

заземлителей без их приварки к арматуре фундамента, расчет выполняется в следующей последовательности:

сопротивление растеканию заземляющего устройства

$$R = C \frac{\rho_{\text{эк}}}{\sqrt{S}}, \quad (3.80)$$

где C — коэффициент, определяемый по формуле

$$C = \frac{\sqrt{S}}{2\pi l N} \left[\ln \frac{8l}{D} - 1 + \frac{2kl}{\sqrt{S}} (\sqrt{N} - 1)^2 \right]; \quad (3.81)$$

S — площадь фундаментного поля;

N — число фундаментов;

l — длина анкерного болта;

$k = 1,37$ — коэффициент;

D — эквивалентный диаметр анкерного болта

$$D = \frac{4l}{\exp\left(\frac{2\pi l \sum R_6}{\rho_{\text{эк}}}\right)}. \quad (3.82)$$

Эквивалентное сопротивление анкерных болтов

$$\sum R_6 = \frac{1}{n_6} \left(\frac{\rho_i}{2\pi l} \ln \frac{n_6 l}{d_k} + \frac{\rho_i}{4\pi l} \ln k_n \right), \quad (3.83)$$

где $k_n = k_1 \times k_2 \times k_3 \times \dots \times k_1$ — коэффициент, учитывающий взаимное влияние анкерных болтов:

$$k_i = \frac{\sqrt{x_i^2 + l^2} + l}{\sqrt{x_i^2 + l^2} - l}. \quad (3.84)$$

Здесь x_i — расстояние между анкерными болтами; d_k — кажущийся диаметр электрода в земле:

$$d_k = \frac{4l}{\exp\left(\frac{2\pi l R_6}{\rho_{\text{эк}}}\right)}. \quad (3.85)$$

Сопротивление анкерного болта

$$R_6 = \frac{\rho_6}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d_6} - \frac{\rho_6}{2\pi l} \ln \frac{4l}{D_6} + \frac{\rho_i}{2\pi l} \ln \frac{4l}{D_6}, \quad (3.86)$$

где d_6 — диаметр анкерного болта;

D_6 — диаметр анкерного болта вместе с наименьшим защитным слоем бетона.

Расчет необходимости устройства выравнивающих полос для электроустановок напряжением выше 1 кВ с эффективно заземленной нейтралью. В электроустановках от 110 до 500 кВ не требуется прокладка выравнивающих проводников, в том числе у входов и въездов, кроме мест расположения нейтралей силовых трансформаторов, короткозамыкателей, вентильных разрядников и молниеотводов, если выполняется условие

$$I_k \leq (5,4 + 7 \cdot 10^{-3} \rho_1) \frac{\sqrt{S}}{\rho_{\text{эк}}}, \quad (3.87)$$

где I_k — расчетный ток однофазного замыкания, стекающий в землю с фундаментов здания, кА.

Расчет заземлителя для молниезащиты. К естественным заземлителям для молниезащиты относятся железобетонные фундаменты отдельно стоящих молниеотводов и железобетонные фундаменты защищаемых объектов. Вследствие капиллярного подсоса влаги защитный слой бетона фундамента является проводником для импульсных токов, и поэтому стальная арматура фундамента становится естественным заземлителем. При прохождении импульсного тока в бетонном слое фундамента возникают искровые процессы, не приводящие к механическому разрушению бетона вследствие небольшого значения плотности тока, стекающего с арматуры каркаса фундамента.

Согласно СН 305—77 импульсное сопротивление заземлителя должно быть:

для молниезащиты I категории не более 10 Ом;

для молниезащиты II категории не более 10 Ом, а в грунтах с удельным сопротивлением 500 Ом · м и выше допускается не более 40 Ом. В грунтах с удельным сопротивлением $\rho \leq 1500$ Ом · м рекомендуется в качестве заземлителей использовать железобетонные фундаменты зданий и сооружений;

для молниезащиты III категории не более 20 Ом, в грунтах с удельным сопротивлением 500 Ом · м и выше допускается не более 40 Ом.

Защита от прямых ударов молнии зданий и сооружений, относимых по устройству молниезащиты ко II и III категориям, выполняется одним из следующих способов:

отдельно стоящими или установленными на зданиях неизолированными стержневыми и тросовыми молниеотводами;

наложением молниеприемной сетки на неметаллическую кровлю или использованием в качестве молниеприемника металлической кровли здания или сооружения. Токоотводы, соединяющие молниеприемную сетку или металл кровли с заземлителями, должны быть проложены через каждые 25 м по периметру здания.

При расчете заземлителя следует рассматривать наиболее неблагоприятный вариант удара молнии в здание, когда в зону с радиусом 25 м попадает наименьшее число фундаментов, по которым стекает ток молнии.

Расчет заземлителя выполняется в следующей последовательности.

Определяется сопротивление растеканию одного фундамента измерением или расчетным путем.

Сопротивление растеканию одного фундамента импульсному току

$$R_{\phi,и} = \alpha R_{\phi}, \quad (3.88)$$

где α — коэффициент импульса, зависящий от тока молнии, удельного сопротивления грунта и конструкции здания, определяется по СН 305—77 (п. 3.11 в табл. 5).

Сопротивление зоны растекания

$$R_3 = R_{\phi,и} / N, \quad (3.89)$$

где N — число фундаментов, попадающих в зону радиусом 25 м.

Сопротивление зоны должно быть меньше или равно допустимому значению сопротивления заземлителя для молниезащиты.

При использовании в качестве заземлителей арматуры анкерных болтов или железобетонных колонн расчет выполняется в следующей последовательности.

Определяется площадь поверхности болтов одного фундамента или площадь поверхности арматуры колонны, которая находится в земле:

$$s = \pi d n l,$$

где d — диаметр болта или диаметр стержня арматуры, колонн, мм;

l — длина болта или арматуры, находящихся в земле, мм;

n — число болтов или стержней арматуры колонны.

Определяем допустимую плотность тока на анкерные болты или стержни арматуры колонны. При ударах молнии допускается плотность тока 30 кА/м^2 .

Допустимое полное значение тока на один фундамент или колонну, кА,

$$I_{\phi 1} = 30s, \quad (3.90)$$

Общий ток молнии с учетом наименьшего числа фундаментов, попадающих в зону радиусом 25 м,

$$\sum I_{\phi i} = I_{\phi 1} n. \quad (3.91)$$

При расчетах мероприятий по молниезащите исходной величиной является амплитуда тока молнии.

В СНГ кривые вероятности токов молнии нормированы Руководящими указаниями. Эти кривые позволяют сделать вывод, что для равнинных районов наиболее вероятны токи молнии с амплитудой до $6 \cdot 10^4 \text{ А}$. Вероятность токов молнии $(6—20) \cdot 10^4 \text{ А}$ невелика, однако при проектировании молниезащиты ответственных объектов следует учитывать возможность появления таких токов.

Расчет входного сопротивления эстакады. Анализ конструктивного исполнения эстакад, а также проведенные расчеты показали, что все эстакады можно разделить на три группы в зависимости от значения продольного сопротивления, каждому из которых соответствует свое семейство кривых для определения входного сопротивления:

технологические эстакады, на которых проложены одна или две трубы ($Z_0 = 1,5 \text{ Ом/км}$);

технологические эстакады, на которых проложены три или четыре трубы ($Z_0 = 0,75 \text{ Ом/км}$);

технологические эстакады, на которых расположены пять и более труб, а также кабельные галереи ($Z_0 = 0,5 \text{ Ом/км}$).

Переходное сопротивление эстакады определяется согласно [25] по формуле, Ом · км,

$$r_{п} = (R_0 a + 1,5 \rho_{эк}) \cdot 10^{-3}, \quad (3.92)$$

где R_0 — сопротивление растеканию тока одного фундамента опоры;

a — расстояние между соседними опорами;

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

Сопротивление растеканию тока одного фундамента опоры зависит от соотношения между его наибольшим горизонтальным размером D и глубиной заложения l :

если $D < l$, то

$$R_0 \approx \rho_{эк} / l, \quad (3.93)$$

если $D \geq l$, то

$$R_0 \approx 0,3 \rho_{эк} / D. \quad (3.94)$$

Эквивалентное удельное электрическое сопротивление земли

$$\rho_{\text{эк}} = \rho_1 \left(1 - e^{-\alpha h/L}\right) + \rho_2 \left(1 - e^{-\beta L/h}\right), \quad (3.95)$$

где ρ_1 и ρ_2 — удельные сопротивления верхнего и подстилающего слоев двухслойной земли соответственно;

α и β — безразмерные коэффициенты;

h — мощность верхнего слоя земли.

При $\rho_1 > \rho_2$ $\alpha = 6,2$, $\beta = 5,7 \cdot 10^{-2}$; при $\rho_1 < \rho_2$ $\alpha = 3,5 \cdot 10^2$, $\beta = 0,1 \cdot 10^{-2}$.

Семейства кривых $Z_{\text{вх}} = f(L)$ параметра $R_{\text{п}}$ приведены на рис. 3.16 для объектов с продольными сопротивлениями $Z_0 = 1,5$; 0,75 и 0,5 Ом/км соответственно.

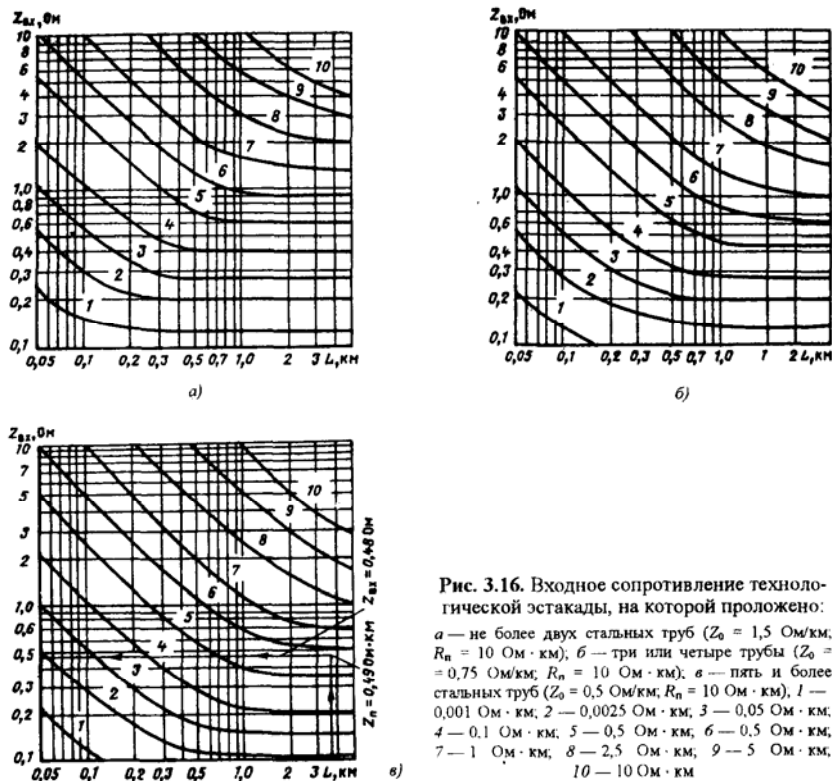


Рис. 3.16. Входное сопротивление технологической эстакады, на которой проложено:
 а — не более двух стальных труб ($Z_0 = 1,5 \text{ Ом/км}$, $R_{\text{п}} = 10 \text{ Ом} \cdot \text{км}$); б — три или четыре трубы ($Z_0 = 0,75 \text{ Ом/км}$, $R_{\text{п}} = 10 \text{ Ом} \cdot \text{км}$); в — пять и более стальных труб ($Z_0 = 0,5 \text{ Ом/км}$, $R_{\text{п}} = 10 \text{ Ом} \cdot \text{км}$); 1 — 0,001 Ом·км; 2 — 0,0025 Ом·км; 3 — 0,05 Ом·км; 4 — 0,1 Ом·км; 5 — 0,5 Ом·км; 6 — 0,5 Ом·км; 7 — 1 Ом·км; 8 — 2,5 Ом·км; 9 — 5 Ом·км; 10 — 10 Ом·км

Для эстакады, на которой проложено более пяти труб и которая имеет продольное сопротивление 0,5 Ом/км, переходное сопротивление 0,48 Ом·км и длину 3,7 км, получаем входное сопротивление, равное 0,48 Ом.

Проведенные расчеты показали, что эстакады всех назначений можно применять в качестве заземляющих устройств во всех климатических зонах СНГ, включая зону многолетнемерзлых грунтов, при условии, что они расположены на неагрессивных и слабоагрессивных грунтах.

