

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева»

**Кафедра электроснабжения горных и промышленных предприятий**

Составители

**А. А. Шевченко**  
**Т. Ф. Малахова**

## **НАПРЯЖЕНИЕ ПРИКОСНОВЕНИЯ**

**Методические указания к практическому занятию  
и самостоятельной работе**

Рекомендовано учебно-методической комиссией направления  
13.03.02 (140400.62) «Электроэнергетика и электротехника»  
в качестве электронного издания  
для использования в учебном процессе

Кемерово 2015

## Рецензенты

Соколов Б. В. – доцент кафедры электроснабжения горных и промышленных предприятий.

Семыкина И. Ю. – председатель учебно-методической комиссии направления 13.03.02 (140400.62) «Электроэнергетика и электротехника».

**Шевченко Анастасия Александровна, Малахова Татьяна Федоровна. Напряжение прикосновения:** методические указания к практическому занятию и самостоятельной работе по дисциплине «Электробезопасность» [Электронный ресурс] для студентов направления 13.03.02 (140400.62) «Электроэнергетика и электротехника», образовательная программа «Электроснабжение», всех форм обучения / сост.: А. А. Шевченко, Т. Ф. Малахова. – Кемерово : КузГТУ, 2015. – Систем. требования : Pentium IV ; ОЗУ 8 Мб ; Windows XP ; мышь. – Загл. с экрана.

Приведены цель практического занятия, основные теоретические положения и задачи по вопросам напряжения прикосновения, методические указания по изучению темы, а также список рекомендуемой литературы.

© КузГТУ, 2015  
© Шевченко А. А.,  
Малахова Т. Ф.,  
составление, 2015

## 1. ЦЕЛЬ ЗАНЯТИЯ

Целью занятия является приобретение теоретических знаний по вопросам напряжения прикосновения при одиночном заземлителе, групповом заземлителе и с учетом падения напряжения в сопротивлении основания на котором стоит человек, а также получение практических навыков при решении задач.

## 2. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Напряжением прикосновения  $U_{np}$  называется напряжение между двумя точками цепи тока, которых одновременно касается человек, или, иначе говоря, падение напряжения в сопротивлении тела человека, В,

$$U_{np} = I_h \cdot R_h, \quad (1)$$

где  $I_h$  – ток, проходящий через человека по пути рука – ноги, А;  $R_h$  – сопротивление тела человека, Ом.

В области защитных заземлений, занулений и т. п. одна из этих точек имеет потенциал заземлителя  $\varphi_з$ , В, а другая – потенциал основания в том месте, где стоит человек,  $\varphi_{осн}$ , В. В этом случае напряжение прикосновения будет

$$U_{np} = \varphi_з - \varphi_{осн} \quad (2)$$

или

$$U_{np} = \varphi_з \cdot \alpha_1, \quad (3)$$

где  $\alpha_1$  – коэффициент, называемый коэффициентом напряжения прикосновения или просто коэффициентом прикосновения, учитывающий форму потенциальной кривой:

$$\alpha_1 = (1 - \varphi_{осн} / \varphi_з). \quad (4)$$

### 2.1. Напряжение прикосновения при одиночном заземлителе

Пусть мы имеем оборудование, например электродвигатели, корпуса которых заземлены с помощью одиночного заземлителя (электрода) (рис. 1). При замыкании на корпус одного из этих

двигателей на заземлителе и всех присоединенных к нему металлических частях, в том числе на корпусах двигателей, появится потенциал  $\varphi_3$ . Поверхность земли вокруг заземлителя также будет иметь потенциал, изменяющийся по кривой, зависящей от формы и размеров заземлителя (электрода).

