параметры заземляющих проводников определены для промышленной частоты 50 Гц. В этом случае при расчете самоиндукции проводников последним членом выражения (3.7) можно пренебречь ввиду его малости, и (3.6) запишется в окончательном виде:

$$Z_k = r_k + 0,05 - j0,144 \left[ 1,42 + \lg(R\sqrt{\sigma}) \right]. \quad (3.8)$$

Значения собственных сопротивлений проводников приведены в табл. 3.10. Данные относятся к сопротивлению земли  $\rho = 100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ .

Входящие в табл. 3.10 величины связаны соотношением

$$Z_0 = r_0 + jx_0 = |Z_0| e^{j\varphi_0}. \quad (3.9)$$

Взаимное сопротивление двух заземляющих проводников

$$Z_M = j\omega M, \quad (3.10)$$

где  $M$  — коэффициент взаимной индукции проводников, Гн/км.

Таблица 3.10. Сопротивление проводников

Марка провода	$q, \text{ мм}^2$	$2R, \text{ см}$	$r_0, \text{ Ом}/\text{км}$	$x_0, \text{ Ом}/\text{км}$	$ Z_0 , \text{ Ом}/\text{км}$	$\varphi_0, \text{ град}$
МФ100	100	1,23	0,229	0,762	0,795	73°15'
МФ85	85	1,13	0,26	0,767	0,81	71°15'
МФ85	72	1,13	0,297	0,767	0,823	68°50'
М 120	113	1,4	0,208	0,753	0,782	74°35'
М 95	90	1,25	0,25	9,761	0,802	71°50'
АС 185	105	1,85	0,22	0,726	0,759	73°10'
АС 120	66	1,52	0,32	0,748	0,813	66°50'
АС 95	54	1,35	0,38	0,756	0,845	63°20'
АС 70	39	1,14	0,51	0,767	0,92	56°25'
ПБСМ1 95	32	1,25	0,613	0,761	0,978	51°05'
ПМСМ2 95	25	1,25	0,754	0,761	1,07	45°15'
ПБСМ1 70	25	1,1	0,781	0,769	1,095	44°35'
А 185	105	1,75	0,22	0,746	0,772	73°25'
А 150	85	1,58	0,26	0,753	0,79	70°45'
А 120	66	1,4	0,32	0,769	0,817	66°55'

Примечание:  $q$  — сечение проводника в медном эквиваленте;  $R$  — радиус проводника.

Коэффициент взаимной индукции между двумя бесконечно длинными проводниками, расположенными над поверхностью земли, рассчитывается по формуле

$$M = \left[ 2 \ln \frac{2}{\gamma |k| a} + 1 - j \frac{\pi}{2} - \frac{4jk}{3} (h_1 + h_2) \right] 10^{-4}, \quad (3.11)$$

где  $k, \gamma$  имеют тот же смысл, что и в формуле (3.7);

$a$  — расстояние между проводниками, см;

$h_1, h_2$  — высоты расположения проводников над поверхностью земли, см.

При расчете коэффициентов взаимной индукции между заземляющими проводниками последним членом выражения (3.11) ввиду его малости можно пренебречь. Тогда формула (3.10) запишется в виде

$$Z_M = 0,05 - j0,144 \left[ 1,53 + \lg(a\sqrt{\sigma}) \right]. \quad (3.12)$$

Для среднего значения сопротивления земли, равного 100 Ом · м, взаимное сопротивление между заземляющими проводниками ( $a = 130$  см) составляет  $0,34 e^{-j 81^\circ}$  Ом/км. При изменении сопротивления земли в 10 раз модуль взаимного сопротивления меняется всего лишь на  $\pm 20\%$ , а угол — на  $\pm 2^\circ$ . На этом основании во всех дальнейших расчетах, кроме особо оговоренных случаев, взаимные сопротивления относятся к  $\rho = 100$  Ом · м.

Эквивалентное сопротивление пучка проводников может выражаться через собственные и взаимные сопротивления отдельных проводников, образующих пучок. Эквивалентное сопротивление двухпроводной системы, состоящей из двух заземляющих проводников, рассчитывается по формуле

$$Z = \frac{Z_1 Z_2 - Z_{12}^2}{Z_1 + Z_2 - 2Z_{12}}, \quad (3.13)$$

где  $Z_1$  и  $Z_2$  — сопротивления первого и второго заземляющего проводника соответственно;

$Z_{12}$  — взаимное сопротивление между проводниками.

Токораспределение между первым и вторым проводниками определяется выражением

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{Z_2 - Z_{12}}{Z_1 - Z_{12}}, \quad (3.14)$$

где  $I_1$  и  $I_2$  — токи первого и второго заземляющих проводников.

При большем числе проводников задача определения эквивалентного сопротивления может быть решена последовательной заменой каждых двух проводников эквивалентным. Этот способ даст приемлемую точность при симметричном расположении однородных проводников, образующих систему. Обычно им пользуются при замене рельсов нескольких путей одним эквивалентным рельсом.

**Сопротивление рельсов** (массивных стальных проводников). Эквивалентное сопротивление двух рельсов  $Z_{2p}$  определяется по формуле

$$Z_{2p} = \frac{Z'_p Z''_p - Z_{pa}^2}{Z'_p + Z''_p - 2Z_{pa}}, \quad (3.15)$$

где  $Z'_p$  и  $Z''_p$  — сопротивления первого и второго рельса соответственно;

$Z_{pa}$  — взаимное сопротивление между рельсами.

Взаимное сопротивление  $Z_{pa}$  можно определить по (3.12), в которой  $a = a_p$  означает расстояние между рельсами. Если  $Z'_p = Z''_p = Z_p$ , то

$$Z_{p1} = \frac{r_{pa}}{2} + 0,05 - j0,144 \left[ 1,53 - 5,2 \frac{r_{pa}}{2} + \lg \left( \sqrt{Ra_p} \sqrt{\sigma} \right) \right]. \quad (3.16)$$

Эквивалентное сопротивление рельсов  $n$  путей

$$Z_{pn} = \frac{1}{2^{n-1}} (Z_{p1} + Z_{a1}) + \sum_{i=2}^{n-1} \frac{1}{2^{n-i}} Z_{ai}, \quad (3.17)$$

где  $Z_{a1}$  — взаимное сопротивление между рельсами первого и второго путей;

$Z_{ai}$  — взаимное сопротивление между эквивалентным рельсом предыдущих путей и рельсами  $i$ -го пути.

Эквивалентное сопротивление четырех рельсов двухпутного участка

$$Z_{p2} = \frac{r_{pa}}{4} + 0,05 - j0,144 \left[ 1,53 - 5,2 \frac{r_{pa}}{4} + \lg \left( \sqrt[3]{Ra_p a_M^2} \times \sqrt{\sigma} \right) \right], \quad (3.18)$$

где  $a_M$  — ширина междупутья.