Расчет числа железобетонных опор в группе, арматура которых должна иметь металлическое соединение с арматурой траверс, балок и фундаментов, проводится в следующей последовательности.

1. Число железобетонных опор N , арматура которых должна иметь металлическое соединение с арматурой траверс, балок и фундаментов для целей молниезащиты и защиты от статического электричества, определяется из соотношения

$$N \geq L'/a, \quad (3.96)$$

где a — шаг опор эстакады, м;

L' — длина участка железобетонной эстакады, арматура опор которого должна иметь указанное выше металлическое соединение.

Значение L' определяется из соотношения

$$L' \geq r_{\text{п}}/[R_{\text{н}}], \quad (3.97)$$

где $[R_{\text{н}}]$ — нормируемое значение сопротивления заземляющего устройства, в качестве которого используется эстакада. Это значение удовлетворяет требованиям пп. 2.126, 2.20, 2.27, 2.33 СН 305—77, а также п. 11.2.1 «Правил защиты от статического электричества в производствах химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности».

2. Число железобетонных опор в грунте, арматура которых должна иметь металлическое соединение с арматурой траверс и балок в эстакадах, используемых для защитного заземления, определяется из соотношения (3.96).

Значение $Z_{\text{вх}}$ определяется по рис. 3.16 с учетом входного сопротивления, которое должно удовлетворять требованиям ПУЭ к сопротивлению заземляющих устройств, и значений переходного $r_{\text{п}}$ и продольного Z_0 сопротивлений.

Совместное использование железобетонных фундаментов зданий и эстакады в качестве заземлителей. При совместном использовании железобетонных фундаментов производственного здания и эстакады

в качестве естественных заземлителей электроустановок не требуется сооружение искусственных заземлителей, если выполняется соотношение

$$\frac{R_{\phi} |Z_{вх}|}{R_{\phi} + |Z_{вх}|} \leq [R_n], \quad (3.98)$$

где $Z_{вх}$ — модуль входного сопротивления эстакады, Ом;

R_{ϕ} — сопротивление растеканию железобетонных фундаментов производственного здания, Ом;

$[R_n]$ — нормированное значение сопротивления заземляющего устройства рассматриваемой электроустановки, определяемое требованиями ПУЭ, Ом.

Сопротивление растеканию железобетонных фундаментов здания определяется выражением $R_{\phi} = (0,52\rho_{эк})/\sqrt{S}$, где $\rho_{эк}$ — эквивалентное удельное сопротивление земли фундаментного поля здания, Ом · м; S — площадь фундаментного поля, м².

Номограмма для определения $\rho'_{эк}$ дана на рис. 3.15.

При совместном использовании железобетонных фундаментов здания и эстакады в качестве заземлителей электроустановок напряжением выше 1 кВ с эффективно заземленной нейтралью возможен отказ от прокладки заземлителей для выравнивания потенциалов. Условие, при котором возможен отказ от прокладки заземлителей для выравнивания потенциала на территории, занятой электрооборудованием (в том числе у входов и въездов, кроме мест расположения заземляемых нейтралей трансформаторов, короткозамыкателей, вентиляных разрядников и молниеотводов), записывается в виде

$$I_{к\phi} \leq (5,4 + 7 \cdot 10^{-3} \rho'_1) \frac{\sqrt{S}}{\rho_{эк}}, \quad (3.99)$$

где $I_{к\phi}$ — расчетный ток, стекающий в землю с фундаментов здания при однофазном коротком замыкании, кА;

ρ'_1 — удельное сопротивление верхнего слоя земли фундаментного поля здания, Ом · м.

Ток $I_{к\phi}$ определяется по формуле

$$I_{к\phi} = I_k \frac{|Z_{вх}|}{R_{\phi} + |Z_{вх}|}, \quad (3.100)$$

где I_k — ток, стекающий в землю при однофазном коротком замыкании в электроустановке напряжением выше 1 кВ с эффективно заземленной нейтралью, кА.

Рассмотрим примеры расчетов сопротивления растеканию железобетонных фундаментов производственных зданий.

Пример 3.1. Исходные данные: площадь производственного здания из сборного железобетона $S = 2500$ м²; электроустановка напряжением 380 В с заземленной нейтралью; эквивалентное удельное сопротивление земли $\rho_{эк} = 185$ Ом · м. Требуется определить сопротивление фундаментов.

Оцениваем по (3.79) возможность использования железобетонных фундаментов в качестве заземлителей

$$S < S_0,$$

где S_0 определяем по табл. 3.12. Получаем $2500 > 156$.

Определяем сопротивление растеканию фундаментов здания по (3.75):

$$R = 0,5 \frac{185}{\sqrt{2500}} = 1,92 \text{ Ом}.$$

Расчетное значение не превышает допустимого, равного 4 Ом.

Пример 3.2. Исходные данные: площадь машиностроительного завода $S = 84\,100$ м²; каркас здания — стальной; напряжение электроустановки 10/0,4 кВ; $\rho_1 = 500$ Ом · м; $\rho_2 = 100$ Ом · м; $h = 8$ м. Требуется определить сопротивление растеканию фундаментного поля.

По номограмме рис. 3.15 определяем $\rho_{эк.у}$:

$$\rho_{эк.у} = 14 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

Находим

$$\rho_{эк} = \rho_{эк.у} \frac{\rho_2}{10} = 14 \frac{100}{10} = 140 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

Эквивалентное удельное сопротивление можно определить и по (3.76):

$$\rho_{эк} = 500 (1 - e^{-3,6 \cdot 8/290}) + 100 (1 - e^{-0,1 \cdot 290/8}) = 140 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

Сопротивление растеканию фундаментного поля

$$R = 0,52 \frac{140}{290} = 0,26 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

Пример 3.3. Исходные данные: площадь производственного здания $S = 49\,970 \text{ м}^2$; колонны стальные — 136 шт. На каждом фундаменте имеется восемь болтов для крепления колонн длиной 600 мм, диаметром 42 мм. Болты заделываются в бетон марки М150 ($\rho_0 = 200 \text{ Ом} \cdot \text{м}$). Удельное сопротивление верхнего слоя земли $\rho_1 = 80 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, нижнего слоя $\rho_2 = 500 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Эквивалентное удельное сопротивление грунта $\rho_{\text{эк}} = 193 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Требуется определить сопротивление фундаментного поля (заземлителями являются анкерные болты, не соединенные с арматурой фундаментов).

Определяем сопротивление одного анкерного болта:

$$R_6 = \frac{200}{2\pi \cdot 0,6} \ln \frac{4 \cdot 0,6}{0,042} - \frac{200}{2\pi \cdot 0,6} \ln \frac{4 \cdot 0,6}{0,3} + \frac{80}{2\pi \cdot 0,6} \ln \frac{4 \cdot 0,6}{0,3} =$$

$$= 53,1 \cdot 4,04 - 53,1 \cdot 2,08 + 21,2 \cdot 2,08 = 148,2 \text{ Ом}.$$

Кажущийся диаметр электрода в земле с ρ_1

$$d_k = \frac{4 \cdot 0,6}{\exp[(2\pi \cdot 0,6 \cdot 148,2)/80]} = 0,0022 \text{ м}.$$

На рис. 3.17 показана схема расположения анкерных болтов.

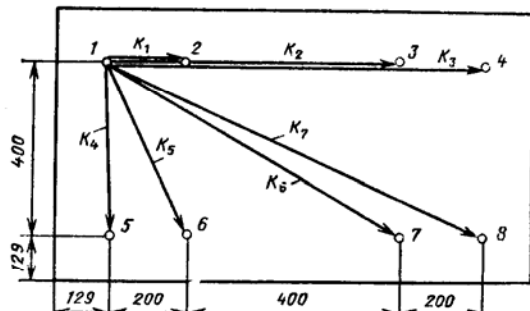


Рис. 3.17. Схема расположения анкерных болтов для определения коэффициентов k_n

Эквивалентное сопротивление анкерных болтов

$$\sum R_6 = \frac{1}{8} \left(\frac{80}{2\pi \cdot 0,6} \ln \frac{4 \cdot 0,6}{0,0022} + \frac{80}{4\pi \cdot 0,6} \ln 41 \cdot 5,8 \cdot 4 \cdot 11 \cdot 9 \cdot 4,5 \cdot 3,55 \right) =$$

$$= 37,4 \text{ Ом}.$$

Эквивалентный диаметр

$$D = \frac{4 \cdot 0,6}{\exp[(2\pi \cdot 0,6 \cdot 37,4)/80]} = 0,41 \text{ м}.$$

$$C = \frac{\sqrt{49\,970}}{2\pi \cdot 136 \cdot 0,6} \left[\ln \frac{8 \cdot 0,6}{0,41} - 1 + \frac{2 \cdot 1,37 \cdot 0,6 \cdot (\sqrt{136} - 1)^2}{\sqrt{49\,970}} \right] = 0,998.$$

Сопротивление фундаментного поля

$$R = 0,998 \frac{193}{\sqrt{49\,970}} = 0,86 \text{ Ом}.$$

Значение эквивалентного сопротивления растеканию заземляющего устройства рекомендуется вычислять по формуле

$$R_{\text{эк}} = \frac{R'R'' - R_a^2}{R' + R'' - 2R_a},$$

где $R_a = \sqrt{\rho'_{\text{эк}} \rho''_{\text{эк}}} / 2\pi a$ — взаимное сопротивление, Ом;

a — расстояние между геометрическими центрами площадей заземляющего устройства, м.

Рассмотрим примеры расчета заземлителей для молниезащиты.

Пример 3.4. Исходные данные: сопротивление растеканию одного фундамента $R_{\text{ф}} = 37,4 \text{ Ом}$; шаг колонн — 6 м; пролет — 24 м; колонны металлические; анкерные болты $l = 600 \text{ мм}$, диаметром $d = 42 \text{ мм}$, в одном фундаменте восемь болтов.

Расчетный случай — удар молнии в угол здания.

При шаге колонн 6 м и пролете 24 м в зону удара молнии будут входить пять фундаментов.

Сопротивление растеканию одного фундамента импульсному току равно:

$$R'_{\text{ф}} = \alpha R_{\text{ф}} = 0,9 \cdot 37,4 = 33,7 \text{ Ом}.$$

Сопротивление зоны равно:

$$R_z = 33,7 / 6 = 5,6 \text{ Ом}.$$

Это сопротивление заземлителя молниезащиты удовлетворяет требованиям II категории.

Пример 3.5. Исходные данные: площадь фундамента $3 \times 3 = 9 \text{ м}^2$. Удельное эквивалентное сопротивление земли $\rho_{\text{эк}} = 500 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, шаг колонн — 12 м, пролет — 24 м. Требуется определить возможность использования фундамента для молниезащиты.

Определяем сопротивление растеканию фундамента:

$$R = 0,52 \frac{500}{3} = 86,7 \text{ Ом}.$$

Сопротивление растеканию фундамента импульсному току равно:

$$R_{\text{ф}} = 0,7 \cdot 86,7 = 60,7 \text{ Ом}.$$

В 25-метровую зону попадают четыре фундамента.

Сопротивление зоны

$$R_3 = 60,7 / 4 = 15,2 \text{ Ом}.$$

Фундаменты данного здания можно использовать для молниезащиты III категории.

Пример 3.6. Расчет напряжения прикосновения при использовании железобетонных фундаментов в качестве заземлителей. Напряжение прикосновения равно:

$$U_{\text{п}} = k_{\text{п}} I_3 R_3,$$

где $k_{\text{п}}$ — коэффициент напряжения прикосновения;

I_3 — ток, стекающий с фундаментов здания, А;

R_3 — сопротивление растеканию заземляющего устройства, Ом.

Допустимое значение этого напряжения определяется из выражения

$$U_{\text{п}} = U + (3/2)(I \rho_1),$$

где U и I — допустимые значения напряжения на теле человека и тока, проходящего через тело человека, зависящие от времени воздействия t ;

ρ_1 — удельное электрическое сопротивление верхнего слоя земли.

В качестве допустимых значений следует принять $U = 250 \text{ В}$, $I = 0,25 \text{ А}$ для $t = 0,2 \text{ с}$ для электроустановок с заземленной нейтралью напряжением до 1 кВ.

При длине производственного здания более 30 м $k_{\text{п}} = 0,1$.