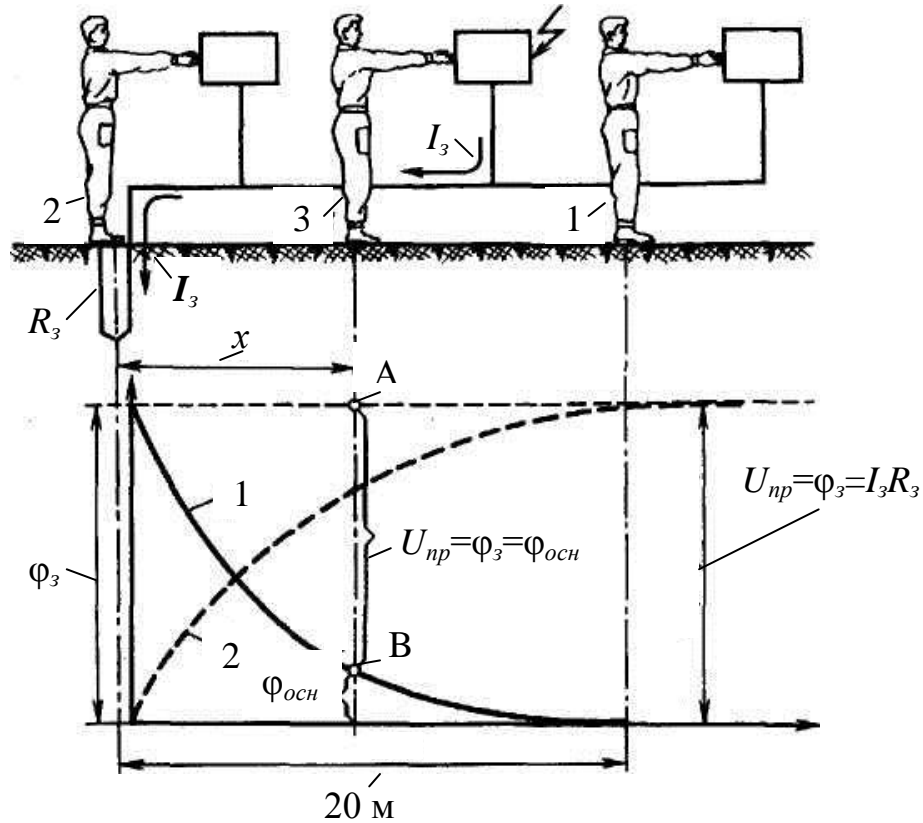


Рис. 1. Напряжение прикосновения при одиночном заземлителе: 1 – потенциальная кривая; 2 – кривая, характеризующая изменение  $U_{np}$  при изменении  $x$

Напряжение прикосновения для человека, касающегося заземленного корпуса двигателя и стоящего на земле (случай 1 на рис. 1), определяется отрезком АВ и зависит от формы потенциальной кривой и расстояния  $x$  между человеком и заземлителем: чем дальше от заземлителя находится человек, тем больше  $U_{np}$  и наоборот.

Так, при наибольшем расстоянии, т. е. при  $x = \infty$ , а практически при  $x \geq 20$  м (случай 2 на рис. 1) напряжение прикосновения имеет наибольшее значение:  $U_{np} = \varphi_3$ ; при этом  $\alpha_1 = 1$ . Это

наиболее опасный случай прикосновения.

При наименьшем значении  $x$ , т. е. когда человек стоит непосредственно на заземлителе (случай 3 на рис. 1),  $U_{np} = 0$  и  $\alpha_1 = 0$ . Это безопасный случай, так как человек не подвергается воздействию напряжения, хотя он и находится под потенциалом заземлителя  $\varphi_3$ .

При других значениях  $x$  в пределах  $0 - 20$  м (случай 1 на рис. 1)  $U_{np}$  плавно возрастает от 0 до  $\varphi_3$ , а  $\alpha_1$  — от 0 до 1.

В практике устройства защитных заземлений интерес представляют максимальные значения напряжений прикосновения.

Для примера посмотрим, как изменяются  $U_{np}$  и  $\alpha_1$  при одиночном полушаровом заземлителе радиусом  $r$ . В этом случае нам известно выражение потенциала любой точки на поверхности земли вокруг заземлителя  $\varphi = \varphi_3 r \frac{1}{x}$ , поэтому напряжение прикосновения определяется по формуле

$$U_{np} = \varphi_3 - \varphi_3 \frac{r}{x} = \varphi_3 \left( 1 - \frac{r}{x} \right), \quad (5)$$

а коэффициент прикосновения

$$\alpha_1 = 1 - r/x. \quad (6)$$

При  $x = \infty$ , а практически при  $x \geq 20$  м (случай 2 на рис. 1)  $r/x \approx 0$ , поэтому напряжение прикосновения и коэффициент прикосновения будут иметь максимальные значения:

$$U_{np.max} = \varphi_3; \quad \alpha_{1.max} = 1.$$

При  $x = r$  (случай 3 на рис. 1)  $r/x = 1$ , поэтому  $U_{np} = 0$  и  $\alpha_1 = 0$ .

При промежуточных значениях  $x$  от  $r$  до 20 м  $U_{np}$  и  $\alpha_1$  определяются из выражений (5) и (6). Так, если  $x = 10r$  (случай 1 на рис. 1), то  $\alpha_1 = 1 - r/10r = 0,9$ , а  $U_{np} = \varphi_3 \alpha_1 = 0,9\varphi_3$ .

При одиночном стержневом вертикальном заземлителе выражения для  $U_{np}$  и  $\alpha_1$  можно получить, вычтя уравнение потенциала некоторой точки основания

$$\varphi = \frac{I_3 \rho}{2\pi l} \int_0^l \frac{dy}{\sqrt{x^2 + y^2}} = \frac{I_3 \rho}{2\pi l} \ln \frac{\sqrt{x^2 + l^2} + l}{x} \quad \text{из уравнения потенциала}$$

заземлителя  $\varphi_3 = \frac{I_3 \rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d}$  (где  $l$  – длина заземлителя, м;  $d$  – диаметр заземлителя, м;  $I_3$  – ток, стекающий в землю с заземлителя, А;  $\rho$  – удельное сопротивление земли, Ом·м):

$$U_{np} = \varphi_3 - \varphi_{осн} = \frac{I_3 \rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d} - \frac{I_3 \rho}{2\pi l} \ln \frac{\sqrt{x^2 + l^2} + l}{x} =$$

$$= \varphi_3 \left( 1 - \frac{\ln \frac{\sqrt{x^2 + l^2} + l}{x}}{\ln \frac{4l}{d}} \right); \quad (7)$$

$$\alpha_1 = 1 - \frac{\ln \frac{\sqrt{x^2 + l^2} + l}{x}}{\ln \frac{4l}{d}}. \quad (8)$$