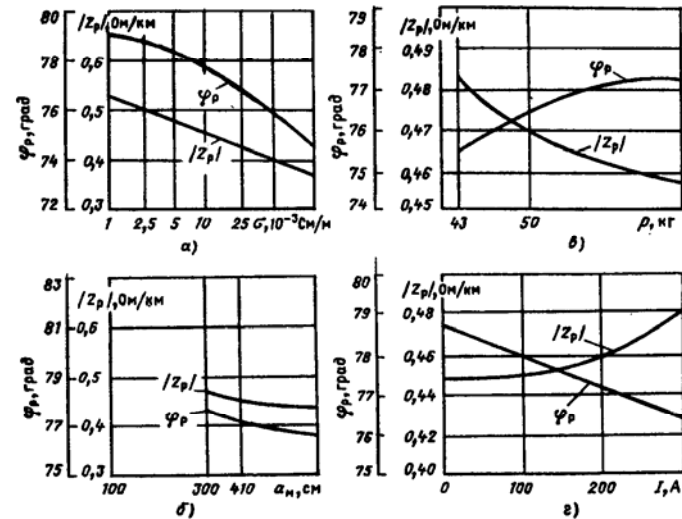


Рис. 3.3. Зависимость сопротивлений рельсов двухпутного участка  $Z_p$  от проводимости земли  $\sigma$  (а), ширины междупутья  $a_M$  (б), погонного веса рельсов  $P$  (в) тока в рельсе  $I_p$  (г)

В реальном диапазоне изменения проводимости земли ( $5 \cdot 10^{-3}$  —  $30 \cdot 10^{-3}$  См/м) модуль полного сопротивления рельсов отклоняется от среднего значения 0,45, соответствующего  $\sigma = 10 \cdot 10^{-3}$  См/м, на  $\pm 5\%$ , а максимальное отклонение угла  $\varphi_p \approx \pm 30'$ .

Возможное изменение ширины междупутья (360—500 см) не оказывает заметного влияния на эквивалентное сопротивление рельсов двухпутного участка. Изменение массы рельсов (43—65 кг/м) также не оказывает заметного влияния на сопротивления рельсов.

В диапазоне изменения тока рельса 0—300 А модуль сопротивления рельсов отклоняется от среднего значения на  $\pm 0,015$ , а максимальное отклонение угла  $\varphi_p \approx 1^\circ$ .

Принимая во внимание сравнительно слабое влияние возможного изменения проводимости земли, ширины междупутья, веса рельса и тока в нем на  $Z_{p2}$ , в расчетах сопротивлений рельсов параметры  $\sigma$ ,  $a_M$ ,  $P$ ,  $I_p$  принимались постоянными и равными:  $\sigma = 10 \cdot 10^{-3}$  См/м,  $a_M = 410$  см,  $P = 65$  кг/м,  $I_p = 200$  А (рис. 3.3).

### 3.5. Переходное сопротивление рельсы — земля

Заземляющее устройство промышленного предприятия в качестве одного из естественных заземлителей включает рельсовую сеть. Параметром, определяющим заземляющие свойства рельсов, является их переходное сопротивление. Рассмотрим электрическую структуру переходного сопротивления рельсы — земля, позволяющую определять распределение потенциала на поверхности шпала, балласта, земляного полотна и земли (распределение потенциала в ближней зоне).

Приняты следующие допущения. Прямолинейный однородный проводник бесконечной длины, обладающий продольным сопротивлением  $Z_p$ , имеет дискретный контакт с землей через последовательно соединенные сопротивления шпала  $R_{ш}$ , балласта  $R_б$  и земляного полотна  $R_п$ . Шпалы расположены равномерно с постоянным шагом  $B$ . Удельные электрические сопротивления шпал  $\rho_{ш}$ , балластной призмы  $\rho_б$  и земляного полотна  $\rho_п$  постоянны. Однородная земля характеризуется удельным электрическим сопротивлением  $\rho$ . Поверхность земли горизонтальна. Геометрические размеры шпал балластной призмы и земляного полотна неизменны. Учитывая, что горизонтальные поверхности шпал, балласта и земляного полотна покрыты металлической пылью и соевыми растворами, проводимости поверхностных слоев шпалы, балласта и земляного полотна приняты примерно на порядок выше средней проводимости их материалов. При определении сопротивления балласта и земляного полотна пренебрегают продольной составляющей градиента потенциала в балласте и в земляном полотне, не превышающей 0,01% градиента потенциала в вертикальном направлении (от рельсов к земле). Электрические параметры рассматриваемой системы рельсы — шпалы — балластная призма — земляное полотно — земля линейны во всем рассматриваемом диапазоне токов. В силу симметрии системы рассматривается процесс одностороннего растекания тока  $I$ , втекающего в рельсы в точке 0 (рис. 3.4).

В соответствии с принятыми допущениями модель переходного сопротивления системы рельсы — шпалы — балластная призма — земляное полотно — земля произвольного  $i$ -го контакта представлена на рис. 3.5.

Потенциал рельсов в месте  $i$ -го контакта, имеющего координату  $x$ ,

$$U_i(x) = \Delta U_{шi} + \Delta U_{бi} + \Delta U_{пi} + U_{зи}, \quad (3.19)$$

где  $\Delta U_{шi}$ ,  $\Delta U_{бi}$ ,  $\Delta U_{пi}$  — разности потенциалов между границами раздела соответственно рельсы — шпала и шпала — балласт, шпала — балласт и балласт — земляное полотно, балласт — земляное полотно и земляное полотно — земля;  
 $U_{зи}$  — потенциал земли на границе контакта земляное полотно — земля.

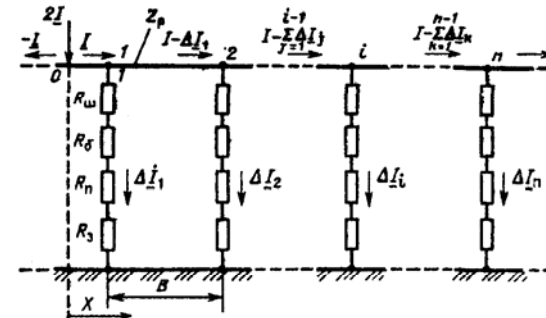


Рис. 3.4. Расчетная схема дискретной утечки тока с рельсов в землю

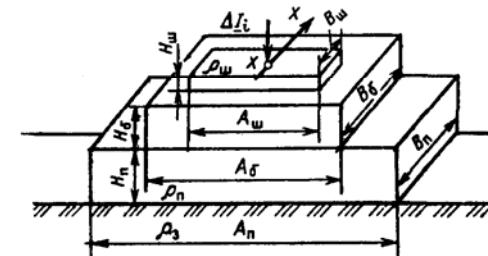


Рис. 3.5. Расчетная модель переходного сопротивления системы рельсы — шпалы — балластная призма — земляное полотно — земля произвольного  $i$ -го контакта расчетной схемы по рис. 3.4

Уравнение (3.19) записывается в виде

$$U_i(x) = \Delta I_i(x) (R_{ш} + R_6 + R_n + R_3), \quad (3.20)$$

где  $\Delta I$  — ток, стекающий с рельсов в землю через  $i$ -й контакт;  
 $R_{ш}, R_6, R_n, R_3$  — сопротивления шпалы, балласта, земляного полотна и земли на пути тока.

Сопротивления шпалы, балласта, земляного полотна и земли рассчитываются по формулам

$$R_{ш} = \rho_{ш} \frac{H_{ш}}{A_{ш} B_{ш}}; \quad (3.21)$$

$$R_6 = \rho_6 \frac{H_6}{A_6 B_6}; \quad (3.22)$$

$$R_n = \rho_n \frac{H_n}{A_n B_n}; \quad (3.23)$$

$$R_3 = \frac{1}{B_n} r_n'' \quad (3.24)$$

где  $H_{ш}, H_6, H_n$  — толщина шпалы, высота балласта и земляного полотна соответственно, м;

$A_{ш}, A_6, A_n$  — длина шпалы, средняя ширина балласта и земляного полотна соответственно, м;

$B_{ш}, B_6, B_n$  — средняя ширина шпалы, длина участка балласта и земляного полотна, соответствующие  $i$ -му контакту, м.