Тогда с учетом значений U и I при $t = 0,2 \text{ с}$ имеем

$$U_{\text{п}} = 250 + 0,375 \rho_1.$$

Используя последнее равенство и выражение (3.99) получаем, кА,

$$I_3 \leq \frac{(250 + 0,375 \rho_1) \sqrt{S}}{0,1 \cdot 0,5 \rho_{\text{эк}}} \leq (5,4 + 7,5 \cdot 10^{-3} \rho_1) \frac{\sqrt{S}}{\rho_{\text{эк}}}.$$

Таким образом, при стекании с фундаментов производственного здания тока I_3 , удовлетворяющего неравенству (3.99), требование электробезопасности в соответствии с ГОСТ 12.1.038—87 будет обеспечено.

По (3.99) можно оценить возможность использования заземляющего устройства по норме на напряжение прикосновения, а также необходимость в сооружении выравнивающих проводников.

Пример 3.7. Исходные данные: производственное здание площадью $49\,970 \text{ м}^2$; удельное электрическое сопротивление верхнего слоя земли $\rho_1 = 80 \text{ Ом} \cdot \text{м}$; эквивалентное удельное сопротивление грунта $130 \text{ Ом} \cdot \text{м}$; расчетный ток однофазного короткого замыкания $I_3 = 5,6 \text{ кА}$.

По формуле (3.99) определяем ток однофазного короткого замыкания, стекающий с фундаментов заземляющего устройства:

$$I_3 \leq (5,4 + 7,5 \cdot 10^{-3} \cdot 80) \frac{\sqrt{49\,970}}{130} \leq 9,62 \text{ кА}.$$

Напряжение прикосновения не превышает допустимое значение, равное 250 В, при $t = 0,2 \text{ с}$ (t — время срабатывания защиты).

Пример 3.8. Исходные данные: площадь подстанции $120 \times 120 \text{ м}^2$; $\rho_1 = 500 \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $\rho_2 = 100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$; расчетный ток однофазного короткого замыкания $I_3 = 8 \text{ кА}$; время отключения $t = 0,2 \text{ с}$. Требуется определить допустимый ток короткого замыкания по условию электробезопасности.

Определяем по формуле

$$I_3 \leq (5,4 + 7,5 \cdot 10^{-3} \cdot 500) \frac{120}{100} \leq 10,7 \text{ кА}.$$

Расчетный ток однофазного короткого замыкания не превышает допустимое значение. Следовательно, не требуется прокладка выравнивающих полюсов, в том числе у входов и въездов на территорию подстанции, кроме мест расположения короткозамыкателей, вентильных разрядников и молниесотводов.

Рассмотрим расчет входного сопротивления эстакады.

Пример 3.9. Исходные данные: длина эстакады $L = 3,65$ км; расстояние между опорами $a = 24$ м; глубина заложения фундамента $l = 6$ м; наибольший горизонтальный размер фундамента $D = 2,6$ м; эквивалентное удельное сопротивление $\rho_{\text{жк}} = 100$ Ом · м. На эстакаде проложено более пяти технологических труб.

Так как $D < 1$, то по (3.93) определяем

$$R_0 = 100 / 6 = 16,6 \text{ Ом.}$$

По (3.92) определяем

$$r_{\text{н}} = (16,6 \cdot 24 + 1,5 \cdot 100) 10^{-3} = 0,43 \text{ Ом} \cdot \text{км.}$$

Входное сопротивление определяется следующим образом. В зависимости от числа труб по Z_0 выбирается семейство кривых (см, рис. 3.16). Для данной эстакады продольное сопротивление принимаем $Z_0 = 0,5$ Ом/км, как и у эстакады с числом труб больше пяти. На оси L откладывается длина эстакады в километрах. На оси $Z_{\text{вх}}$ определяется искомое входное сопротивление. Для рассматриваемого случая $Z_{\text{вх}} = 0,48$ Ом;

3.11. Особенности использования железобетонных фундаментов зданий в качестве заземлителей в агрессивных средах

Влияние параметров защитного покрытия на сопротивление растеканию полусферического заземлителя в земле с удельным электрическим сопротивлением ρ . Приняты допущения: поверхность земли — горизонтальная; заземлитель радиусом r отделен от земли защитным покрытием толщиной Δ , имеющим удельное электрическое сопротивление $\rho_{\text{н}}$. Сопротивление растеканию заземлителя, имеющего антикоррозионную защиту,

$$R' = 0,52 \frac{k\rho_{\text{жк}}}{\sqrt{S}}. \quad (3.101)$$

Электрическое сопротивление 1 м^2 защитного покрытия $R_{\text{н}}$ определяется соотношением

$$R_{\text{н}} = \rho_{\text{н}} \Delta. \quad (3.102)$$

Формула для расчета значений коэффициента k , характеризующего влияние защитного покрытия поверхности железобетонного фундамента

на сопротивление растеканию заземлителя, образованного фундаментным полем с площадью нулевого цикла S ,

$$k = 1 + 3,27 R_{\text{н}} / \rho_{\text{жк}} \sqrt{S}. \quad (3.103)$$

Антикоррозионная защита поверхности фундаментов производственных зданий, подвергающихся воздействию агрессивных грунтовых и производственных вод, принимается по [11]. В соответствии с [11] значения входящего в (3.103) электрического сопротивления покрытия защищаемой поверхности $R_{\text{н}}$ даны для двух состояний гидроизоляции: «отличное» (площадь незащищенных участков составляет не более 1%) и «удовлетворительное» (5—10%). Количественный анализ измеренных ВНИИпроектэлектромонтажом значений сопротивлений растеканию отдельных фундаментов, свай, «кустов» свай, а также фундаментных полей, защищенных битумными покрытиями (от воздействия слабоагрессивных сред) и оклеечными с битумными рулонными материалами (от воздействия среднеагрессивных сред), показал, что ни в одном из измеренных фундаментов не было обнаружено «отличное» состояние изоляции. На этом основании можно сделать предположение о том, что и состояние гидроизоляции защитных покрытий в сильноагрессивных средах не является «отличным», и принять для всех дальнейших расчетов значение $R_{\text{н}}$, соответствующее «удовлетворительному» состоянию гидроизоляции.

Результаты расчетов коэффициента k , выполненных по формуле (3.10) для двух характерных значений \sqrt{S} и наиболее распространенного диапазона удельного электрического сопротивления земли $10^2 \text{ Ом} \cdot \text{м} \leq \rho_{\text{жк}} \leq 5 \cdot 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, представлены в табл. 3.12 и на рис. 3.18.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. Битумное покрытие толщиной 3 мм (слабоагрессивная среда) не оказывает заметного влияния на сопротивление заземлителя. При расчете электрического сопротивления железобетонных фундаментов его можно не учитывать во всем диапазоне изменения удельного сопротивления земли при любых геометрических размерах фундаментного поля.

2. Битумное покрытие толщиной 6 мм (слабоагрессивная среда), битумно-латексное покрытие толщиной 3 мм (слабоагрессивная среда), оклеечное покрытие с битумными рулонными материалами толщиной 4 мм (среднеагрессивная среда) при $\rho_{\text{жк}} \leq 10^2 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ и $\sqrt{S} \leq 100$ м вызывают повышенное сопротивление фундаментного поля на 33%. В остальных случаях влияние этих покрытий на сопротивление фундаментов пренебрежимо мало. В расчетах электрического сопротивления фундаментов влияние этих покрытий следует учитывать только при указанном условии.

3. Битумно-латексное покрытие толщиной 6 мм (слабоагрессивная среда)

при $\sqrt{S} = 100$ м и $\rho_{\text{жк}} = 10^3$ Ом · м вызывает увеличение сопротивления фундаментов на 33%. При $\sqrt{S} = 500$ м это увеличение становится заметным со значения $\rho_{\text{жк}} = 5 \cdot 10^2$ Ом · м. При $\sqrt{S} \leq 100$ м и $\rho_{\text{жк}} \leq 10^2$ Ом · м это покрытие увеличивает сопротивление фундаментов более чем в 4 раза. Однако это обстоятельство не является препятствием для использования железобетонных фундаментов в слабоагрессивных средах.

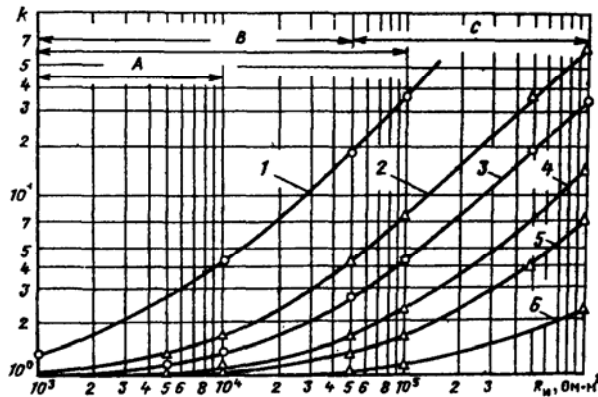


Рис. 3.18. Зависимость коэффициентов k от R_n , $\rho_{\text{жк}}$ и \sqrt{S} при $\rho_{\text{жк}}$, Ом · м:

1, 2 — 100; 3, 5 — 10^3 ; 4 — 500; 6 — $5 \cdot 10^2$; — ○ — $\sqrt{S} = 100$ м;
 — Δ — $\sqrt{S} = 500$ м; зона А — слабоагрессивная среда;
 зона В — среднеагрессивная среда; зона С — сильноагрессивная среда;

4. Оклеечные покрытия с химически стойкими пленочными материалами в два-три слоя (сильноагрессивная среда) при $S \geq 500$ м и $\rho_{\text{жк}} \geq 5 \cdot 10^3$ Ом · м не оказывают заметного влияния на сопротивление железобетонных фундаментов. При снижении сопротивления земли до 10^3 Ом · м (или уменьшении \sqrt{S} до 100 м) эти покрытия вызывают увеличение сопротивления фундаментов на 33%. При $\sqrt{S} \leq 100$ м и $\rho_{\text{жк}} \leq 100$ Ом · м применение покрытия приводит к возрастанию сопротивления фундаментов более чем в 17 раз. Указанное обстоятельство не может быть препятствием для использования железобетонных фундаментов в качестве заземлителей в сильноагрессивных

средах. При расчете электрического сопротивления фундаментов всегда следует учитывать влияние этих покрытий, кроме случая, когда $\sqrt{S} \geq 500$ м, $\rho_{\text{жк}} \geq 5 \cdot 10^3$ Ом · м.

5. Битумно-этинолевые, эпоксидные, каменноугольно-эпоксидные, битумно-эпоксидные и оклещные покрытия, усиленные рулонными материалами с защитной стенкой, во всех случаях оказывают заметное влияние на сопротивление железобетонных фундаментов. Сопротивление фундаментов для первых трех покрытий при $\rho_{\text{жк}} \leq 5 \cdot 10^2$ Ом · м увеличивается в несколько раз, для первых трех покрытий при $\rho_{\text{жк}} \leq 10^2$ Ом · м и для последнего покрытия при $\rho_{\text{жк}} \leq 5 \cdot 10^2$ Ом · м — в десятки раз, для последнего покрытия при $\rho_{\text{жк}} \leq 10^2$ Ом · м и $\sqrt{S} \leq 100$ м — в сотни раз.

Для оценки влияния защитного покрытия на электрические параметры железобетонных фундаментов целесообразно рассмотреть их сопротивления растеканию с учетом сопротивления гидроизоляции. Результаты расчетов сопротивлений фундаментов, выполненные по формулам (3.101)–(3.103) с учетом данных табл. 3.12, представлены на рис. 3.19. На этом же рисунке показаны зависимости нормируемых значений сопротивлений растеканию заземлителей от удельного сопротивления земли для электроустановок напряжением выше 1 кВ с эффективно заземленной нейтралью и напряжением до 1 кВ с заземленной нейтралью.

Из рассмотрения зависимостей $R(\rho_{\text{жк}}, R_n)$ видно, что в крупных производственных зданиях ($\sqrt{S} \geq 500$ м — см. рис. 3.19) применение защитных покрытий в слабоагрессивных средах, а также оклещных с битумными рулонными материалами в среднеагрессивных средах не препятствует использованию их железобетонных фундаментов в качестве единственного заземлителя для электроустановок напряжением выше 1 кВ с эффективно заземленной нейтралью даже при нормировании по сопротивлению растекания заземлителя¹. Более того, это положение оказывается справедливым даже при некоторых видах защитных покрытий, применяемых в сильноагрессивных средах (в частности, при оклещных покрытиях с химически стойкими пленочными материалами в два-три слоя) при условии, что $\rho_{\text{жк}} \geq 150$ Ом · м.