Максимальные значения  $U_{np}$  и  $\alpha_1$ , будут при  $x = \infty$  (практически при  $x \geq 20$  м).

$$U_{np.\max} = \frac{I_3 \rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d} = \varphi_3; \quad \alpha_{1.\max} = 1.$$

В этом случае мы пренебрегли дробными выражениями в (7) и (8), поскольку числитель их при  $x > l$  и  $l \gg d$  весьма мал по сравнению со знаменателем.

## 2.2. Напряжение прикосновения при групповом заземлителе

Известно, что если поля растекания токов электродов группового заземлителя накладываются одно на другое, то все точки поверхности земли на участке между электродами имеют потенциалы, отличные от нуля. Поэтому в любом месте этого участка  $U_{np} < \varphi_3$  и  $\alpha_1 < 1$ .

Как и в случае одиночного заземлителя,  $U_{np} = 0$  и  $\alpha_1 = 0$  то-

гда, когда человек, касаясь заземленного предмета, стоит непосредственно на электроде, входящем в состав группового заземлителя.

Наибольшие значения  $U_{пр}$  и  $\alpha_1$  будут иметь на определенном расстоянии от электродов, зависящем от их формы и взаимного расположения.

Рассмотрим эти вопросы применительно к заземлителю, состоящему из двух одинаковых полушаровых электродов радиусом  $r$ , м, с расстоянием между ними  $s$ , м (рис. 2).

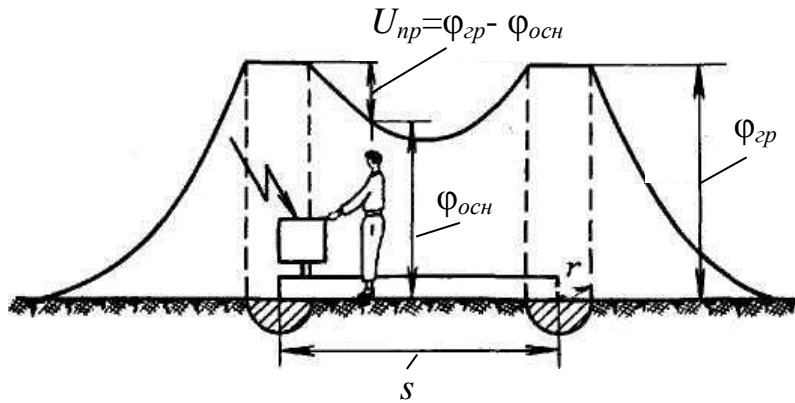


Рис. 2. Напряжение прикосновения при групповом заземлителе

Зная уравнение потенциальной кривой такого заземлителя,  $\varphi_{осн} = \varphi_{гр} \frac{r(s-r)}{x(s-x)}$ , где  $\varphi_{гр}$  – потенциал группового заземлителя, В, получим

$$U_{пр} = \varphi_{гр} - \varphi_{осн} = \varphi_{гр} \left( 1 - \frac{r(s-r)}{x(s-x)} \right); \quad (9)$$

$$\alpha_1 = 1 - \frac{r(s-r)}{x(s-x)}. \quad (10)$$

Как видно из этих выражений,  $U_{пр}$  и  $\alpha_1$  будут иметь наименьшие значения в двух случаях – при наименьшем и наибольшем значениях  $x$ , а именно при  $x = r$  и  $x = (s - r)$ , т. е. когда человек стоит на одном из электродов. В этом случае  $U_{пр} = 0$  и  $\alpha_1 = 0$ .

Наибольшие значения  $U_{пр}$  и  $\alpha_1$  будут при  $x = 0,5s$ , когда

человек стоит точно посередине между электродами. Тогда с учетом наименьшего значения потенциала на поверхности земли  $\varphi_в = \varphi_{зр} \cdot 4r(s-r)/s^2$  получим

$$U_{np.max} = \varphi_{зр} \left( 1 - 4r \frac{s-r}{s^2} \right);$$

$$\alpha_{1.max} = 1 - 4r \frac{s-r}{s^2}.$$

Например, при  $s = 20r$  получим  $U_{np} = 0,89\varphi_{зр}$ , а  $\alpha_1 = 0,89$ .

Если электроды не шаровые, а другой формы, то вычисление  $U_{np}$  и  $\alpha_1$  оказывается более сложным, а при большом числе электродов – практически невозможным.

При проектировании защитных заземлений требуется знать наибольшее в данной конструкции заземлителя значение напряжения прикосновения. Для этой цели пользуются максимальными значениями  $\alpha_1$ , полученными опытным путем (табл. 1).