Для шпал, применяемых на магистральных дорогах СНГ ( $H_{ш} = 0,175$  м,  $A = 2,7$  м,  $B = 0,25$  м),

$$R_{ш} = 0,26 \rho_{ш}. \quad (3.25)$$

Для средних размеров балластной призмы ( $H_6 = 0,45$  м,  $A_6 = 3,5$  м,  $B_6 = 0,545$  м)

$$R_6 = 0,235 \rho_6. \quad (3.26)$$

Средняя ширина земляного полотна (на путь) для магистральных дорог оценивается так:

$$A_n = 5,8 + 1,5 H_n,$$

где  $H_n$  — высота земляного полотна (предполагается, что  $H_n \leq 12$  м). Выражение (3.23) с учетом  $B_n = 0,545$  м представляется в виде

$$R_n = \frac{1}{0,815 + 3,15 / H_n} \rho_n. \quad (3.27)$$

Для перехода от сопротивлений шпал, балласта, земляного полотна к составляющей переходного сопротивления  $r_n'$  рассматривается эквивалентная длинная линия с равномерно распределенными параметрами  $r_n$  и  $Z_p$ . Условие эквивалентности состоит в равенстве тока и потенциала во всех контактных точках модели (см. рис. 3.5) току и потенциалу в точках эквивалентной длинной линии, имеющих те же координаты. Потенциал в произвольной точке  $x$  эквивалентной длинной линии с равномерно распределенными параметрами  $Z_p$  и  $r_n$  для рассматриваемых условий определяется выражением:

$$U(x) = I_0 Z_b e^{-\gamma x}, \quad (3.28)$$

где  $Z_b$  — волновое сопротивление эквивалентной длинной линии ( $Z_b = \sqrt{Z_p r_n}$ );

$\gamma$  — коэффициент распространения эквивалентной длинной линии ( $\gamma = \sqrt{Z_p / r_n}$ ).

Переходное сопротивление системы рельсы — шпала — балластная призма — земляное полотно — земля определяется формулой

$$r_n = 0,142 \cdot 10^{-3} \rho_{ш} + 0,128 \cdot 10^{-3} \rho_6 + \frac{10^{-3}}{1,5 + 5,8 / H_n} \rho_n + 2,2 \cdot 10^{-3} \rho. \quad (3.29)$$

При работах, связанных с прикосновением к рельсам, наибольшая опасность возникает летом при наибольших возможных значениях  $\rho_{ш}$  и  $\rho_6$  и наименьших значениях  $\rho_n$  и  $\rho$ . Экспериментальные исследования показали, что для сухих деревянных шпал  $\rho_{ш}$  может достигать значения  $45 \cdot 10^3$  Ом·м. Наибольшее удельное сопротивление щебеночного балласта в летних условиях принимается равным  $5 \cdot 10^3$  Ом·м. Наименьшее значение  $\rho_n$  принято равным 200 Ом·м.

В случае оценки условий электробезопасности при выносе потенциала рельсов исходят из наибольших значений  $r_n'$  и  $r_n''$ . Для расчета наибольших значений  $r_n'$  с учетом промерзания шпал, балласта и земляного полотна рекомендуются следующие значения удельных сопротивлений:  $\rho_{ш} = 100 \cdot 10^3$  Ом·м,  $\rho_6 = 10 \cdot 10^3$  Ом·м,  $\rho_n = 1 \cdot 10^3$  Ом·м.

Наиболее характерный диапазон изменения переходного сопротивления составляет в летних условиях 0,4—2,5 Ом·км, в зимних — 1,5—17,5 Ом·км.

Как правило, на долю шпал и балласта во всех случаях (летом и зимой) приходится около 90% значения переходного сопротивления рельсы — земля, а доля земли и земляного полотна не превышает 10% [2].

### 3.6. Распределение потенциала земли в ближней зоне

*Модель* переходного сопротивления системы рельсы — шпалы — балластная призма — земляное полотно — земля, рассмотренная в § 3.5, используется для определения потенциала земли в ближней зоне ( $2|y| \leq 5,8 + 3H_n$ ).

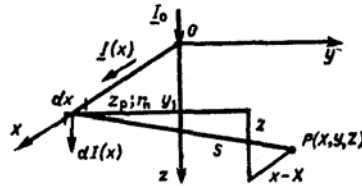


Рис. 3.6. Схема для расчета потенциала произвольной точки земли за пределами ближней зоны

Потенциал произвольной точки  $P(X, Y, Z)$ , обусловленный стеканием тока  $dI$  с произвольного бесконечно малого элемента рельсов длиной  $dx$ , имеющего координаты  $(x, 0, 0)$  (рис. 3.6),

$$dU(X, Y, Z) = \frac{dI(x)}{dx} dx \frac{\rho_{\text{эк}}}{2\pi S} \quad (3.30)$$

где  $\rho_{\text{эк}}$  — некоторое эквивалентное удельное сопротивление, характеризующее свойства среды, для которой определяется взаимное сопротивление, Ом · м;

$S$  — расстояние между влияющим элементом рельсов  $dx(x, 0, 0)$  и рассматриваемой точкой земли  $P(X, Y, Z)$ , м:

$$S = \sqrt{(x - X)^2 + Y^2 + Z^2}.$$

Полный потенциал в рассматриваемой точке  $P(X, Y, Z)$ , обусловленный влиянием тока, стекающего с рельсов на всем их протяжении,

$$U(X, Y, Z) = -\frac{\gamma I(0)}{2\pi} \rho_{\text{эк}} \int_0^{\infty} \frac{e^{-\gamma x} dx}{\sqrt{(x - X)^2 + Y^2 + Z^2}}. \quad (3.31)$$

Максимальный потенциал, соответствующий  $X = 0$ , равен:

$$U_0(0, Y, Z) = \frac{\gamma I}{4} \rho_{\text{эк}} \left[ S_0 \left( \gamma \sqrt{Y^2 + Z^2} \right) - N_0 \left( \gamma \sqrt{Y^2 + Z^2} \right) \right], \quad (3.32)$$

где  $S_0$  — функция Струве [15];

$N_0$  — функция Неймана — Бесселя второго рода нулевого порядка [18].

Формула (3.32) является общим выражением потенциала для всех точек земли ( $X = 0$ ), в том числе и для точек земли, расположенных на границе с основанием земляного полотна ( $Y_0 = 2,9 + 1,5 H_n$ ;  $Z_0 = 0,715 + H_n$ , где  $H_n$  — высота земляного полотна).

Наибольший потенциал земли ( $X = 0, Y = Y_0, Z = Z_0$ ) определяется выражением  $U_0(0, Y_0, Z_0) = 2,2 \gamma I \rho$ . Относительные значения падений напряжения на шпалах  $\Delta u_{\text{ш}}$ , балластной призме  $\Delta u_6$ , земляном полотне  $\Delta u_n$  и относительное значение потенциала земли на границе с земляным полотном  $u_3$ , равны:

$$\Delta u_{\text{ш}} = 0,142 \cdot 10^{-3} \rho_{\text{ш}} / r_n;$$

$$\Delta u_6 = 0,128 \cdot 10^{-3} \rho_6 / r_n;$$

$$\Delta u_n = \frac{10^{-3}}{1,5 + 5,8 / H_n} \rho_n / r_n;$$

$$u_3 = 2,2 \cdot 10^{-3} \rho / r_n,$$

где  $r_n$  — переходное сопротивление системы рельсы — шпала — балластная призма — земляное полотно — земля.