Для крупных производственных зданий ($\sqrt{S} \geq 500$ м) применение защитных покрытий в слабо-, средне- и сильноагрессивных средах не препятствует использованию их железобетонных фундаментов в качестве единственного заземлителя для электроустановок напряжением до 1 кВ с заземленной нейтралью при нормировании по сопротивлению растекания заземлителя.

¹ Здесь и далее принято, что превышение значений над нормированными должно быть не более 10% (для расчетов, основанных на использовании электрических параметров земли, это представляется оправданным).

Таблица 3.12. Значения коэффициента k для различных видов защитных покрытий

Электрическое сопротивление покрытия, $R_{\text{покр}}$, Ом·м	Вариант гидроизоляции защитного покрытия	Вид защитного покрытия	Толщина покрытия или число слоев	Среда	Коэффициент k при различных значениях $\rho_{\text{зем}}$, Ом·м							
					$\sqrt{S} = 100 \text{ м}$				$\sqrt{S} = 500 \text{ м}$			
					10^2	$5 \cdot 10^2$	10^3	$5 \cdot 10^3$	10^2	$5 \cdot 10^2$	10^3	$5 \cdot 10^3$
10^2	1-й	Битумное	3 мм	Слабоагрессивная	1,033	1,007	1,003	1,001	1,007	1,001	1,000	1,000
10^3	1-й	Битумное	6 мм	»	1,327	1,065	1,033	1,007	1,065	1,013	1,007	1,001
	2-й	Битумно-латексное	3 мм	»								
10^4	2-й	Оклеечное с битумным рулонным материалом	4 мм	Среднеагрессивная								
	2-й	Битумно-латексное	6 мм	Слабоагрессивная	4,27	1,65	1,327	1,065	1,65	1,131	1,065	1,013
$5 \cdot 10^4$	3-й	Оклеечное с химически стойким пленочным материалом	Два-три слоя	Сильноагрессивная	17,35	4,27	2,63	1,327	4,27	1,65	1,327	1,065
10^5	3-й	Битумно-этиловое	Три-четыре слоя	Среднеагрессивная	33,7	7,54	4,27	1,65	7,54	2,31	1,65	1,131
	1-й	Эпоксидное, каменноугольно-эпоксидное, битумно-эпоксидное										
10^6	2-й	Оклеечное, усиленное рулонным материалом с защитной стенкой	7,5 мм	Сильноагрессивная	328	66,4	33,7	7,54	66,4	14,1	7,54	2,315

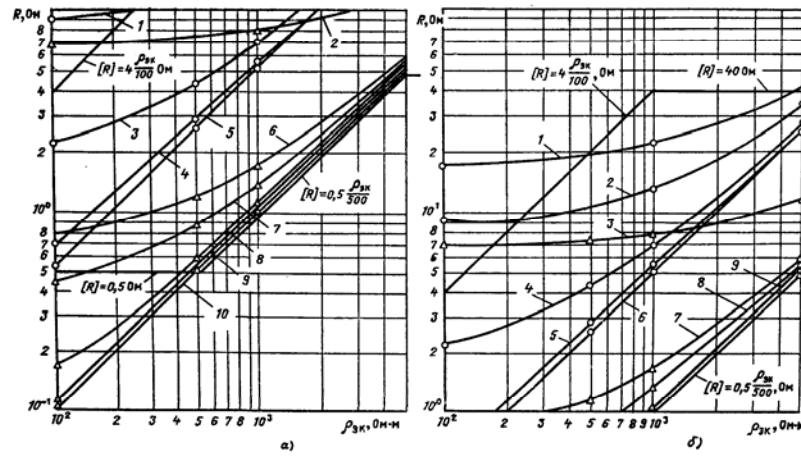


Рис. 3.19. Зависимость сопротивления растеканию железобетонных фундаментов с учетом их гидроизоляции от удельного сопротивления земли:
 а — использование для заземления электроустановок напряжением выше 1 кВ с эффективно замкнутой нейтралью: 1 — $R_{\text{н}} = 5 \cdot 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$; 2 — $R_{\text{н}} = 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$; 3, 8 — $R_{\text{н}} = 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$; 4, 10 — $R_{\text{н}} = 10^2 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$; 6 — $R_{\text{н}} = 10^1 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$; 5, 9 — $R_{\text{н}} = 10^0 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$; 6 — использование для заземления электроустановок напряжением до 1 кВ с замкнутой нейтралью: 1 — $R_{\text{н}} = 10^2 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$; 2 — $R_{\text{н}} = 5 \cdot 10^1 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$; 3 — $R_{\text{н}} = 10^0 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$; 4, 7 — $R_{\text{н}} = 10^1 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$; 5, 8 — $R_{\text{н}} = 10^2 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$; 6, 9 — $R_{\text{н}} = 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$

Исключением является только применение оклеечных покрытий, усиленных рулонными материалами с защитной стенкой толщиной 7,5 мм, в сильноагрессивных средах ($R_{\text{и}} = 10^6 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$) при удельном сопротивлении земли менее $150 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ (см. рис. 3.18).

Для остальных производственных зданий ($\sqrt{S} < 500 \text{ м}$) применение защитных покрытий в слабо- и среднеагрессивных средах не препятствует использованию их железобетонных фундаментов в качестве единственного заземлителя для электроустановок напряжением до 1 кВ с заземленной нейтралью при нормировании по сопротивлению растекания заземлителя. Исключением является только применение битумно-этинолевого покрытия (три-четыре слоя) в среднеагрессивных средах ($R_{\text{и}} = 10^5 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$) при удельном сопротивлении земли менее $500 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Применение защитных покрытий в сильноагрессивных средах для производственных зданий, имеющих $\sqrt{S} < 500 \text{ м}$, ограничивает использование их железобетонных фундаментов в качестве единственного заземлителя для электроустановок напряжением до 1 кВ с заземленной нейтралью при нормировании по сопротивлению растекания заземлителя следующими удельными сопротивлениями земли:

$\rho_{\text{ж}} \geq 250 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ в случае применения оклеечных покрытий с химически стойкими пленочными материалами (два-три слоя);

$\rho_{\text{ж}} \geq 500 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ в случае применения каменноугольно-эпоксидных, битумно-эпоксидных (три-четыре слоя).

Применение для защиты железобетонных фундаментов от воздействия слабо-, средне- и сильноагрессивных сред всех видов защитных покрытий, выполняемых в соответствии со СНиП II-28—73, не препятствует использованию фундаментов производственных зданий в качестве заземлителей промышленных электроустановок, при этом расчет сопротивления растеканию железобетонных фундаментов должен производиться по (3.101)—(3.103) с учетом табл. 3.12.

Обеспечение электрокоррозионной стойкости наряду с обеспечением термической стойкости стальной арматуры и приарматурного слоя бетона является обязательным как в неагрессивных, так и в слабо-, средне- и сильноагрессивных грунтах.

В настоящее время в отечественной практике в качестве основных критериев электрокоррозионной и термической стойкостей принимаются следующие допустимые плотности тока, стекающего с арматуры в бетон: 30 кА/м^2 при токе молнии; 1 кА/м^2 при токе КЗ длительностью до 3 с; 1 А/м^2 ($0,1 \text{ мА/см}^2$) при длительном переменном токе 50 Гц; $0,06 \text{ А/м}^2$ ($0,006 \text{ мА/см}^2$) при длительном постоянном или выпрямленном токе.

Приведенные значения плотностей тока при длительном воздействии пригодны и в наиболее жестких условиях — железобетонные фундаменты в сильноагрессивных грунтах. Для неагрессивных и слабоагрессивных грунтов нормы плотностей тока, очевидно, могут быть увеличены. Однако в на-

стоящее время отсутствуют необходимые данные для изменения этих норм в сторону увеличения. В то же время, как показали теоретические и экспериментальные исследования ВНИИПЭМ, приведенные выше нормы плотностей тока для производственных зданий промышленных предприятий выполняются.

Таким образом, рекомендации о возможности использования в качестве заземлителей железобетонных фундаментов, защищенных от воздействия агрессивных сред, построены с учетом выполнения наиболее жестких норм по предельно допустимым плотностям тока, стекающего со стальной арматуры в приарматурный слой бетона железобетонного фундамента.

3.12. Особенности расчета протяженных заземлителей

3.12.1. Входное сопротивление протяженного заземлителя в неоднородных структурах

Современное состояние теории заземлителей позволяет на стадии проектирования принимать основные технические решения по созданию заземляющих устройств с параметрами, близкими к оптимальным [1]. При этом расчет электромагнитных параметров искусственно создаваемых заземляющих устройств выполняется с учетом заземляющих свойств протяженных строительных и технологических коммуникаций, в том числе трубопроводов, эстакад, а также обсадных труб буровых скважин [10].

Характерной особенностью всех известных методов расчета искусственных и естественных заземлителей является использование предположения о наличии только дискретной неоднородности электрического удельного сопротивления земли в пределах всей зоны растекания тока [1]. Однако, как показывают результаты натуральных измерений, в пределах зоны растекания тока с протяженных заземлителей (трубопроводы, эстакады, обсадные трубы буровых скважин) удельное электрическое сопротивление земли вдоль трассы заземлителя $\rho(x)$, как правило, меняется не дискретно, а непрерывно, точнее, кусочно-непрерывно. При этом закон изменения $\rho(x)$ может быть монотонно убывающим (возрастающим), колоколообразным, седлообразным или может содержать произвольную комбинацию указанных простейших законов.

Будем исходить из предположения о возможности разбиения рассматриваемого протяженного заземлителя на конечное число участков, в пределах каждого из которых закон изменения удельного электрического сопротивления земли вдоль оси заземлителя с заданной точностью может быть аппроксимирован экспоненциальным законом изменения.

Решаемая задача относится к классу задач, охватываемому проводниками с возвратом тока через землю. При этом земля рассматривается как бесконечное однородное полупространство, характеризуемое удельным электрическим сопротивлением ρ . Решение этой задачи для прямолинейного

бесконечно длинного проводника, проложенного параллельно горизонтальной поверхности однородной земли, по которому протекает переменный синусоидальный ток с частотой f , дано в работах Дж. Карсона [31] и Ф. Поллячека [32]. Заметим, что основные результаты работы Ф. Поллячека [32] установлены на основе использования положений, сформулированных Арнольдом Зоммерфельдом в работе [33]. В результате решения трехмерной полевой задачи ими были получены формулы для расчета погонного сопротивления проводника z_0 с учетом проводящих свойств земли.

Погонное сопротивление проводника

$$z_0 = r_a + j\omega \left(L - \frac{\mu}{2} \cdot 10^{-7} \right),$$

где r_a — погонное активное сопротивление проводника, Ом/м;

ω — круговая частота ($\omega = 2\pi f$) с⁻¹;

μ — магнитная проницаемость проводника;

L — погонная индуктивность проводника, Гн/м. Погонная индуктивность бесконечно длинного проводника, расположенного на высоте h над поверхностью однородной земли, рассчитывается по формуле Ф. Поллячека:

$$L = \left(2 \ln \frac{2}{\beta | \chi | R_0} + 1 - j \frac{\pi}{2} - \frac{8j\chi h}{3} \right) \cdot 10^{-7},$$

где β — постоянная Эйлера ($\beta = 1,78107$);

R_0 — расчетный радиус проводника, м;

h — высота проводника над поверхностью земли, м;

$1/\chi$ — параметр, определяющий глубину зоны растекания обратного тока в земле, м.

Параметр χ характеризует электромагнитные свойства системы:

$$\chi^2(\omega) = -4\pi j\omega\sigma \cdot 10^{11},$$

где σ — удельная проводимость земли, См/м.

Одно из приближенных решений задачи получено Оллендорфом [5] и Р. Рюденбергом [34], которые предположили, что прямолинейный бесконечно длинный проводник проложен по оси полуцилиндра (желоба), вырезанного на поверхности однородной земли. Радиус полуцилиндра равен высоте подвеса проводника над горизонтальной поверхностью земли.

При промышленной частоте в реальном диапазоне изменения удельного

сопротивления земли приближенное решение [34] отличается от точного [31], [32] не более чем на 1,5%.