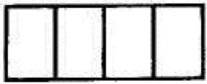
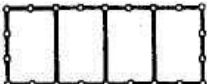
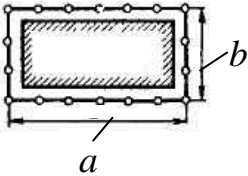
Таблица 1

Наибольшие значения коэффициентов прикосновения

Тип заземлителя	Число внутренних полос	Расстояние между параллельными полосами, м	$\alpha_1$
1	2	3	4
Одиночный горизонтальный; заглубление $t_0 \approx 0,5$ м	–	–	1
Групповой – вертикальные стержневые электроды расположены в ряд и соединены полосой; заглубление $t_0 \approx 0,8$ м	–	–	1



## Продолжение таблицы 1

1	2	3	4
Групповой контурный из полос с внутренними па- раллельными полосами; $t_0 \approx 0,5$ м  	2	2,5	0,3
		5	0,35
		10	0,4
		15	0,45
	5	2,5	0,15
		5	0,2
		10	0,3
		15	0,35
	10	2,5	0,1
5		0,15	
10		0,25	
15		0,3	
Групповой контурный из стержней и полос с внут- ренними параллельными полосами; $t_0 \approx 0,5$ м  	5	2,5	0,1
		5	0,15
		10	0,25
		15	0,35
	10	2,5	0,08
		5	0,1
		10	0,2
		15	0,25
Групповой контурный из стержней и полос (внутри здания, сооружения); $t_0 \approx 0,5$ м  	—	$a = b$	0,4
		$a = 2b$	0,35
		$a = 3b$	0,3

*Примечания:*

1. Для заземлителей первых двух типов значения  $\alpha_1$  даны для случаев, когда человек находится на расстоянии 20 м и более от заземлителя. Все остальные значения  $\alpha_1$  относятся к случаям нахождения человека внутри контура.

2. Для заземлителя последнего типа отношение расстояния между соседними вертикальными электродами  $s$  и длиной вертикального электрода  $\ell_{\text{в}}$ , т. е.  $s/\ell_{\text{в}}$ , находится в пределах 1-3.

При уменьшении  $s$ , т. е. при более частом расположении электродов,  $U_{np}$  и  $\alpha_1$ , снижаются – происходит выравнивание потенциалов на поверхности земли.

В пределах площади, на которой размещены электроды группового заземлителя,  $U_{np.max}$  и  $\alpha_{1.max}$  наблюдаются, как правило, в точках, наиболее удаленных от электродов. Например, при размещении электродов по вершинам или сторонам правильного многоугольника  $U_{np.max}$  и  $\alpha_{1.max}$  оказываются в центре этих фигур (рис. 3).

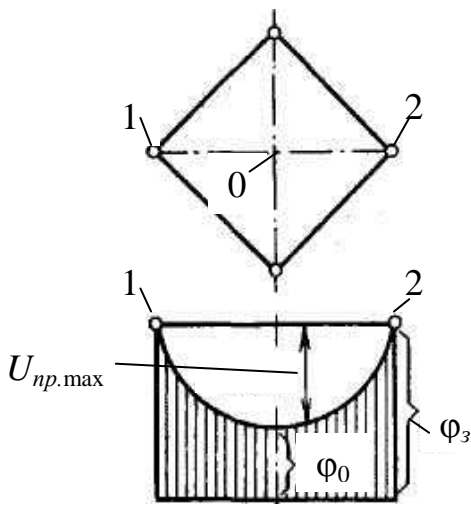
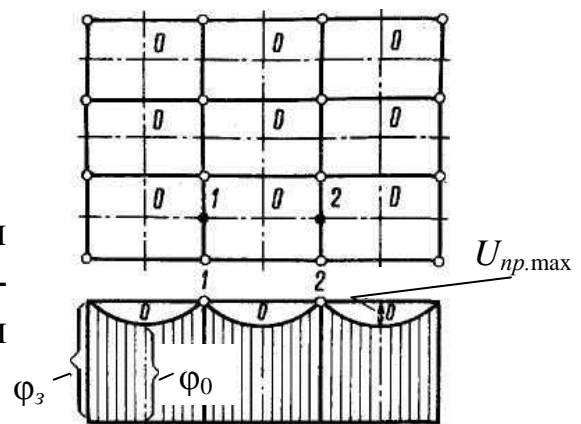


Рис. 3. Потенциальная кривая внутри контура группового заземлителя с вертикальными электродами, размещенными по вершинам правильного многоугольника и соединенными горизонтальными электродами

Если электроды образуют сетку, состоящую из квадратных или прямоугольных клеток, то внутри каждой такой клетки наибольшие значения  $U_{np}$  и  $\alpha_1$  будут точно в центре ее, причем в угловых клетках  $U_{np.max}$  и  $\alpha_{1.max}$  будут больше, чем в других (рис. 4).