### 3.7. Входное сопротивление заземляющего устройства

Заземляющие устройства промышленных предприятий состоят из комбинаций сосредоточенных и протяженных заземлителей. В качестве сосредоточенных заземлителей используются контурные и глубинные заземлители, железобетонные фундаменты производственных зданий, в качестве протяженных заземлителей — рельсовые сети, эстакады и галереи различного назначения.

Рассматривается модель заземляющего устройства, состоящего из комбинаций трех сосредоточенных заземлителей, имеющих сопротивления

растеканию  $Z_1, Z_2, Z_3$  соответственно (рис. 3.7). Приняты следующие допущения:

1) сопротивления растеканию  $Z_1, Z_2, Z_3$  не зависят от тока во всем возможном диапазоне его изменения в длительном режиме и при коротком замыкании;

2) взаимные сопротивления между  $i$ -м и  $j$ -м заземлителями

$$Z_{ij} = \frac{\sqrt{\rho_i \rho_j}}{2\pi a_{ij}}, \quad (3.33)$$

где  $\rho_i, \rho_j$  — эквивалентное удельное сопротивление земли на площадках  $i$ -го и  $j$ -го заземлителя соответственно;

$a_{ij}$  — расстояние между «центрами тяжести»  $i$ -го и  $j$ -го заземлителя.

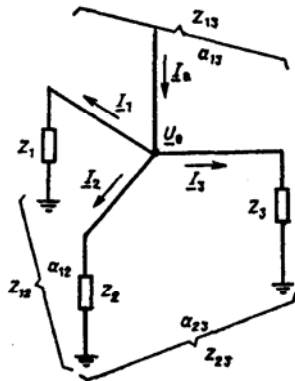


Рис. 3.7. Расчетная схема цепи обратного тока, состоящей из трех сосредоточенных заземлителей

Общий ток заземляющего устройства

$$I_0 = I_1 + I_2 + I_3. \quad (3.34)$$

Токи  $I_1, I_2, I_3$  связаны следующими уравнениями:

$$I_1 = \beta (Z_2 - Z_{12}) I_3; \quad (3.35)$$

$$I_2 = \beta (Z_1 - Z_{12}) I_3; \quad (3.36)$$

$$\beta = \frac{Z_3 - Z_{13}}{(Z_1 - Z_{13})(Z_2 - Z_{13}) - (Z_{12} - Z_{13})^2}, \quad (3.37)$$

из которых следует

$$\frac{I_1}{I_2} = (Z_2 - Z_{12}) / (Z_1 - Z_{12}). \quad (3.38)$$

Выражения относительных токов каждого элемента цепи обратного тока (ЦОТ):

$$\alpha_1 = K^{-1} (Z_2 - Z_{12}) (Z_3 - Z_{13}); \quad (3.39)$$

$$\alpha_2 = K^{-1} (Z_1 - Z_{12}) (Z_3 - Z_{13}); \quad (3.40)$$

$$\alpha_3 = K^{-1} [(Z_1 - Z_{13})(Z_2 - Z_{13}) - (Z_{12} - Z_{13})^2], \quad (3.41)$$

где

$$K = (Z_1 - Z_{13})(Z_2 - Z_{13}) + (Z_3 - Z_{13})(Z_1 + Z_2 - 2Z_{12}) - (Z_{12} - Z_{13})^2;$$

$$\alpha_1 = I_1 / I_0; \quad \alpha_2 = I_2 / I_0; \quad \alpha_3 = I_3 / I_0;$$

Эквивалентное входное сопротивление заземляющего устройства

$$Z_{0\text{эк}} = K^{-1} \{ (Z_3 - Z_{13}) [Z_2 (Z_1 - Z_{12}) + Z_{12} (Z_2 - Z_{12})] + Z_{23} [(Z_1 - Z_{13})(Z_2 - Z_{13}) - (Z_{12} - Z_{13})^2] \}. \quad (3.42)$$

Особенности расчета предельных моделей заземлителей рассмотрены в следующих параграфах.

### 3.8. Сопротивление растеканию заземлителей в неоднородных структурах

*Сложный заземлитель в земле с резко выраженной горизонтальной неоднородностью.* Сложный заземлитель в общем случае может состоять из комбинации контурных и скважинных заземлителей. Приняты следующие допущения:

1) имеющая место горизонтальная неоднородность земли позволяет разбить сложный заземлитель на отдельные части, в пределах каждой из которых можно пренебречь горизонтальной неоднородностью;



2) сопротивление растеканию каждой составной части заземлителя не зависит от тока во всем возможном диапазоне его изменения в длительных режимах и при коротких замыканиях;

3) взаимное сопротивление между отдельными частями сложного заземлителя определяется выражением

$$R_{ij} = \frac{\sqrt{\rho_i \rho_j}}{2\pi a_{ij}}, \quad (3.43)$$

где  $\rho_i, \rho_j$  — эквивалентные удельные сопротивления земли  $i$ -й и  $j$ -й частей сложного заземлителя;

$a_{ij}$  — расстояние между центрами тяжести  $i$ -й и  $j$ -й частей сложного заземлителя;

4) взаимное сопротивление  $R_{13}$  равно взаимному сопротивлению  $R_{23}$ .

Введены следующие обозначения:  $R_1, R_2, R_3$  — сопротивления растеканию 1—3-го заземлителей соответственно;  $I_1, I_2, I_3$  — токи, стекающие в землю 1—3-го заземлителей соответственно;  $R_{12}, R_{13}, R_{23}$  — взаимные сопротивления между 1—2, 1—3, 2—3-м заземлителями соответственно.

Соответствующая принятым допущениям модель сложного заземлителя в земле с резко выраженной горизонтальной неоднородностью представлена на рис. 3.8.

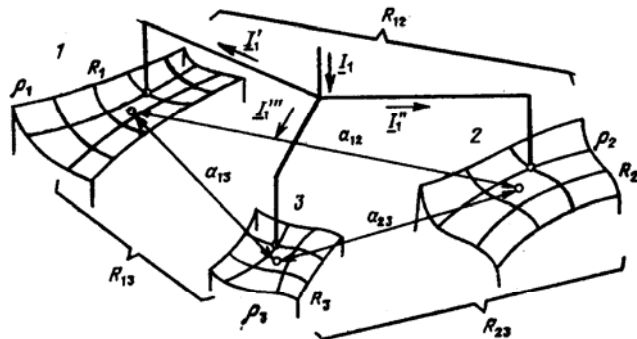


Рис. 3.8. Расчетная схема сложного заземлителя в земле с резко выраженной горизонтальной неоднородностью

Общий ток заземлителя

$$I_1 = \sum_{j=1}^3 I_j. \quad (3.44)$$

Сопротивление растеканию сложного заземлителя

$$Z_1 = M^{-1} \left\{ (R_3 - R_{13}) [R_2 (R_1 - R_{12}) + R_{12} (R_2 - R_{12})] + R_{23} [(R_1 - R_{13})(R_2 - R_{13}) - (R_{12} - R_{13})^2] \right\}, \quad (3.45)$$

где

$$M = (R_1 - R_{13})(R_2 - R_{13}) + (R_3 - R_{13})(R_1 + R_2 - 2R_{12}) - (R_{12} - R_{13})^2.$$

Токи каждой части сложного заземлителя определяются выражениями

$$I_1' = M^{-1} (R_2 - R_{12})(R_3 - R_{13}) I_1; \quad (3.46)$$

$$I_1'' = M^{-1} (R_1 - R_{12})(R_3 - R_{13}) I_1; \quad (3.47)$$

$$I_1''' = M^{-1} [(R_1 - R_{13})(R_2 - R_{13}) - (R_{12} - R_{13})^2] I_1. \quad (3.48)$$

Отметим, что даже при отсутствии скважинных заземлителей, сопротивления  $R_1, R_2, R_3$  и  $Z_1$  являются комплексными величинами, что обусловлено влиянием собственного продольного сопротивления полос сетки.