Хотя решение Р. Рюденберга [34] дано для горизонтальной поверхности земли, оно может быть обобщено для оценки электромагнитного поля одиночного проводника, расположенного над поверхностью земли, форма которой существенно отличается от горизонтальной. Для этого в качестве расчетной модели земли, имеющей удельное сопротивление ρ , следует принять землю, поверхность которой образована двумя пересекающимися под произвольным углом φ плоскостями, вдоль линии пересечения которых вырезан желоб радиуса h ; ось желоба совпадает с линией пересечения поверхностей. В этом случае формула Р. Рюденберга для расчета полного сопротивления при частоте переменного тока петли «проводник — земля» может быть записана в виде

$$z_0 = r_a + \pi^2 f \cdot 10^{-7} - j 29 \cdot 10^{-7} f \lg \frac{0,316}{R_0} \sqrt{\frac{\rho \cdot 10^{11}}{\varphi f}}$$

Из рассмотрения формулы следует, что составляющая активного сопротивления проводника, обусловленная потерями энергии в земле, не зависит от формы поверхности земли и определяется постоянным выражением $\pi^2 f \cdot 10^{-7}$.

При расчете z_0 для рассматриваемого случая обсадной трубы буровой скважины следует принимать $\varphi = 2\pi$.

Погонное индуктивное сопротивление бесконечно длинного проводника, вертикально погруженного в землю ($\varphi = 2\pi$), уменьшается примерно на 5% по сравнению с погонным сопротивлением этого же проводника, расположенного на горизонтальной поверхности земли ($\varphi = \pi$). Анализ выполненных исследований выявил достаточно высокую стабильность электрических погонных параметров проводников в широком диапазоне изменения удельного сопротивления земли ρ . Увеличение (уменьшение) удельного сопротивления земли в 10 раз изменяет индуктивное сопротивление проводника всего лишь на $\pm 4\%$ и практически не влияет на активное сопротивление проводника. Поэтому во всех дальнейших расчетах погонное сопротивление вертикально погруженного в землю проводника принимается одинаковым по всей длине проводника.

Формулы Дж. Карсона [31], Ф. Поллячека [32] могут быть рекомендованы и для расчета проводников, вертикально погруженных в неоднородные структуры в диапазоне частот до $25 \cdot 10^3$ Гц. При этом погрешность расчета не превысит 5%.

Фундаментальное теоретическое исследование переходного сопротивления «проводник — земля» выполнено Э. Зунде [36]. В качестве расчетной модели Э. Зунде рассмотрел бесконечно длинный проводник, лежащий на горизонтальной поверхности однородной земли. В 1936 г. Э. Зунде, исходя

из решения трехмерной задачи, получил формулу погонного переходного сопротивления «проводник — земля» [36]:

$$r_n = \frac{\rho}{\pi} \ln \frac{1,12}{R_0 \sqrt{z_0 / r_n}}.$$

Результаты, полученные Э. Зунде в области теории протяженных заземлителей [35], [36], основаны на работе А. Зоммерфельда [37].

Применительно к вертикально погруженному в землю проводнику выражение погонного переходного сопротивления «проводник — земля» записывается в виде

$$r_n = \frac{\rho}{2\pi} \ln \frac{1,12}{R_0 \sqrt{z_0 / r_n}}. \quad (a)$$

Выражение (а) может быть применено для расчета погонного переходного сопротивления r_n вертикального заземлителя конечной длины l , если выполняется неравенство

$$l > l_k,$$

где l_k — критическая длина вертикального заземлителя:

$$l_k = \frac{0,56}{\sqrt{z_0 / r_n}}.$$

При $l < l_k$ процесс стекания тока с заземлителя описывается известными формулами классической теории сосредоточенных заземлителей [1].

Уравнение (а) решается относительно r_n графоаналитическим способом. В рассматриваемом случае для упрощения решения может быть использован метод последовательных приближений. В качестве достаточно хорошего первого приближения для реального диапазона изменения диаметра труб ($d = 0,08 \div 0,50$ м) рекомендуется формула

$$r_n = 2,5\rho \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

Результаты экспериментальной проверки классической теории протяженных заземлителей приведены в работах А. А. Чернышева [38], Г. Плейеля [39], Дж. Риордана [40], Н. Н. Максименко и Г. Г. Ассеева [41], а также в работах [2], [6].

Наличие индуктивной составляющей во входном сопротивлении скважинных заземлителей (стальные трубы диаметром $0,15 \div 0,30$ м, заложённые

на глубину 300—400 м) отмечено Н. Н. Максименко и Г. Г. Ассеевым в статье [41]. Эта работа выполнена на основе математической модели, приводящей к известному уравнению Д. А. Стреттона [42]. Измерения входного сопротивления упомянутых протяженных заземлителей выявили угол сдвига фаз, равный 36° , что согласуется с данными расчета. Установлено, что для заземлителей малых длин можно пренебречь влиянием индуктивности и входное сопротивление заземлителя можно оценить из известных соотношений, полученных при анализе поля постоянных токов. Влияние индуктивности начинает сказываться для рассматриваемых в работе условий при длине скважинного заземлителя более 200 м (протяженный заземлитель). При меньших длинах можно пользоваться известными формулами, определяющими сопротивление растеканию заземлителя без учета индуктивности.

Детальный анализ влияния индуктивности на погрешность расчета входного сопротивления протяженного заземлителя проведен в [30]. В частности, установлено, что для реального диапазона изменения диаметра обсадных труб буровых скважин ($0,08 \div 0,50$ м), используемых в качестве протяженных заземлителей, погрешность расчета входного сопротивления без учета индуктивности превышает 20%, если длина трубы не менее 500 м при удельном сопротивлении земли $\rho \geq 100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, и не менее 150 м, если $\rho \leq 10 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

В работе [30] также дано решение задачи определения входного сопротивления протяженного скважинного заземлителя в двух- и трехслойной земле применительно к условиям промышленных районов Крайнего Севера (в пределах каждого слоя земля принимается однородной).

Расчеты входного сопротивления протяженного скважинного заземлителя в трехслойной земле, выполненные по инженерному методу [30], дали результаты, отличающиеся от точного метода [41], основанного на методологии Д. А. Стреттона [42], не более чем на 5% [30].

Будем исходить из предположения о том, что значение частоты тока, стекающего с протяженного заземлителя, ограничено диапазоном $50 \text{ Гц} \div 25 \text{ кГц}$. Нижний порог диапазона — значение частоты переменного тока промышленных электроустановок в длительных режимах (нормальных и вынужденных), а также в аварийных режимах — ОКЗ. Обычно при использовании обсадной трубы буровой скважины (ОТС) в качестве защитного и (или) рабочего заземляющего устройства промышленной электроустановки рассмотрение электромагнитных процессов производится при этой частоте (50 Гц).

Исследование электромагнитных процессов с целью приближенной оценки молниезащитных свойств ОТС рекомендуется выполнять при частоте 25 кГц (что соответствует длительности фронта волны импульса тока при прямом ударе молнии (ПУМ) $\tau_{\phi} = 10 \text{ мкс}$).

Примем следующие допущения.

1. Протяженный вертикальный заземлитель образован погруженной в землю однородной металлической трубой наружного (расчетного) радиуса R_0 , имеющей длину соприкосновения с землей $l \geq l_k$ (рис. 3.20).

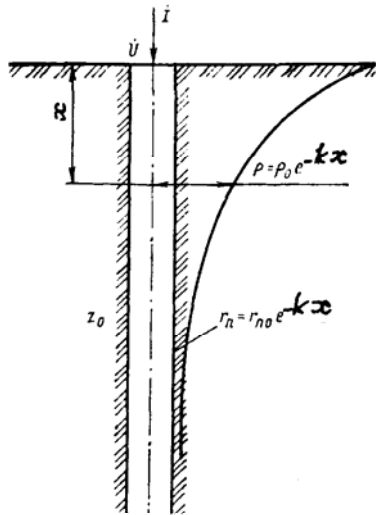


Рис. 3.20. Расчетная схема скважинного заземлителя при непрерывном изменении удельного сопротивления земли по глубине

2. Погонное продольное сопротивление металлической трубы z_0 на всем протяжении постоянно.

3. Переменный ток с заданными амплитудой I_0 и круговой частотой $\omega (I_0 = I_0 e^{j\omega t})$ подводится к верхнему концу заземлителя, расположенному на уровне дневной поверхности земли, строго вертикально. Второй электрод, связывающий второй полюс источника тока с землей, удален в бесконечность.

4. Земля, в которой расположен заземлитель, представляет идеальное бесконечное полупространство, удельное электрическое сопротивление которого изменяется по глубине по закону

$$\rho = \rho_0 e^{-kx} \quad (3.104)$$

где ρ_0 — удельное электрическое сопротивление земли на ее поверхности ($x = 0$);

k — вещественное число, характеризующее скорость изменения удельного сопротивления земли по глубине в направлении вертикальной оси x .

5. Погонное переходное сопротивление протяженного заземлителя в соответствии с [2] изменяется по закону

$$r_n(x) = r_{n0} e^{-kx}, \quad (3.105)$$

где

$$r_{n0} = 2,5\rho_0 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

6. Сопротивления z_0 и r_n не зависят от амплитуды тока во всем возможном диапазоне его изменения. Значения z_0 , r_n могут быть определены для конкретных условий по известным формулам [2], [31], [32], [34].

Соответствующие принятым допущениям дифференциальные уравнения, связывающие ток $I(j\omega)$ и потенциал $U(j\omega)$ протяженного заземлителя

при $\omega = \text{const}$ запишутся в виде известных уравнений длинной линии с параметрами, изменяющимися вдоль линии в функции x [2]:

$$\frac{d^2 \dot{U}}{dx^2} - \left(\frac{d}{dx} \ln \gamma Z_B \right) \frac{d\dot{U}}{dx} - \gamma^2 \dot{U} = 0; \quad (3.106)$$

$$\frac{d^2 \dot{I}}{dx^2} + \left(\frac{d}{dx} \ln \frac{Z_B}{\gamma} \right) \frac{d\dot{I}}{dx} - \gamma^2 \dot{I} = 0, \quad (3.107)$$

где $\dot{U} = U_\phi e^{j\omega t}$, $\dot{I} = I_\phi e^{j\omega t + \varphi}$ — потенциал и ток протяженного заземлителя при $\omega = \text{const}$ в произвольном сечении с координатой x :

$$Z_B = Z_{B0} e^{-\frac{1}{2} kx}; \quad (3.108)$$

$$\gamma = \gamma_0 e^{\frac{1}{2} kx}; \quad (3.109)$$

$$Z_{B0} = \sqrt{z_0 r_{n0}}; \quad (3.110)$$

$$\gamma_0 = \sqrt{z_0 / r_{n0}}. \quad (3.111)$$

Решение уравнений (3.106), (3.107) для случая бесконечно длинного заземлителя ($l \rightarrow \infty$); при $k > 0$

$$\dot{U}(x) = j^{-1} \frac{H_0 \left(2j \frac{|\gamma_0|}{k} e^{\frac{1}{2} kx} \right)}{H_1 \left(2j \frac{|\gamma_0|}{k} \right)} \dot{I}_0 Z_{B0}; \quad (3.112)$$

$$\dot{I}(x) = \frac{H_1 \left(2j \frac{|\gamma_0|}{k} e^{\frac{1}{2} kx} \right)}{H_1 \left(2j \frac{|\gamma_0|}{k} \right)} \dot{I}_0 e^{\frac{1}{2} kx}. \quad (3.113)$$

$$Z_{\text{вх}} = j^{-1} \frac{H_0\left(2j \frac{|\gamma_0|}{k}\right)}{H_1\left(2j \frac{|\gamma_0|}{k}\right)} Z_{\text{в0}}. \quad (3.114)$$

при $k < 0$

$$\dot{U}(x) = \frac{1}{j} \frac{J_0\left(-2j \frac{\gamma_0}{|k|} e^{-\frac{1}{2}|k|x}\right)}{J_1\left(-2j \frac{\gamma_0}{|k|}\right)} I_0 Z_{\text{в0}}; \quad (3.115)$$

$$\dot{I}(x) = \frac{J_1\left(\frac{-2j\gamma_0}{|k|} e^{-\frac{1}{2}|k|x}\right)}{J_1\left(-2j \frac{\gamma_0}{|k|}\right)} e^{-\frac{1}{2}|k|x} I_0. \quad (3.116)$$

$$Z_{\text{вх}} = -\frac{1}{j} \frac{I_0\left(2 \frac{\gamma_0}{|k|}\right)}{I_1\left(2 \frac{\gamma_0}{|k|}\right)} Z_{\text{в0}}, \quad (3.117)$$

где $H_{0(1)}(jv)$ — функции Ганкеля нулевого и первого порядка, соответственно, от комплексного аргумента [18],

$I_0\left(2 \frac{\gamma_0}{|k|}\right)$, $I_1\left(2 \frac{\gamma_0}{|k|}\right)$ — модифицированные функции Бесселя нулевого и первого порядка, соответственно [18].