Рис. 4. Потенциальная кривая внутри контура группового заземлителя в виде горизонтальной сетки с ячейками одинакового размера



Для заземлителя в однородной земле, выполненного в виде горизонтальной квадратной сетки с квадратными ячейками одинакового размера и равномерным размещением вертикальных электродов по контуру (периметру) заземлителя (рис. 5), коэффициент напряжения прикосновения может быть вычислен по следующему выражению:

$$\alpha_1 = 0,5 / \left( \frac{\ell_{\text{в}} L_2}{a \sqrt{S}} \right)^{0,45}, \quad (11)$$

где  $\ell_{\text{в}}$  – длина вертикального электрода, м;  $L_2$  – общая длина всех горизонтальных электродов, м;  $a$  – расстояние между вертикальными электродами, м;  $S$  – площадь, занимаемая заземлителем, м.

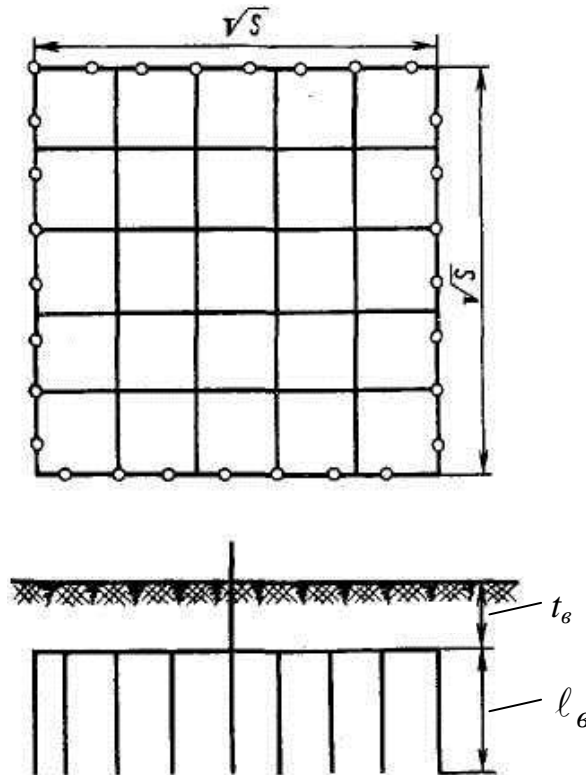


Рис. 5. Сложные заземлители в однородной земле  $S$  – площадь, занимаемая заземлителем, м<sup>2</sup>;  $t_{\text{в}}$  – глубина погружения в землю верхнего конца вертикального электрода, м;  $\ell_{\text{в}}$  – длина вертикального электрода, м.

Эта формула может быть упрощена, если принять степень в знаменателе равной 0,5 и заменить расстояние  $a$  его выражением

$a = 4\sqrt{S}/n$ , где  $n$  – количество вертикальных электродов. Тогда будем иметь

$$\alpha_1 = \sqrt{\frac{S}{nl_{\text{в}}L_2}} \quad \text{или} \quad \alpha_1 = \sqrt{\frac{S}{L_{\text{в}}L_2}}.$$

где  $L_{\text{в}} = nl_{\text{в}}$  – общая длина всех вертикальных электродов, м.

### 2.3. Напряжение прикосновения с учетом падения напряжения в сопротивлении основания, на котором стоит человек

Ток, стекающий в землю через человека, стоящего на земле, полу и другом основании, преодолевает сопротивление не только тела человека, но и этого основания, вернее, тех его участков, с которыми имеют контакт подошвы ног человека (сопротивление обуви, носков и т. п. в данном случае во внимание не принимается).

Сопротивление основания, на котором стоит человек, правильнее называть (аналогично сопротивлению заземлителя) сопротивлением растеканию тока основания ног; нередко это сопротивление именуют также сопротивлением растеканию основания или сопротивлением растеканию ног человека.

Все положения, рассмотренные выше, справедливы для случаев, когда сопротивление растеканию основания, на котором стоит человек, равно нулю. В действительных условиях это сопротивление не равно нулю и в ряде случаев бывает довольно велико.

Следовательно, разность потенциалов  $(\varphi_3 - \varphi_{\text{осн}})$ , равная  $\varphi_3\alpha_1$ , В, оказывается приложенной не только к сопротивлению тела человека  $R_h$ , Ом, но и к последовательно соединенному с ним сопротивлению основания  $R_{\text{осн}}$ , Ом, на котором стоит человек (рис. 6):