#### Контурный заземлитель в двухслойной земле

Приняты следующие допущения:

1) земля, в которой расположен заземлитель, является идеальным бесконечным полупространством, состоящим из двух слоев; толщина верхнего слоя  $h_1$  конечна, нижний слой имеет неограниченную мощность ( $h_2 = \infty$ ); в пределах каждого слоя удельное сопротивление земли постоянно и равно  $\rho_1$  и  $\rho_2$  соответственно; поверхность земли и граница раздела между слоями горизонтальны;

2) контурный заземлитель, образованный из горизонтальных полос и вертикальных электродов, целиком расположен в верхнем слое земли;

3) продольное сопротивление полос и вертикальных электродов переменному току частотой 50 Гц пренебрежимо мало.

Кроме того, сохраняется силу допущение, сформулированное в предыдущем пункте.

Расчетная модель контурного заземлителя в двухслойной земле, соответствующая принятым допущениям, представлена на рис. 3.9.

Сопротивление растеканию контурного заземлителя (рис. 3.9)

$$R = 0,52 \rho_{\text{эк}} / \sqrt{S}, \quad (3.49)$$

где  $\rho_{\text{эк}}$  — эквивалентное удельное электрическое сопротивление двухслойной земли.

Для определения  $\rho_{\text{эк}}$  в 1975 г. была предложена эвристическая формула [8]:

$$\rho_{\text{эк}} = \rho_1 \left(1 - e^{-\alpha h / \sqrt{S}}\right) + \rho_2 \left(1 - e^{-\beta \sqrt{S} / h}\right), \quad (3.50)$$

где  $\alpha, \beta$  — безразмерные коэффициенты.

Эвристическое выражение (3.50) моделирует процесс формирования  $\rho_2$  в двухслойной земле с учетом влияния параметра  $\Delta = h / \sqrt{S}$ . Если  $\Delta \rightarrow 0$ , то  $\rho_{\text{эк}} \rightarrow \rho_2$ ; если  $\Delta \rightarrow \infty$ , то  $\rho_{\text{эк}} \rightarrow \rho_1$ .

Предельное значение (50) при  $\rho_1 = \rho_2 = \rho_{\text{эк}}$

$$e^{-\alpha \Delta} + e^{-\beta / \Delta} = 1.$$

Для условия  $\rho_1 > \rho_2$

$$\rho_{\text{эк}} = \rho_1 \left(1 - e^{-3,7\Delta}\right) + \rho_2 \left(1 - e^{-\beta'_i / \Delta}\right), \quad (3.51)$$

где  $\beta'_i = -2,3\Delta \lg(1 - e^{-3,7\Delta})$ ;

для условия  $\rho_1 < \rho_2$

$$\rho_{\text{эк}} = \rho_1 \left(1 - e^{-84\Delta}\right) + \rho_2 \left(1 - e^{-\beta''_i / \Delta}\right), \quad (3.52)$$

где  $\beta''_i = -2,3\Delta \lg(1 - e^{-84\Delta})$ .

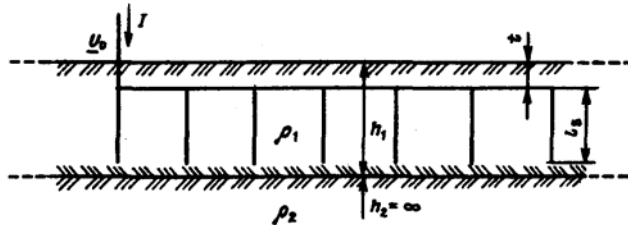


Рис. 3.9. Расчетная схема контурного заземлителя в двухслойной земле (поперечный разрез)

Ошибка расчета сопротивления растеканию по (3.49) при вычислении  $\rho_{\text{эк}}$  по (3.51)—(3.52) не превышает 30% при доверительной вероятности, равной 0,999.

### Контурный заземлитель в многослойной земле

Приняты следующие допущения:

1) земля, в которой расположен заземлитель, является идеальным бесконечным полупространством, состоящим из произвольного числа  $n$  слоев. Толщина каждого из  $n - 1$  слоя конечны. Подстилающий  $n$ -й слой имеет неограниченную мощность ( $h_n = \infty$ ). В пределах каждого  $i$ -го слоя удельное сопротивление земли постоянно и равно  $\rho_i$ . Поверхность земли и границы раздела между слоями горизонтальны;

2) сопротивление растеканию рассматриваемого контурного заземлителя с погрешностью, не превышающей 20%, равно сопротивлению растекания полусферического заземлителя в многослойной земле, в которой поверхности раздела слоев образованы полусферами с радиусами, равными глубинам расположения поверхностей раздела горизонтальных слоев, а удельные сопротивления слоев земли, образованных полусферами, равны удельным сопротивлениям соответствующих горизонтальных слоев земли. Радиус эквивалентного полусферического заземлителя  $r_0$ , найденный из условия равенства сопротивления растеканию контурного заземлителя сопротивлению растеканию полусферического заземлителя в однородной земле

$$R = \rho / (2\pi r_0), \quad (3.53)$$

определяется выражением

$$r_0 = 0,307\sqrt{S}. \quad (3.54)$$

Расчетная модель эквивалентного полусферического заземлителя в  $n$ -слойной земле представлена на рис. 3.10.

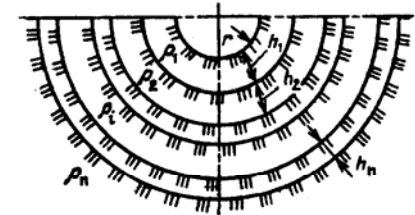


Рис. 3.10. Расчетная схема эквивалентного полусферического заземлителя в  $n$ -слойной земле

Для рассматриваемых условий сопротивление растеканию сферического заземлителя

$$R = \frac{1}{2\pi} \left[ \rho_n \frac{1}{r + \sum_{i=1}^{n-1} h_i} + \sum_{i=1}^{n-1} \rho_i \frac{h_i}{\left(r + \sum_{j=1}^{i-1} h_j\right) \left(r + \sum_{k=1}^i h_k\right)} \right]. \quad (3.55)$$



Под эквивалентным удельным сопротивлением неоднородной многослойной земли с полусферическими поверхностями раздела  $\rho_{ж}$  понимают такое удельное сопротивление однородной земли, при котором рассматриваемый полусферический заземлитель будет иметь то же сопротивление растеканию  $R$ , определяемое по (3.55):

$$R = \rho_{эк} / (2\pi r_0), \quad (3.56)$$

где

$$\rho_{эк} = \rho_n \left[ \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^{n-1} \eta_i} + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\rho_i}{\rho_n} \times \frac{\eta_i}{\left(1 + \sum_{j=1}^{i-1} \eta_j\right) \left(1 + \sum_{k=1}^i \eta_k\right)} \right]; \quad (3.57)$$

$$\eta_i = h_i / r_0.$$

Применительно к двухслойной горизонтальной структуре

$$\rho_{эк} = \rho_2 \left( \frac{1}{1 + \eta} + \frac{\rho_1}{\rho_2} \frac{\eta}{1 + \eta} \right), \quad (3.58)$$

где  $\eta = 3,26 / \sqrt{S}$ .