Потенциал на поверхности земли на расстоянии R от обсадной трубы буровой скважины в соответствии с известной методикой расчета [2] определяется выражением при $k > 0$.

$$\dot{U}_3(R; j\omega) = \frac{S_0\left(\frac{\gamma_0}{\sigma_m} R\right) - N_0\left(\frac{\gamma_0}{\sigma_m} R\right)}{S_0\left(\frac{\gamma_0}{\sigma_m} R_0\right) - N_0\left(\frac{\gamma_0}{\sigma_m} R_0\right)} \sigma_m Z_{\text{в0}} \dot{I}_0(j\omega), \quad (3.118)$$

где

$$\sigma_m = \frac{1}{j} \frac{H_0\left(2j \frac{\gamma_0}{k}\right)}{H_1\left(2j \frac{\gamma_0}{k}\right)};$$

при $k < 0$

$$\dot{U}_3(R; j\omega) = \frac{S_0\left(\frac{\gamma_0}{\sigma_6} R\right) - N_0\left(\frac{\gamma_0}{\sigma_6} R\right)}{S_0\left(\frac{\gamma_0}{\sigma_6} R_0\right) - N_0\left(\frac{\gamma_0}{\sigma_6} R_0\right)} \sigma_6 Z_{\text{в0}} \dot{I}_0(j\omega), \quad (3.119)$$

$$\text{где } \sigma_6 = -\frac{1}{j} \frac{I_0\left(2 \frac{\gamma_0}{|k|}\right)}{I_1\left(2 \frac{\gamma_0}{|k|}\right)};$$

$S_0(v)$ — функция Струве [15];

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

Формулы (118), (119) определяют потенциал поверхности земли через разность двух асимптотически приближающихся к одному значению функций. Для инженерных расчетов можно воспользоваться зависимостью $S_0(\gamma R) - N_0(\gamma R)$, представленной графически в двойном логарифмическом масштабе для значений аргумента $0 \leq \gamma R < 100$ [2].

Полученные формулы позволяют рассчитывать напряжение прикосновения и шаговое напряжение вблизи от обсадной трубы буровой скважины, используемой в качестве естественного заземлителя.

В случае стекания с протяженного заземлителя несинусоидального переменного тока, состоящего из отдельных гармоник вида

$$\dot{I}_{0(2n+1)} = I_{0(2n+1)} e^{j(2n+1)\omega_0 t + \varphi_{2n+1}},$$

решение для потенциала протяженного заземлителя определяется выражением [44]:

$$u_0(t) = \sum_{n=0}^{\infty} Z_{\text{вх}}(j[2n+1]\omega_0) I_{0(2n+1)} e^{j(2n+1)\omega_0 t + \varphi_{2n+1}},$$

где $Z_{\text{вх}}(j[2n+1]\omega_0)$ — входное сопротивление протяженного заземлителя, определяемое формулами (114)—(117).

В случае стекания с протяженного заземлителя непериодического тока (например, импульса тока молнии), определяемого спектральной плотностью комплексных амплитуд колебаний,

$$I(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} i(t) e^{-j\omega t} dt,$$

решение для потенциала протяженного заземлителя дается выражением [44]

$$u(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} Z_{\text{вх}}(j\omega) I(j\omega) e^{j\omega t} d\omega,$$

где $Z(j\omega)$ — входное сопротивление протяженного заземлителя, определяемое теми же формулами (114)—(117).

Как уже отмечалось, для приближенной оценки молниезащитных свойств ОТС можно воспользоваться выражениями (106)—(119) подставив в них $f = 25 \cdot 10^3$ Гц. Эта рекомендация применима к структурам, удовлетворяющим условию

$$\varepsilon\rho \leq 1,13 \cdot 10^7,$$

где ε — относительная диэлектрическая проницаемость рассматриваемой неоднородной структуры (горной породы) при частоте $25 \cdot 10^3$ Гц.

При этом предполагается, что для ρ и ε справедливы ограничения: $10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{ м} \leq \rho \leq 10^7 \text{ Ом} \cdot \text{ м}$; $1 \leq \varepsilon \leq 10^2$.

Для инженерных расчетов при токах промышленной частоты можно рекомендовать формулу (114) если выполняются условия:

$$\left. \begin{aligned} l &\geq (7/k); \\ l &\geq 0,56/|\gamma_3|, \end{aligned} \right\} \quad (3.120)$$

где γ_3 — эквивалентный коэффициент распространения протяженного вертикального заземлителя;

$$\gamma_3 = z_0/Z_{\text{вх}}.$$

Введем обозначение

$$\sigma = \frac{Z_{\text{вх}}}{Z_{\text{в0}}}, \quad (3.121)$$

которое назовем относительным значением модуля входного сопротивления протяженного заземлителя при $l \rightarrow \infty$ в неоднородной структуре, удельное электрическое сопротивление которой изменяется по глубине по экспоненциальному закону.

При малых значениях аргумента ($k > 0$)

$$\frac{2|\gamma_0|}{k} \leq 0,15 \quad (3.122)$$

можно воспользоваться известными асимптотическими разложениями функций Ганкеля от мнимого аргумента [18], тогда с погрешностью, не превышающей 5%, из (114) с учетом (122), получим

$$\sigma = 2 \frac{|\gamma_0|}{k} \ln \frac{k}{1,781|\gamma_0|}. \quad (3.123)$$

Результаты расчета зависимости

$$\sigma = \sigma(\rho_0, k, |z_0|) \quad (3.124)$$

представлены на рис. 3.21 для возможного диапазона изменения параметров ρ_0, k, z_0 в условиях Российского Севера.

Применение зависимостей $|\sigma|(\rho_0, k, z_0)$ [см. рисунок] позволяет свести процедуру определения входного сопротивления ОТС, используемой в качестве заземляющего устройства электроустановки, к расчету по формуле

$$Z_{\text{вх}} = 0,05 \sqrt{|z_0| \rho_0 \cdot 10^3 |\sigma|}, \quad (3.125)$$

где $|\sigma|$ — значение относительного входного сопротивления, определяемое для известных ρ_0, k, z_0 по рис. 3.21.

Пример расчета. Требуется определить входное сопротивление обсадной трубы буровой скважины длиной $l = 0,8 \cdot 10^3$ м при промышленной частоте. Удельное электрическое сопротивление земли на ее поверхности $\rho_0 = 5 \cdot 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{ м}$. В результате вертикального электрического зондирования установлено, что $k = 10$. Погонное продольное сопротивление обсадной трубы скважины $|z_0| = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ Ом/м}$. Поскольку $kl > 7$, для решения можно воспользоваться зависимостями $|\sigma|(\rho_0, k, |z_0|)$, рассчитанными для бесконечно длинного заземлителя по формуле (123).

Из рисунка находим $|\sigma| = 0,0567$. Подставляя найденное значение в формулу (125), получаем $|Z_{вх}| = 0,45 \text{ Ом}$.

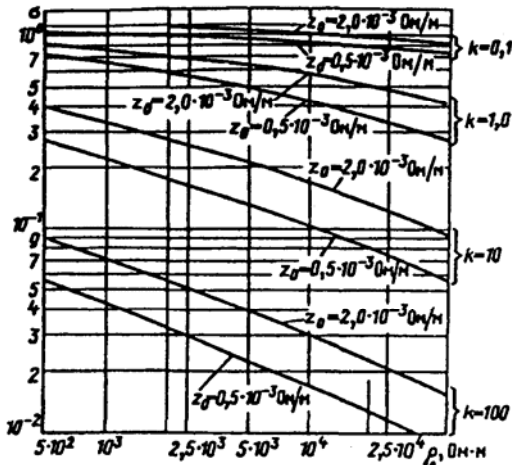


Рис. 3.21. Зависимость относительного значения модуля входного сопротивления вертикального протяженного заземлителя $|\sigma|$, в земле, удельное электрическое сопротивление ρ которой изменяется по глубине по экспоненциальному закону, от удельного электрического сопротивления земли на ее поверхности ρ_0 , коэффициента k и модуля погонного продольного сопротивления заземлителя $|z_0|$ ($f = 50 \text{ Гц}$)

Изложенная методика расчета протяженных заземлителей разработана применительно к вертикальному протяженному заземлителю в неоднородных структурах (земля, морская вода), удельное электрическое сопротивление которых $\rho(x)$ может быть описано кусочно-непрерывной функцией глубины (x) , в предположении, что вертикальный заземлитель может быть разбит на конечное число участков, в пределах каждого из которых закон изменения $\rho(x)$ в функции глубины может быть с наперед заданной точностью аппроксимирован нарастающей или убывающей экспонентой.

Однако все положения методики, равно как и дифференциальные уравнения (106), (107) и их решение (112)—(117), могут быть распространены на горизонтальные протяженные заземлители, в том числе на трубопроводы и технологические эстакады [2], [10], [45], проложенные в земле или на ее поверхности, имеющей горизонтальную неоднородность, если изменение удельного электрического сопротивления последней вдоль трассы горизонтального заземлителя удовлетворяет сформулированным выше условиям.

3.12.2. Молниезащитные свойства обсадной трубы буровой скважины

Будем исходить из предположения о том, что в момент времени $t = 0$ в буровую скважину ударяет однополярный импульс тока молнии, форма волны которого $i(t)$ описывается выражением [48]:

$$i(t) = \frac{I}{m} \cdot \frac{(t/\tau_1)^{10}}{1 + (t/\tau_1)^{10}} \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right), \quad (3.126)$$

где I — максимальное значение тока импульса молнии, кА;

m — поправочный коэффициент;

t — время, мкс;

τ_1 — постоянная времени фронта импульса, мкс ($0,454 \text{ мкс} \leq \tau_1 \leq 19 \text{ мкс}$);

τ_2 — постоянная времени хвоста импульса, мкс ($143 \text{ мкс} \leq \tau_2 \leq 485 \text{ мкс}$).

Расчетные значения параметров m , τ_1 , τ_2 , а также T_1 (расчетная длительность фронта импульса тока молнии) и T_2 (расчетная длительность импульса тока молнии), регламентированные стандартом [48], приведены в табл. 3.13.

Таблица 3.13. Расчетные значения параметров импульса тока молнии

Параметры	Первый импульс	Последующий импульс
m	0,930	0,993
τ_1 , мкс	19	0,454
τ_2 , мкс	485	143
T_1 , мкс	10	0,25
T_2 , мкс	350	100

Примем следующие дополнения.

1. Обсадная труба буровой скважины наружного расчетного радиуса R_0 имеет длину соприкосновения с неоднородной горной породой не менее критической, определяемой выражением [47]:

$$l_k = \frac{0,56}{\sqrt{z/r_n}},$$

где z — погонное продольное сопротивление обсадной трубы при расчетной частоте f_0 , Ом/м;

r_n — погонное переходное сопротивление «обсадная труба-горная порода» при расчетной частоте f_0 , Ом · м.

2. К верхнему концу обсадной трубы, расположенному на уровне дневной поверхности горной породы ($x = 0$), в момент времени $t = 0$ подводится импульс тока молнии, форма волны которого описывается выражением (126).

3. Неоднородная горная порода, в которой расположена обсадная труба, представляет идеальное бесконечное полупространство, удельное электрическое сопротивление которого изменяется по глубине по закону

$$\rho = \rho_0 e^{-kx},$$

где ρ_0 — удельное электрическое сопротивление горной породы на ее поверхности ($x = 0$);

k — коэффициент (положительный или отрицательный), характеризующий скорость изменения удельного электрического сопротивления горной породы по глубине в направлении вертикальной оси x , m^{-1} .

4. Горная порода во всех точках заполняемого ею полупространства удовлетворяет условию [47]:

$$\epsilon \rho \leq 1,13 \cdot 10^7,$$

где ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость в рассматриваемой точке горной породы при частоте f_0 . При этом предполагается, что для ρ и ϵ справедливы ограничения $10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{м} \leq \rho \leq 10^7 \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $1 \leq \epsilon \leq 10^2$.

5. Максимальная плотность тока, стекающего при п. у. м. с протяженно-го заземлителя в горную породу, ниже порогового значения, при котором возможно искрообразование [49]:

$$j \leq \frac{3 \cdot 10^5}{\rho_0}, \text{ А/м}^2$$

6. Погонное переходное сопротивление обсадной трубы в соответствии с [47] изменяется по закону

$$r_{\text{п}}(x) = r_{\text{по}} e^{-kx},$$

где

$$r_{\text{по}} = \frac{\rho_0}{2\pi} \ln \frac{1,12}{R_0 \sqrt{z/r_{\text{по}}}}$$

7. Погонное продольное сопротивление обсадной трубы z на всем ее протяжении постоянно и равно погонному продольному сопротивлению этой трубы при расчетной частоте f_0 , методика определения которой дана в стандарте [48]. Значения сопротивления $z(f_0)$ и $r_{\text{по}}(f_0)$, рассчитываются по известным формулам [2], [31], [32].