$$\varphi_3\alpha_1 = I_h(R_h + R_{\text{осн}}).$$

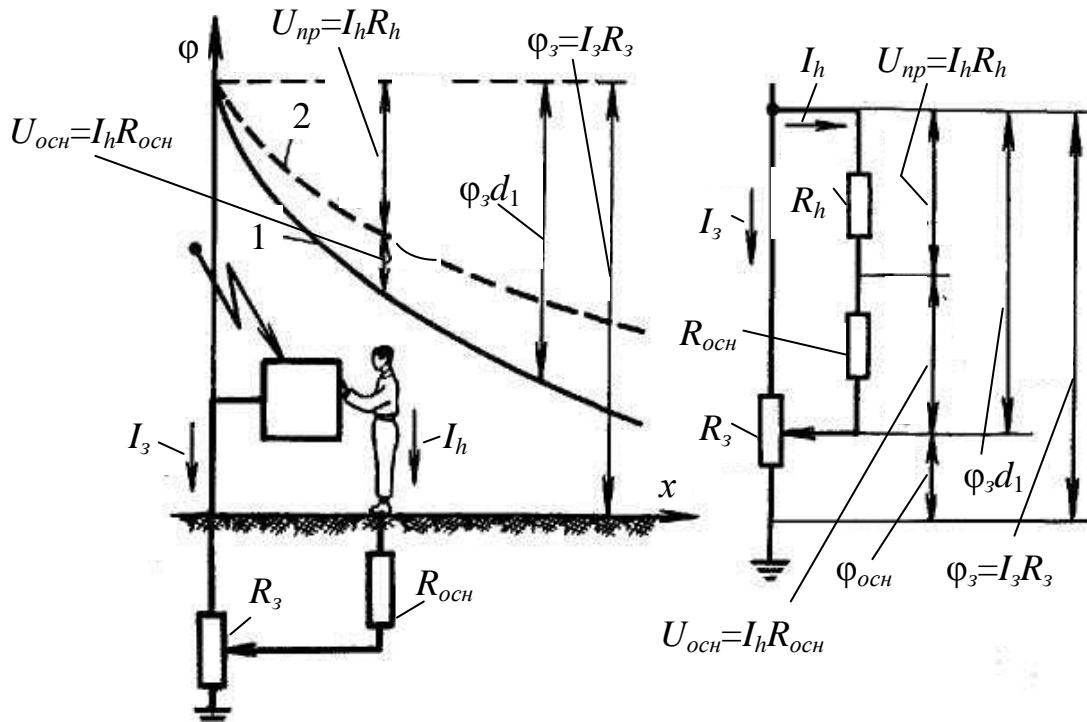


Рис. 6. К определению напряжения прикосновения с учетом падения напряжения в сопротивлении растеканию основания, на котором стоит человек: 1 – потенциальная кривая; 2 – кривая, характеризующая изменение  $U_{np}$  с изменением расстояния от заземлителя

Заменив в этом выражении ток  $I_h$ , А, проходящий через человека, его значением из (1), получим

$$\varphi_3 \alpha_1 = \frac{U_{np}}{R_h} (R_h - R_{очн}),$$

откуда напряжение прикосновения с учетом падения напряжения в сопротивлении растеканию основания, В,

$$U_{np} = \varphi_3 \alpha_1 \frac{R_h}{R_h + R_{очн}} \quad (12)$$

или

$$U_{np} = \varphi_3 \alpha_1 \alpha_2, \quad (13)$$

где  $\alpha_2$  – коэффициент напряжения прикосновения, учитывающий падение напряжения в сопротивлении растеканию основания, на котором стоит человек:

$$\alpha_2 = R_h / (R_h + R_{очн}). \quad (14)$$

Сопротивление растеканию основания, на котором стоит человек, или, иначе говоря, сопротивление растеканию ног человека, можно определить следующим образом.

Подошвы обуви человека, создающие контакт с основанием, можно уподобить дисковому заземлителю, лежащему на поверхности земли. Если площадь подошвы одной ноги принять равной  $0,0225 \text{ м}^2$ , то диаметр  $d$  эквивалентного ей диска будет равен  $0,17 \text{ м}$ , а сопротивление растеканию тока составит, Ом,

$$R_n = \rho / 2d \approx 3\rho. \quad (15)$$

Полагая, что ступни ног отстоят одна от другой на расстоянии шага, и считая поэтому, что их поля растекания токов не влияют одно на другое, получим искомое сопротивление растеканию основания, т. е. сопротивление растеканию обеих ног человека, Ом,

$$R_{осн} = R_n / 2 \approx 1,5\rho. \quad (16)$$

Подставив это значение в (14), получим окончательное выражение для коэффициента напряжения прикосновения, учитывающего падение напряжения в сопротивлении растеканию ног человека,

$$\alpha_2 = \frac{R_h}{R_h + 1,5\rho}.$$

#### 2.4. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов

Для правильного проектирования способов и средств защиты людей от поражения электрическим током необходимо знать допустимые значения напряжений прикосновения и значений токов, протекающих через тело человека. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения установлены ГОСТ 12.1.038 – 82 «ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов» для путей тока от одной руки к другой и от руки к ногам.

Напряжения прикосновения  $U_{np}$  и сила тока  $I$ , протекающего через тело человека при нормальном (неаварийном) режиме электроустановки, не должны превышать значений, приведенных в табл. 2.

Таблица 2

Предельно допустимые значения напряжений прикосновения  
и токов при нормальном (неаварийном)  
режиме электроустановки

Род тока	U, В	I, мА
	не более	
Переменный, 50 Гц	2,0	0,3
Переменный, 400 Гц	3,0	0,4
Постоянный	8,0	1,0

Примечания:

1. Напряжения прикосновения и токи приведены при продолжительности воздействий не более 10 мин в сутки и установлены, исходя из реакции ощущения.