**Контурный заземлитель в земле с непрерывным изменением удельного сопротивления по глубине**

Приняты следующие допущения:

1) земля, в которой расположен заземлитель, является идеальным бесконечным полупространством, удельное сопротивление которого изменяется по глубине по закону

$$\rho = \rho_0 e^{-kz}, \quad (3.59)$$

где  $\rho_0$  — удельное сопротивление земли на ее поверхности;

$k$  — вещественное положительное число, характеризующее скорость изменения удельного сопротивления по глубине в направлении вертикальной оси  $z$ . Поверхность земли горизонтальна;

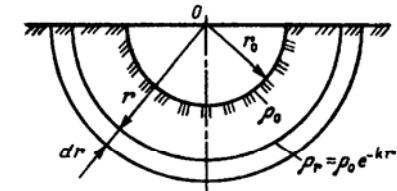


Рис. 3.11. Расчетная схема эквивалентного полусферического заземлителя при непрерывном изменении удельного сопротивления земли по глубине

2) сопротивление растеканию рассматриваемого контурного заземлителя с погрешностью, не превышающей 20%, равно сопротивлению растекания полусферического заземлителя в идеальном бесконечном полупространстве, удельное сопротивление которого изменяется в радиальном направлении по закону

$$\rho_r = \rho_0 e^{-kz}, \quad (3.60)$$

где  $\rho_0$  — удельное сопротивление земли на границе с полусферическим заземлителем ( $r = r_0$ );

$r$  — радиус-вектор, характеризующий рассматриваемую точку идеального бесконечного полупространства.

Радиус полусферического заземлителя

$$r_0 = 0,307 \sqrt{S}. \quad (3.61)$$

Расчетная модель эквивалентного полусферического заземлителя для рассматриваемых условий представлена на рис. 3.11. Из рис. 3.11 следует, что

$$R = \frac{\rho_0}{2\pi} \left[ \frac{e^{-kr_0}}{r_0} + k \text{Ei}(-kr_0) \right], \quad (3.62)$$

где  $\text{Ei}(-kr_0)$  — интегральная показательная функция [18].

Выражение эквивалентного удельного сопротивления для рассматриваемой задачи

$$\rho_{эк} = \rho_0 \left[ e^{-kr_0} + kr_0 \text{Ei}(-kr_0) \right]. \quad (3.63)$$

Пример. Пусть  $\sqrt{S} = 100$  м,  $k = 100^{-2}$  м<sup>-1</sup>. Тогда находим  $r_0 = 30,7$  м.

Подставляя значения  $k$  и  $r_0$  в (3.63), получаем

$$\rho_{эк} = \rho_0 \left[ e^{-0,307} + 0,307 \text{Ei}(-0,307) \right].$$

После подстановки значения  $\text{Ei}(-0,307) = -0,887$  [18] находим  $\rho_{эк} = 0,463 \rho_0$ .

### Скважинный неоднородный заземлитель в многослойной земле

Приняты следующие допущения:

1) земля, в которой расположен заземлитель, является идеальным бесконечным полупространством, состоящим из произвольного числа слоев. Толщина каждого из  $n-1$  слоя конечна. Подстилающий  $n$ -й слой имеет неограниченную мощность ( $h_n = \infty$ ). В пределах каждого  $i$ -го слоя удельное сопротивление земли постоянно и равно  $\rho_i$ . Поверхность земли и границы раздела между слоями горизонтальны;

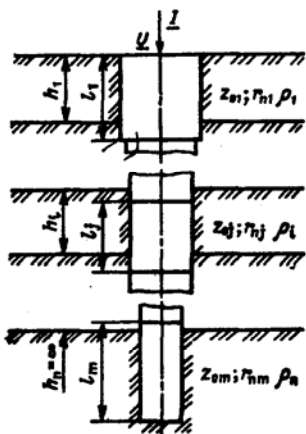


Рис. 3.12. Расчетная схема неоднородного скважинного заземлителя в многослойной земле

2) труба, образующая скважинный заземлитель, может быть разбита на конечное число  $m$  отдельных частей, в пределах каждой из которых можно пренебречь неоднородностью ее электрических параметров—продольным сопротивлением  $Z_{0j}$  и переходным сопротивлением  $r_{nj}$ ;

3) электрические сопротивления скважинного заземлителя  $Z_{0j}$  и  $r_{nj}$  не зависят от тока во всем возможном диапазоне его изменения в длительных режимах и при коротких замыканиях.

Расчетная модель скважинного заземлителя для рассматриваемых условий представлена на рис. 3.12.

Входное сопротивление скважинного заземлителя определяется выражением

$$Z_{вх} = Z_{в1} \frac{Z_{вх2} + Z_{в1} \operatorname{th} \gamma_1 l_1}{Z_{в1} + Z_{вх2} \operatorname{th} \gamma_1 l_1}, \quad (3.64)$$

где

$$Z_{вх2} = Z_{в2} \frac{Z_{вх3} + Z_{в2} \operatorname{th} \gamma_2 l_2}{Z_{в2} + Z_{вх3} \operatorname{th} \gamma_2 l_2};$$

.....

$$Z_{вхj} = Z_{вj} \frac{Z_{вх(j+1)} + Z_{вj} \operatorname{th} \gamma_j l_j}{Z_{вj} + Z_{вх(j+1)} \operatorname{th} \gamma_j l_j};$$

.....

$$Z_{вхm} = Z_{вm} \operatorname{cth} \gamma_m l_m;$$

$$Z_{вj} = \sqrt{Z_{0j} r_{nj}};$$

$$\gamma_j = \sqrt{Z_{0j} / r_{nj}}.$$

Продольное сопротивление  $j$ -го участка трубы  $Z_{0j}$  определяется выражением (3.65), в котором следует принять  $\varphi = 2\pi$ ;  $\rho = \rho_j$ ;  $R_r = a_j$ , где  $a_j$ —наружный радиус трубы. Переходное сопротивление  $j$ -го участка трубы  $r_{nj}$  определяется выражением (66), в котором следует принять  $\rho = \rho_j/2$ ;  $a = a_j$ ;  $\gamma = \gamma_j$ ;

$$Z = r_a + \pi^2 f \cdot 10^{-4} - 29 \cdot 10^{-4} f \lg \frac{0,316}{R_r} \sqrt{\frac{\rho \cdot 10^{11}}{\varphi f}}; \quad (3.65)$$

$$r_n = \frac{\rho}{\pi} \ln \frac{1,12}{\alpha \gamma}. \quad (3.66)$$

### 3.9. Распределение потенциала земли в зоне растекания тока с заземлителями

Сложный заземлитель в земле с резко выраженной горизонтальной неоднородностью

В состав сложного заземлителя входят два контурных заземлителя 1 и 2 и один скважинный 3. Тогда решение задачи записывается в виде

$$U_{н(ш)}^I = k'_{1(2)} \rho_v \frac{I_1^I}{L_1}; \quad (3.67)$$

$$U_{н(ш)}^{II} = k''_{1(2)} \rho_v \frac{I_1^{II}}{L_2}; \quad (3.68)$$

$$U_{н(ш)}^{III} = u''_{н(ш)} \rho_v I_1^{III}, \quad (3.69)$$

где  $U_{н(ш)}^I, U_{н(ш)}^{II}, U_{н(ш)}^{III}$  — напряжения прикосновения (шага) заземлителей 1—3 соответственно;

$I_1^I, I_1^{II}, I_1^{III}$  — токи, определяемые формулами (3.46)—(3.48) соответственно;

- $k'_{1(2)}, k''_{1(2)}$  — поправочные коэффициенты для расчета напряжений прикосновения (шага) заземлителей 1, 2 соответственно;
- $u''_{n(m)}$  — коэффициент пропорциональности для расчета напряжения прикосновения (шага) заземлителя 3;
- $\rho'_v, \rho''_v, \rho'''_v$  — эквивалентные удельные сопротивления земли, определяющие распределение потенциала в зонах растекания заземлителей 1—3 соответственно;
- $L_1, L_2$  — суммарные длины проводников заземлителей 1, 2 соответственно.