Соответствующие принятым допущениям дифференциальные уравнения, связывающие ток $i(x, t)$ и потенциал $u(x, t)$ обсадной трубы в произвольный момент времени t , запишутся в виде известных уравнений длинной линии с параметрами, изменяющимися вдоль линии в функции x [47]:

$$\left. \begin{aligned} -\frac{\partial u(x, t)}{\partial x} &= L \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} + r_a i(x, t) \\ -\frac{\partial i(x, t)}{\partial x} &= \frac{1}{r_{\text{по}}} \cdot e^{kx} u(x, t), \end{aligned} \right\} \quad (3.127)$$

где L — погонная индуктивность обсадной трубы, Гн/м;

r_a — погонное активное сопротивление протяженного заземлителя, Ом/м.

Переходя к преобразованным по Лапласу функциям $\bar{u}(p)$ и $\bar{i}(p)$ [51] и выполняя разделение переменных, получим

$$\frac{d^2 \bar{u}(p)}{dx^2} - \bar{\gamma}_0^2 e^{kx} \bar{u}(p) = 0, \quad (3.128)$$

$$\frac{d^2 \bar{i}(p)}{dx^2} - k \frac{d\bar{i}(p)}{dx} - \bar{\gamma}_0^2 e^{kx} \bar{i}(p) = 0, \quad (3.129)$$

где $\bar{\gamma}_0 = \sqrt{\bar{z}/r_{\text{по}}}$,
 $\bar{z} = pL + r_a$.

Решая уравнения (128), (129) для сформулированных условий задачи, находим
при $k > 0$

$$\bar{u}(x) = \frac{1}{j} \frac{H_0^{(1)} \left(2j \frac{\bar{\gamma}_0}{k} e^{\frac{1}{2} kx} \right)}{H_1^{(1)} \left(2j \frac{\bar{\gamma}_0}{k} \right)} \cdot \bar{i}_0 Z_{\text{во}}, \quad (3.130)$$

$$\bar{i}(x) = \frac{H_0^{(1)}\left(2j \frac{\bar{\gamma}_0}{k} e^{\frac{1}{2}kx}\right)}{H_1^{(1)}\left(2j \frac{\bar{\gamma}_0}{k}\right)} \cdot \bar{i}_0 e^{\frac{1}{2}kx}, \quad (3.131)$$

при $k < 0$

$$\bar{u}(x) = \frac{I_0\left(2 \frac{\bar{\gamma}_0}{|k|} e^{-\frac{1}{2}|k|x}\right)}{I_1\left(2 \frac{\bar{\gamma}_0}{|k|}\right)} \bar{i}_0 Z_{\text{во}}, \quad (3.132)$$

$$\bar{i}(x) = \frac{I_1\left(2 \frac{\bar{\gamma}_0}{|k|} e^{-\frac{1}{2}|k|x}\right)}{I_1\left(2 \frac{\bar{\gamma}_0}{|k|}\right)} \bar{i}_0 e^{-\frac{1}{2}|k|x}, \quad (3.133)$$

где $Z_{\text{во}} = \sqrt{\bar{z}r_{\text{по}}}$,

$H_{0(1)}^{(1)}(j\nu)$ — функции Ганкеля нулевого и первого порядка соответственно [18];

$I_{0(1)}(j\nu)$ — модифицированные функции Бесселя нулевого и первого порядка, соответственно [18].

Потенциал на дневной поверхности горной породы на расстоянии R от буровой скважины $\bar{u}_3(R)$ в соответствии с [2] определяется выражениями

при $k > 0$

$$\bar{u}_3(R) = \frac{S_0\left(\frac{\bar{\gamma}_0}{\sigma_M} R\right) - N_0\left(\frac{\dot{\gamma}_0}{\sigma_M} R\right)}{S_0\left(\frac{\bar{\gamma}_0}{\sigma_M} R_0\right) - N_0\left(\frac{\dot{\gamma}_0}{\sigma_M} R_0\right)} \sigma_M Z_{\text{во}} \bar{i}_0, \quad (3.134 \text{ а})$$

при $k < 0$

$$\bar{u}_3(R) = \frac{S_0\left(\frac{\bar{\gamma}_0}{\sigma_B} R\right) - N_0\left(\frac{\bar{\gamma}_0}{\sigma_B} R\right)}{S_0\left(\frac{\bar{\gamma}_0}{\sigma_B} R_0\right) - N_0\left(\frac{\bar{\gamma}_0}{\sigma_B} R_0\right)} \sigma_B Z_{\text{во}} \bar{i}_0, \quad (3.134 \text{ б})$$

$$\sigma_M = \frac{1}{j} \frac{H_0\left(2j \frac{\bar{\gamma}_0}{k}\right)}{H_1\left(2j \frac{\bar{\gamma}_0}{k}\right)}; \quad (3.135 \text{ а})$$

$$\sigma_B = \frac{I_0\left(2 \frac{\bar{\gamma}_0}{|k|}\right)}{I_1\left(2 \frac{\bar{\gamma}_0}{|k|}\right)}; \quad (3.135 \text{ б})$$

где $S_0(\nu)$ — функция Струве [15],

$N_0(\nu)$ — функция Неймана-Бесселя второго рода нулевого порядка [18].

Формулы (134)-(135) определяют потенциал поверхности земли через разность двух асимптотически приближающихся к одному значению функций. Для инженерных расчетов можно воспользоваться зависимостью $S_0(\gamma R) - N_0(\gamma R)$, представленной графически в двойном логарифмическом масштабе для значений аргумента $0 \leq \gamma R < 100$ [2].

Для упрощения дальнейших преобразований аппроксимируем импульс тока молнии, определяемый выражением (126), разностью двух экспоненциальных функций*

$$i_0(t) = \frac{I}{m} (e^{-at} - e^{-\beta t}), \quad (3.136)$$

или в преобразованном по Лапласу виде

$$\bar{i}_0 = \frac{I}{m} \left(\frac{1}{p+a} - \frac{1}{p+\beta} \right). \quad (3.137)$$

* Эта аппроксимация соответствует гипотезе об одновременном разряде через один канал молнии двух противоположно заряженных пар зарядов.

Переходя от преобразованных по Лапласу функций $\bar{u}(x)$ и $\bar{i}(x)$ к их оригиналам $u(x, t)$ и $i(x, t)$ в соответствии с известной формулой обращения Римана-Меллина [51], получим при $k > 0$

$$u(x, t) = \frac{I\sqrt{Lr_{\text{по}}}}{\pi\sqrt{\pi mj}} \frac{K_0\left(2\frac{\gamma_0}{k}e^{\frac{1}{2}kx}\right)}{K_1\left(2\frac{\gamma_0}{k}\right)} \cdot \Omega(\alpha, \beta, t), \quad (3.138)$$

$$i(x, t) = -\frac{Ie^{-\frac{1}{2}kx}}{2\pi mj} \frac{K_1\left(2\frac{\gamma_0}{k}e^{\frac{1}{2}kx}\right)}{K_1\left(2\frac{\gamma_0}{k}\right)} \cdot E(\alpha, \beta, t), \quad (3.139)$$

при $k < 0$

$$u(x, t) = \frac{I\sqrt{Lr_{\text{по}}}}{\pi\sqrt{\pi mj}} \frac{I_0\left(2\frac{\gamma_0}{|k|}e^{-\frac{1}{2}|k|x}\right)}{I_1\left(2\frac{\gamma_0}{|k|}\right)} \cdot \Omega(\alpha, \beta, t), \quad (3.140)$$

$$i(x, t) = \frac{Ie^{-\frac{1}{2}kx}}{2\pi mj} \frac{I_1\left(2\frac{\gamma_0}{|k|}e^{-\frac{1}{2}|k|x}\right)}{I_1\left(2\frac{\gamma_0}{|k|}\right)} \cdot E(\alpha, \beta, t), \quad (3.141)$$

где

$$\Omega(\alpha, \beta, t) = \sqrt{\beta} D(\sqrt{\beta t}) - \sqrt{\alpha} D(\sqrt{\alpha t}), \quad (3.142)$$

$$D(\sqrt{\mu t}) = e^{-\mu t} \int_0^{\sqrt{\mu t}} e^{\lambda^2} d\lambda. \quad (3.143)$$

$$E(\alpha, \beta, t) = e^{-\alpha t} - e^{-\beta t} \quad (3.144)$$

Значения интеграла Досона — $D(\sqrt{\mu t})$ протабулированы [53].

Зависимости $\Omega(\alpha, \beta, t)$ и $E(\alpha, \beta, t)$ для условий, соответствующих первому импульсу тока молнии ($T_1 = 10$ мкс, $T_2 = 350$ мкс), представлены на рис. 3.22.

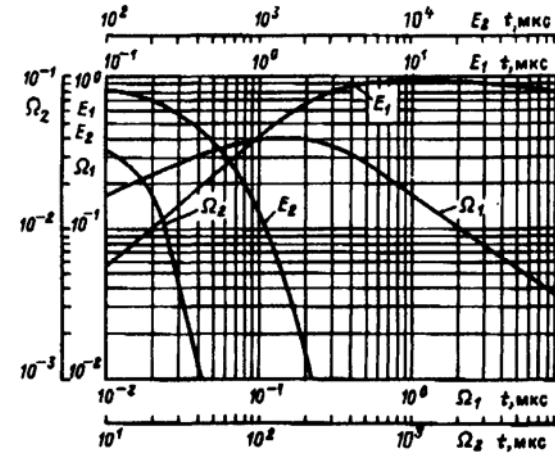


Рис. 3.22. Зависимости $E(\alpha, \beta, t)$ и $\Omega(\alpha, \beta, t)$ для условий, соответствующих первому импульсу тока молнии ($T_1 = 10$ мкс, $T_2 = 350$ мкс).

Обозначено:

E_1 — (0,1 мкс $\leq t \leq 100$ мкс), E_2 — (100 мкс $\leq t \leq 2200$ мкс),

Ω_1 — (0,01 мкс $\leq t \leq 10$ мкс), Ω_2 — (10 мкс $\leq t \leq 220$ мкс).

Для оценки молниезащитных свойств обсадных труб буровых скважин наибольший интерес представляет значения потенциала при $x = 0$: при $k > 0$

$$u(x = 0, t) = \frac{I\sqrt{Lr_{\text{по}}}}{\pi\sqrt{\pi mj}} \cdot \sigma_M \Omega(\alpha, \beta, t), \quad (3.145)$$

при $k < 0$

$$u(x=0, t) = \frac{I\sqrt{Lr_{по}}}{\pi\sqrt{\pi mj}} \cdot \sigma_{\delta}\Omega(\alpha, \beta, t), \quad (3.146)$$

где

$$\sigma_{\text{м}} \left(2 \frac{\gamma_0}{k} \right) = \frac{K_0 \left(2 \frac{\gamma_0}{k} \right)}{K_1 \left(2 \frac{\gamma_0}{k} \right)}, \quad (3.147)$$

$$\sigma_{\text{б}} \left(2 \frac{\gamma_0}{k} \right) = \frac{I_0 \left(2 \frac{\gamma_0}{k} \right)}{I_1 \left(2 \frac{\gamma_0}{k} \right)}, \quad (3.148)$$

$K_{0(1)}$ — модифицированная функция Ганкеля или функция Макдональда нулевого и первого порядка, соответственно [18]. Функции $K_0(v)/K_1(v)$ и $I_0(v)/I_1(v)$ протабулированы [18].