2. Напряжения прикосновения и токи для лиц, выполняющих работу в условиях высоких температур (выше 25 °С) и влажности (относительная влажность более 75 %), должны быть уменьшены в три раза.

В ГОСТ 12.1.03-82 приведены также предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов при аварийных режимах производственных электроустановок напряжением до 1000 В с глухозаземленной или изолированной нейтралью и выше 1000 В с изолированной нейтралью, которые не должны превышать значений, указанных в табл. 3.

Таблица 3

Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов при аварийном режиме производственных электроустановок напряжением до 1000 В с глухозаземленной или изолированной нейтралью и выше 1000 В с изолированной нейтралью

Род тока	Нормируемая величина	Предельно допустимые значения, не более, при продолжительности воздействия тока $t$ , с											
		0,01–0,08	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	Св. 1,0
Переменный 50 Гц	$U$ , В	550	340	160	135	120	105	95	85	75	70	60	20
	$I$ , мА	650	400	190	160	140	125	105	90	75	65	50	6
Переменный 400 Гц	$U$ , В	650	500	500	330	250	200	170	140	130	110	100	36
	$I$ , мА												8
Постоянный	$U$ , В	650	500	400	350	300	250	240	230	220	210	200	40
	$I$ , мА												15
Выпрямлен- ный двухполу- периодный	$U_{ампл}$ , В	650	500	400	300	270	230	220	210	200	190	180	–
	$I_{ампл}$ , мА												
Выпрямлен- ный однополу- периодный	$U_{ампл}$ , В	650	500	400	300	250	200	190	180	170	160	150	–
	$I_{ампл}$ , мА												

Примечание. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов, протекающих через тело человека при продолжительности воздействия более 1 с, приведенные в данной таблице, соответствуют отпускаящим (переменным) и небольшим (постоянным) токам.



Предельно допустимые значения напряжений прикосновения при аварийном режиме производственных электроустановок с частотой тока 50 Гц, напряжением выше 1000 В, с глухим заземлением нейтрали не должны превышать значений, указанных в табл. 4, а предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов при аварийном режиме бытовых электроустановок напряжением до 1000 В и частотой 50 Гц не должны превышать значений, указанных в табл. 5.

Таблица 4

Предельно допустимые значения напряжений прикосновения при аварийном режиме производственных электроустановок с частотой тока 50 Гц, напряжением выше 1000 В, с глухим заземлением нейтрали

Продолжительность воздействия $t$ , с	Предельно допустимое значение напряжения прикосновения $U_{пр}$ , В
До 0,1	500
0,2	400
0,5	200
0,7	130
1,0	100
Св. 1,0 до 5,0	65

Таблица 5

Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов при аварийном режиме бытовых электроустановок напряжением до 1000 В и частотой 50 Гц

Продолжительность воздействия $t$ , с	Нормируемая величина		Продолжительность воздействия $t$ , с	Нормируемая величина	
	$U$ , В	$I$ , мА		$U$ , В	$I$ , мА
От 0,01 до 0,08	220	220	0,6	40	40
0,1	200	200	0,7	35	35
0,2	100	100	0,8	30	30
0,3	70	70	0,9	27	27
0,4	55	55	1,0	25	25
0,5	50	50	Св. 1,0	12	2

В табл. 5. значения напряжений прикосновения и токов установлены для людей с массой тела от 15 кг.

Защиту человека от воздействия напряжений прикосновения и токов обеспечивают конструкция электроустановок, технические способы и средства защиты, организационные и технические мероприятия по ГОСТ 12.1.019-79 «Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты».

### 3. ЗАДАЧИ

1. Небольшое производственное помещение имеет металлический пол – стальной лист, уложенный поверх бетонного основания. Этот лист не имеет электрической связи ни с какими металлоконструкциями и металлическими предметами, за исключением корпуса электродвигателя, установленного на бетонном фундаменте; корпус соединен проводником с металлическим полом. Предполагалось, что стальной лист является заземлителем с достаточно большой проводимостью. Но, как показали измерения, это сопротивление оказалось достаточно большим из-за бетонного основания и составило несколько мегом, т. е. при расчете может быть принято бесконечным.

Во время пребывания в помещении двух рабочих, стоявших на металлическом полу и касавшихся: рабочий А – корпуса двигателя, рабочий Б – стальной трубы (рис. 7), вертикально забитой в землю, произошло замыкание обмотки работающего двигателя на его корпус. В результате этого человек Б был смертельно поражен током.

Труба, которой касался пострадавший, проходила через круглое отверстие в стальном полу диаметром, в 2 раза большим диаметра трубы, и не касалась стального пола и других металлических элементов помещения.

*Дано:* сеть трехфазная трехпроводная с изолированной нейтралью напряжением  $U = 660$  В; сопротивления изоляции проводов относительно земли:  $r_1 = r_2 = r_3 = r = 1800$  Ом; длина забитого в землю участка трубы  $L = 2,0$  м; диаметр трубы

$d = 0,05$  м; сопротивление тела человека  $R_h = 1000$  Ом; удельное сопротивление земли  $\rho = 200$  Ом·м.