Зависимость  $k_{1(2)}$  от расстояния между полосами горизонтальной сетки  $D$  и их числа в одном ряду  $N$  применительно к параметрам контурных заземлителей подстанций дана в [7].

Определение эквивалентного удельного сопротивления земли для расчета распределения потенциала в зоне растекания тока с контурного заземлителя при вертикальной неоднородности земли рассмотрено ниже.

**Контурный заземлитель в двухслойной земле** (см. рис. 3.9). Напряжения прикосновения и шага контурного заземлителя

$$U_{1(2)} = (k_{1(2), \rho_v} I) / L, \quad (3.70)$$

где  $\rho_v = \rho_1 \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\rho_2}{\rho_1} \right) \left( 1 - \frac{Ch}{\sqrt{S}} \right) \right]$ ;

$C$  — коэффициент, зависящий от конструктивных параметров контурного заземлителя;  $\frac{Ch}{\sqrt{S}} \leq 1$ .

Уравнение (3.70) удовлетворяет граничным условиям задачи:

1) если  $\rho_1 = \rho_2 = \rho$  (однородная земля), то  $\rho_v = \rho$ ;

2) если толщина верхнего слоя земли достаточно мала, т. е.  $\frac{Ch}{\sqrt{S}} \leq 1$ , то

$$\rho_v = \rho_2;$$

3) если верхний слой имеет значительную толщину, т. е.  $\frac{Ch}{\sqrt{S}} = 1$ , то

$$\rho_2 = \rho_1.$$

Отметим, что если толщина верхнего слоя земли превышает критическое значение ( $h'_0 = \sqrt{S} / C$ ), то в расчетах следует принимать  $\rho_v = \rho_1$ .

Как показано в работе [7], погрешность формулы (3.70) по сравнению с точными методами расчета не превышает 20%.

**Скважинный заземлитель** (см. рис. 3.12). Рассмотрим распределение потенциала земли в зоне растекания тока с вертикального скважинного заземлителя. Приняты следующие допущения:

1) земля, в которой расположен заземлитель, является идеальным бесконечным полупространством, имеющим удельное сопротивление  $\rho$ . Поверхность земли горизонтальна;

2) труба скважинного заземлителя характеризуется продольным сопротивлением  $Z_0$  и переходным сопротивлением  $r_n$ , не зависящими от тока во всем возможном диапазоне его изменения.

Напряжение прикосновения к скважинному заземлителю  $U''_n$  и напряжение шага  $U''_ш$  на произвольном расстоянии  $r$  от скважинного заземлителя равны:

$$U''_n = U_0 - U \quad (r = 1 \text{ м}); \quad (3.71)$$

$$U''_ш = U(r) - U \quad (r = 1 \text{ м}), \quad (3.72)$$

где

$$U_0 = I''_1 Z_{\text{вх}};$$

$$Z_{\text{вх}} = Z_b \operatorname{cth} \gamma L_3;$$

$$Z_b = \sqrt{Z_0 r_n};$$

$$\gamma = \sqrt{Z_0 / r_n};$$

Потенциал произвольной точки земли на расстоянии  $r$  от скважинного заземлителя  $U(r)$  в зоне растекания тока

$$U(r) = \frac{1}{2\pi} \rho_v'' \gamma I''_1 \int_0^{L_3} \frac{e^{-\gamma z} dz}{\sqrt{Z^2 + r^2}}, \quad (3.73)$$

где  $I''_1$  — ток, стекающий с заземлителя и определяемый по (3.48);

$\rho_v''$  — эквивалентное удельное сопротивление земли, определяющее распределение потенциала в зоне растекания (в соответствии с принятым допущением  $\rho_v'' = \rho$ ).

Выражение (3.73) представляется в виде

$$U(r) = \gamma \frac{I^m}{4} \rho [S_0(\gamma r) - N_0(\gamma r)], \quad (3.74)$$

где  $S_0(v) = S_0(\gamma r)$  — функция Струве;  
 $N_0(v) = N_0(\gamma r)$  — функция Неймана — Бесселя второго рода нулевого порядка.  
 Уравнения (3.71)—(3.74) позволяют рассчитать напряжения прикосновения и шага скважинного заземлителя.

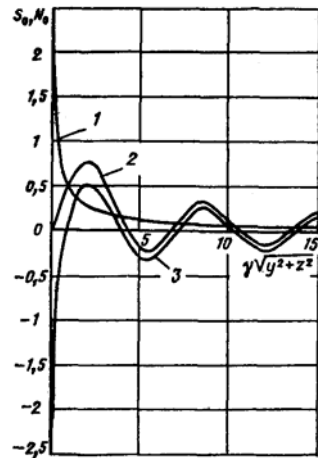


Рис. 3.13. Зависимость  $S_0(\gamma r)$  —  $N_0(\gamma r)$  для значений аргумента  $\gamma r < 15$

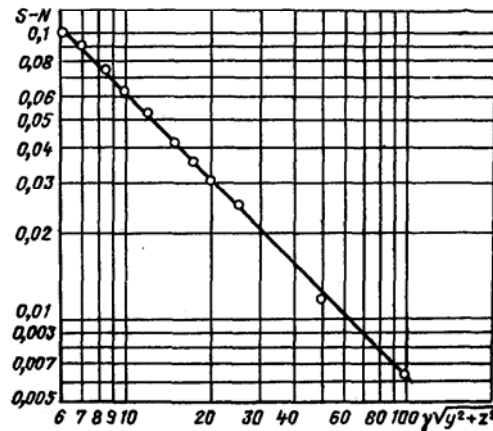


Рис. 3.14. Зависимость  $S_0(\gamma r) - N_0(\gamma r)$  для значений аргумента  $6 \leq \gamma r \leq 100$

Формула (3.74) выражает потенциал через разность двух асимптотически приближающихся к одному значению функций. В целях облегчения использования полученных результатов для практических расчетов зависимость  $S_0(\gamma r) - N_0(\gamma r)$  представлена графически: для значений аргумента  $\gamma r < 15$  — на рис. 3.13, а для значений  $6 \leq \gamma r \leq 100$  в двойном логарифмическом масштабе — на рис. 3.14.