Потенциал на дневной поверхности горной породы на расстоянии R от буровой скважины $u_3(R, t)$ определяется в соответствии с (134) — (135) и (145), (148) формулами при $k > 0$

$$u_3(R, t) = \frac{I\sqrt{Lr_{по}}}{\pi\sqrt{\pi mj}} \cdot \eta_{\text{м}}\sigma_{\text{м}}\Omega(\alpha, \beta, t), \quad (3.149)$$

при $k < 0$

$$u_3(R, t) = \frac{I\sqrt{Lr_{по}}}{\pi\sqrt{\pi mj}} \cdot \eta_{\text{б}}\sigma_{\text{б}}\Omega(\alpha, \beta, t), \quad (3.150)$$

где

$$\eta_{\text{м}} = \frac{S_0 \left(\frac{\gamma_0}{\sigma_{\text{м}}} R \right) - N_0 \left(\frac{\gamma_0}{\sigma_{\text{м}}} R \right)}{S_0 \left(\frac{\gamma_0}{\sigma_{\text{м}}} R_0 \right) - N_0 \left(\frac{\gamma_0}{\sigma_{\text{м}}} R_0 \right)}, \quad (3.151)$$

$$\eta_{\text{б}} = \frac{S_0 \left(\frac{\gamma_0}{\sigma_{\text{б}}} R \right) - N_0 \left(\frac{\gamma_0}{\sigma_{\text{б}}} R \right)}{S_0 \left(\frac{\gamma_0}{\sigma_{\text{б}}} R_0 \right) - N_0 \left(\frac{\gamma_0}{\sigma_{\text{б}}} R_0 \right)}. \quad (3.152)$$

Плотность тока, стекающего с обсадной трубы в горную породу, определяется выражением

$$a(x) = \frac{1}{2\pi R_0} \cdot \frac{\partial i(x, t)}{\partial x},$$

и следовательно

$$a(x, t) = \frac{1}{2\pi R_0} \cdot \frac{1}{r_{по}} \cdot e^{kx} u(x, t).$$

Максимальная плотность тока ($x=0, t=T_1, k < 0$):

$$a(x=0, t=T_1) = \frac{I\sqrt{L}}{\pi^{3/2} m R \sqrt{r_{по}}} \cdot \sigma_{\text{б}} \Omega(\alpha, \beta, T_1), \quad (3.153)$$

Расчеты показали, что при $I \leq 250$ кА, $\rho_0 < 10^4$ Ом · м, $|k| < 100$ значение максимальной плотности тока $|a| < 30$ А/м².

Выполненный анализ электромагнитных процессов при п. у. м. в обсадную трубу, расположенную в неоднородной горной породе, позволяет сформулировать критерии безопасности человека, находящегося вблизи буровой скважины. Как известно, условие безопасности человека при воздействии импульса тока ($t \leq 5 \cdot 10^3$ мкс) определяется неравенством [54] — [56]:

$$R_T \int_0^T i_T^2(t) dt \leq [P], \quad (3.154)$$

где $i_T(t)$ — зависимость импульса тока, проходящего через тело человека, от времени, А.

$[P]$ — предельно допустимая энергия импульса, не вызывающая вентрикулярной фибрилляции сердца, Вт · с;

R_T — расчетное значение сопротивления тела человека, Ом;

T — длительность импульса тока, с.

Расчетная схема соответствует прикосновению человека, стоящего на поверхности земли, к обсадной трубе буровой скважины в момент п. у. м.

В этом случае человек находится под воздействием напряжения прикосновения:

$$u_{\text{п}}(t) = (1 - \eta)u(t),$$

где $u(t)$ — потенциал обсадной трубы, определяемый выражениями (149) или (150);

η — коэффициент, определяемый формулами (151) или (152).

Ток через человека ограничивается сопротивлением тела человека R и сопротивлением растеканию с ног человека в землю R_H :

$$i(t) = \frac{u_{\text{п}}(t)}{R_T + R_H},$$

где [56]:

$$R_H = 4\rho_0,$$

Согласно [55], [56], $R_T = 500$ Ом.

Подставляя в неравенство (154) выражения входящих в него величин, окончательно получим

$$\frac{\sigma_{M(B)}^2(1-\eta)^2}{\pi^3 m^2} \cdot \frac{I^2 R_T L r_{\text{по}}}{(R_T + 4\rho_1)^2} \int_0^{T_2} \Omega^2(a, \beta, t) dt \leq [P]. \quad (3.155)$$

Заметим, что согласно стандарту [56] предельно допустимое значение энергии импульса $[P]$, при котором вероятность возникновения вентрикулярной фибрилляции не превышает 2 %, составляет 6 Дж.

Полученное выражение (155) позволяет, в частности, установить необходимое значение удельного электрического сопротивления поверхностного слоя структуры (щебень, асфальтовая отмостка, насыпной грунт и пр.) в зоне растекания, при котором будет обеспечена безопасность при п. у. м.

Разработанная теория электромагнитных процессов при п. у. м. в обсадную трубу буровой скважины, расположенной в горной породе, без ограничения общности может быть распространена на вертикальные и горизонтальные протяженные заземлители, в том числе на проложенные в земле или на ее поверхности трубопроводы и технологические экстакады [10], [46], а также на металлические и железобетонные конструкции зданий и сооружений, находящиеся в соприкосновении с землей; свинцовые оболочки кабелей, проложенных в земле [10]; рельсовые пути магистральных электрифицированных железных дорог [2].

Список литературы к разделу III

1. Бургсдорф В. В., Якобс А. И. Заземляющие устройства электроустановок. — М.: Энергоатомиздат, 1987.
2. Карякин Р. Н. Тяговые сети переменного тока. 2-е изд. М. Транспорт. 1987.
3. Коструба С. И. Измерение электрических параметров земли и заземляющих устройств. М.: Энергоатомиздат, 1983.
4. Найфельд М. Р. Заземление и защитные меры электробезопасности. М.: Энергия, 1971.
5. Оллендорф Ф. Токи в земле. — М. — Л. Гостехиздат, 1932.
6. Карякин Р. Н. Гальваническое влияние тяговых сетей переменного тока // Электричество. 1965. № 3. С. 54—58.
7. Карякин Р. Н., Власов С. П., Швейко И. А. Распределение потенциала на поверхности земли территории тяговой подстанции переменного тока // Электричество. 1968. № 3. С. 54—58.
8. Карякин Р. Н., Солнцев В. И. Расчет сопротивления заземлителей, образованных железобетонными фундаментами // Электричество. 1981. № 8. С. 42—44.
9. Карякин Р. Н. О возможности использования в качестве заземлителей железобетонных фундаментов, защищенных от воздействия агрессивных сред // Промышленная энергетика. 1982. № 10. С. 50—54.
10. Правила устройства электроустановок. 6-е изд. перераб. и доп. М. Энергоатомиздат. 1987.
11. Строительные нормы и правила. СНиП 2.03.11-85: Нормы проектирования: Защита строительных конструкций от коррозии. М.: Стройиздат, 1986.
12. Инструкция по заземлению устройств электроснабжения на электрифицированных железных дорогах ЦЭ/4173/МПС СССР. М.: Транспорт, 1985.
13. Сборник директивных материалов по эксплуатации энергосистем (электротехническая часть). М.: Энергоиздат, 1981.
14. Инструктивные материалы Главгосэнергонадзора. М.: Энергоатомиздат, 1983.
15. Агрест М. М., Лабуха С. М., Рикенглаз М. М., Чачибая Ц. Ш. Таблицы функций Струве и интегралов от них. М.: Наука, 1982.
16. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям: Перевод с нем. М.: Изд-во иностр. лит., 1951.
17. Рыжик И. М., Градштейн И. С. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. — 3-е изд., перераб. М.-Л.: Гос. Изд-во технико-теоретич. лит., 1951.
18. Янке Е., Эмде Ф., Леш Ф. Специальные функции, Изд. 2-ое, Изд-во «Наука», М., 1968.
19. Пешковский Л. М., Перескокова Т. М. Инженерная геология. — 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1982.

20. Справочник физических констант горных пород/Под ред. С. Кларка. М.: Мир, 1969.

21. Гальперин В. В. Справочник по воздушным и кабельным сетям в районах многолетнемерзлых грунтов. Л.: Энергия, 1977.

22. Сборник директивных материалов Главтехуправления Минэнерго СССР (электротехническая часть). — 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1985.

23. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. М.: Транспорт, 1982.

24. Бернацкий А. Ф., Целебровский Ю. И., Чунчин В. А. Электрические свойства бетона. М.: Энергия, 1980.

25. Карякин Р. Н., Добрынин В. К. Сопротивление кабельной эстакады, используемой в качестве заземлителя. Электричество, 1984, № 2.

26. А. с. 944780 СССР, NOIR4/66. Заземлитель для засушливых районов/В. А. Антонов, Р. Н. Карякин, В. П. Косенков и др.//Открытия. Изобретения. 1982. № 16.

27. Гордон С. В. Монтаж заземляющих устройств. М.: Энергоатомиздат, 1987.

28. Карякин Р. Н., Солнцев В. И. Использование железобетонных фундаментов производственных зданий в качестве заземлителей. М. Энергоатомиздат. 1988.

29. Использование заземляющих свойств строительных конструкций промышленных электроустановок во взрывоопасных зонах/Р. Н. Карякин, В. И. Солнцев, Ю. И. Солуянов и др.//Промышленная энергетика. 1989, № 2. С. 21—24.

30. Карякин Р. Н., Добрынин В. К. Входное сопротивление протяженного вертикального заземлителя в многослойной земле. — Электричество, 1975, № 8.

31. Carson J. R. Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return. The Bell System Technical Journal. Vol. V, № 4, Oct. 1926.

32. Pollack F. Über das Feld einer unendlich langen wechselstromdurchflossenen Einfachleitung. Nachrichtentechnik. 1926, Bd. 3, H. 9.

33. Sommerfeld A. Das Reziprozitätstheorem der drahtlosen Telegraphie. — Jahrd. d. drahtl. Telegraphie u Telephonie, 1925, XXVI.

34. Рюденберг Р. Переходные процессы в электроэнергетических системах. М., изд-во Иностран. лит., 1955.

35. Sunde E. D. Earth Conduction Effects in Transmission Systems, New York, 1949.

36. Sunde E. D. Currents and Potential Along Leaky Ground-Return Conductors. — Electrical Engineering, 1936, December.

37. Sommerfeld A. Über die Ausbreitung der Wellen in der drahtlosen Telegraphie. — Annalen der Physik, 1926, December, Bd 4.

38. Чернышев А. А. Индуктивные явления, вызываемые токами однофазных железных дорог, и средства борьбы с ними. — Петроград: Изд-во Петроградск. политехнич. ин-та, 1916, т. XXV.

39. Pleijel H. Undersökningar rörande Svagströmsstörningar vid med Einfasström drivna Elektriska Baner. — A. B. Svenska Teknologforeningens, Stockholm, 1919.

40. Riordan J. Current Propagation in Electric Railway Propulsion Systems. — Transactions AIEE, 1932, December.

41. Максименко Н. Н., Асеев Г. Г. Расчет скважинных заземлителей. — Электричество, 1970, № 9.

42. Стреттон Д. А. Теория электромагнетизма. — М.: Гостехиздат, 1948.

43. Шимони К. Теоретическая электротехника/Пер. с нем. — М.: Мир, 1964.

44. Карякин Р. Н. Резонанс в тяговых сетях и его демпфирование. — М.: Высш. Школа, 1961.

45. Карякин Р. Н., Антонов В. А., Солнцев В. И., Билько Б. А. Об использовании эстакад промышленных предприятий в качестве заземляющих устройств. Труды Всесоюз. госуд. научно-исслед. ин-та ВНИИПЭМ. — М. Энергоатомиздат. 1987.

46. Карякин Р. Н., Солнцев В. И. Заземляющие устройства промышленных электроустановок. Справочник. М. Энергоатомиздат. 1989.

47. Карякин Р. Н. Электромагнитные процессы в протяженных заземлителях в неоднородных структурах. — Электричество, 1996, № 7.

48. IEC Standart 1312-1. Protection against lightning electromagnetic impulse. Part I. General principles. First edition. 1995-02.

49. Сиротинский Л. И. Техника высоких напряжений. Выпуск третий. Перенапряжения и защита от перенапряжений. Госэнергоиздат. М. — Л. 1945.

50. Хаяси С. Волны в линиях электропередачи. Госэнергоиздат. М. — Л. 1960.

51. Конторович М. И. Операционное исчисление и нестационарные явления в электрических цепях. — М. — Л. Гос. изд-во техн. — теор. лит. 1949.

52. Ван дер Поль Б. и Бреммер Х. Операционное исчисление на основе двустороннего преобразования Лапласа. Изд-во Иностран. лит. М. 1952.

53. Справочник по специальным функциям. Под ред. М. Абрамовица и И. Стиган. — М. Изд-во «Наука». 1979.

54. Dalziel Ch. F. A Study of the Hazards of Impulse Currents. AIEE — Transaction, Part III, Power Apparatus and Systems, Vol. 72, 1953.

55. IEC Technical Report 479-2. Effects of current passing through the human body Part 2: Special aspects. Second edition. 1987.

56. IEC Technical Report 1662. Assessment of the risk of damage due to lightning. First edition. 1995-04.