### 3.10. Особенности расчета заземляющих свойств строительных конструкций

*Расчет сопротивления растеканию строительных конструкций производственного здания.* Сопротивление растеканию железобетонных фундаментов здания [28, 29]

$$R = 0,52 \frac{\rho_{\text{эк}}}{\sqrt{S}}, \quad (3.75)$$

где  $S$  — площадь, ограниченная периметром здания,  $\text{м}^2$ ;  
 $\rho_{\text{эк}}$  — эквивалентное удельное электрическое сопротивление земли,  $\text{Ом} \cdot \text{м}$ .  
 Для расчета  $\rho_{\text{эк}}$  следует использовать формулу

$$\rho_{\text{эк}} = \rho_1 \left(1 - e^{-\alpha h / \sqrt{S}}\right) + \rho_2 \left(1 - e^{-\beta \sqrt{S} / h}\right), \quad (3.76)$$

где  $\rho_1$  — удельное электрическое сопротивление верхнего слоя земли,  $\text{Ом} \cdot \text{м}$ ;  
 $\rho_2$  — удельное электрическое сопротивление нижнего слоя,  $\text{Ом} \cdot \text{м}$ ;  
 $h$  — мощность (толщина) верхнего слоя земли;  
 $\alpha, \beta$  — безразмерные коэффициенты, зависящие от соотношения удельных электрических сопротивлений слоев земли: если  $\rho_1 > \rho_2$ , то  $\alpha = 3,6$ ,  $\beta = 0,1$ ; если  $\rho_1 < \rho_2$ , то  $\alpha = 1,1 \cdot 10^2$ ,  $\beta = 0,3 \cdot 10^{-2}$ .

Удельные электрические сопротивления  $\rho_1, \rho_2$  и мощность  $h$  верхнего слоя определяют по результатам вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) или по данным геологических изысканий. Многослойную структуру земли приводят к двухслойной. Под верхним слоем следует понимать слой земли, удельное сопротивление которого более чем в 2 раза отличается от удельного электрического сопротивления нижнего слоя.

По данным  $\rho_1, \rho_2, h, \sqrt{S}$  и по формуле (3.76) или по номограмме рис. 3.15 определяется  $\rho_{\text{эк}}$ . При отсутствии сведений об удельном электрическом сопротивлении слоев земли допустимо пользоваться данными табл. 3.7.

Для оценки возможности использования железобетонных конструкций зданий в качестве заземляющих устройств можно воспользоваться следующими соотношениями:

а) в электроустановках напряжением выше 1 кВ с заземленной нейтралью, расположенных внутри здания или примыкающих к промышленному зданию с железобетонными фундаментами, следует использовать эти фундаменты в качестве заземлителей, если выполняется соотношение

$$\sqrt{S} \geq K_1 \rho, \quad (3.77)$$

где  $K_1$  — коэффициент, значения которого даны ниже.

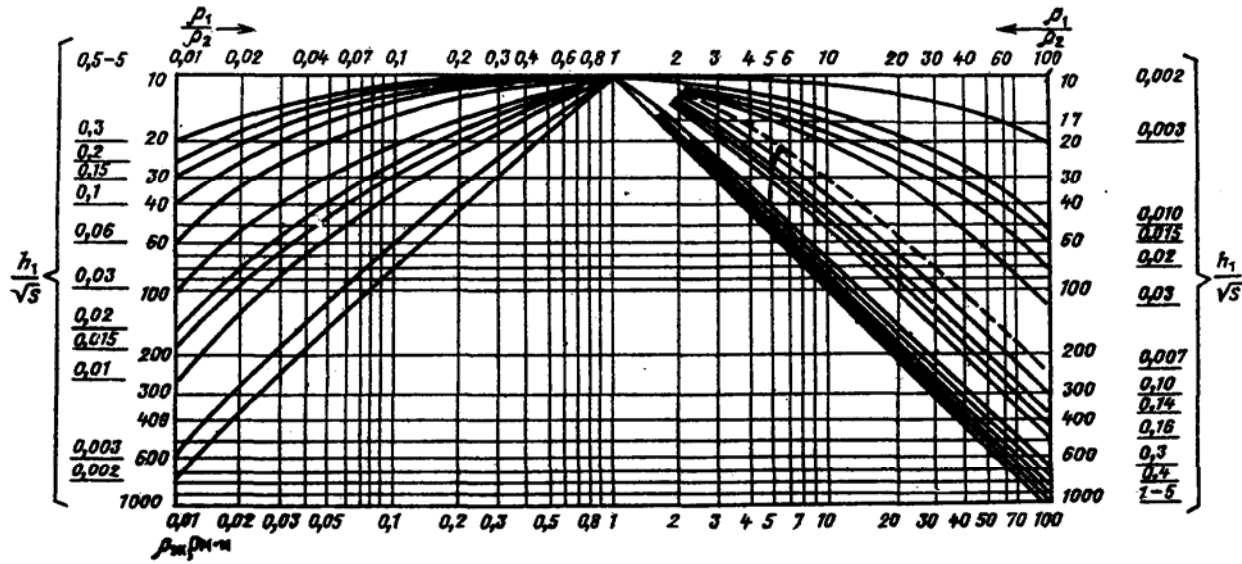


Рис. 3.15. Зависимость эквивалентного электрического сопротивления двухслойной земли от  $\rho_1/\rho_2$  и  $h_1/\sqrt{S}$  :

$\rho_1$  — электрическое сопротивление верхнего слоя земли, Ом · м;  $\rho_2$  — электрическое сопротивление подстилающего слоя земли, Ом · м;  $h_1$  — толщина верхнего слоя земли, м;  $\sqrt{S}$  — площадь нулевого цикла здания, м<sup>2</sup>

Значения удельного электрического сопротивления земли $\rho_z$ , Ом · м	$\rho_z \leq 5 \cdot 10^2$	$5 \cdot 10^2 < \rho_z < 5 \cdot 10^3$	$\rho_z \geq 5 \cdot 10^3$
Значения $K_1$ .....	1	$500/\rho_z$	0,1

При выполнении неравенства (3.77) сопротивление заземляющего устройства будет не более нормированных значений [10];

б) в электроустановках напряжением выше 1 кВ с изолированной нейтралью, расположенных внутри промышленного здания с железобетонными фундаментами или примыкающих к нему, следует использовать эти фундаменты в качестве заземлителей, одновременно использующихся для электроустановок напряжением до 1 кВ, без сооружения искусственных заземлителей, если выполняется соотношение

$$\sqrt{S} \geq \rho_{\text{эк}} I K_2, \quad (3.78)$$

где  $I$  — расчетный ток замыкания на землю, А.

$$K_2 = 2 \cdot 10^{-3} B^{-1}.$$

Сопротивление растеканию таких заземляющих устройств будет не более требуемых ПУЭ;

в) в электроустановках напряжением до 1 кВ с заземленной нейтралью, расположенных внутри промышленного здания или примыкающих к зданию с железобетонными фундаментами, следует использовать железобетонные фундаменты в качестве заземлителей, если выполняется соотношение

$$S > S_0, \quad (3.79)$$

где  $S_0$  — критический параметр, значения которого в зависимости от линейного напряжения электроустановки и эквивалентного удельного электрического сопротивления земли приведены в табл. 3.11.

При соблюдении этих соотношений выполняются требования ПУЭ.

Т а б л и ц а 3.11. Значения критического параметра  $S_0$

Удельное эквивалентное сопротивление земли $\rho_z$ , Ом · м	Линейное напряжение, В		
	220	380	660
$\rho_{\text{эк}} \leq 10^3$	36	156	625
$\rho_{\text{эк}} > 10^3$	$0,36 \cdot 10^{-4} \rho_{\text{эк}}^2$	$1,56 \cdot 10^{-4} \rho_{\text{эк}}^2$	$6,25 \cdot 10^{-4} \rho_{\text{эк}}^2$

Если производственное здание имеет металлические колонны и необходимо определить возможность использования анкерных болтов в качестве