*Требуется:* определить напряжения прикосновения, воздействию которых подверглись оба рабочих.

*Указания:* емкости проводов относительно земли в связи с малой протяженностью сети следует принять равными нулю.

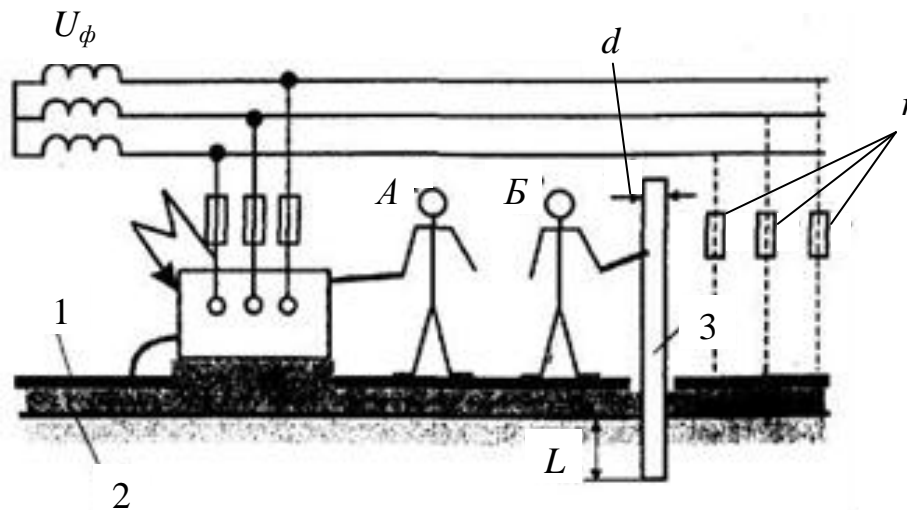


Рис. 7. Смертельное поражение человека электрическим током при соприкосновении его с забитым в землю отрезком стальной трубы во время замыкания фазы электросети на корпус электродвигателя: 1 – металлический лист (пол помещения); 2 – бетонное основание; 3 – стальная труба

2. На воздушной трехфазной линии электропередачи с заземленной нейтралью произошел обрыв провода, который упал на металлический полушар, лежащий на земле (рис. 8).

Человек, стоявший на земле и прикасавшийся в это время к заземленному корпусу потребителя электроэнергии, был смертельно поражен током.

*Дано:* радиусы полушаров  $r_1 = r_2 = 0,5$  м; расстояния от центров полушаров до точки, на которой стоял пострадавший,  $L_1 = 2$  м,  $L_2 = 1$  м; удельное сопротивление земли  $\rho = 200$  Ом·м; сопротивление тела человека  $R_h = 1000$  Ом.

Измерениями было установлено, что ток, стекающий с оборванного провода в землю через полушар,  $I_3 = 63$  А.

*Требуется:* вычислить напряжение прикосновения, под которым оказался пострадавший, с учетом сопротивления растеканию тока в землю с ног человека (сопротивления основания).

*Указания:* предмет, которого касался оборвавшийся провод, следует уподобить полушару радиусом  $r_1$ , лежащему на земле, а заземлитесь нейтрали сети принять также в виде полушара радиусом  $r_2$ .

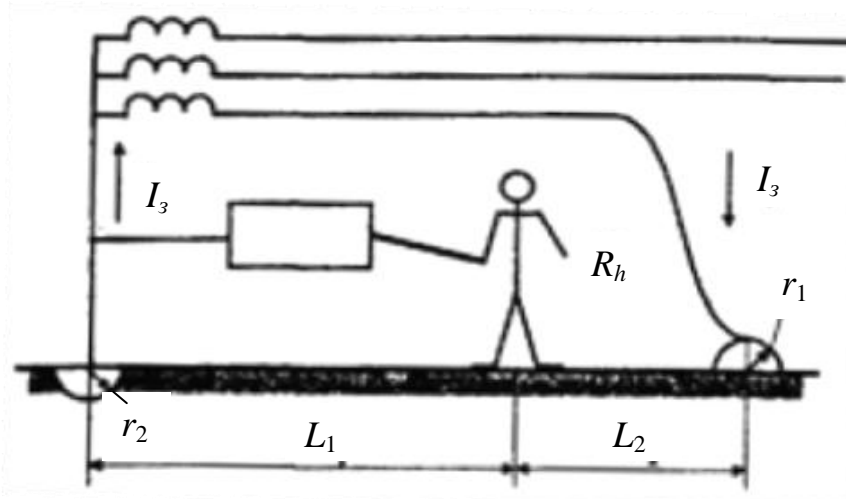


Рис. 8. Поражение человека электрическим током с летальным исходом при обрыве провода воздушной линии электропередач

3. На предприятии в одном из подсобных помещений небольшой площади с земляным полом эксплуатировались два механизма, приводимые в действие электродвигателями, питающимися от трехфазной сети напряжением 380/220 В. В этом помещении в течение трех дней производился ремонт его строительной части с отключением всей электросети помещения выключателем, установленным непосредственно у питающего трансформатора (рис. 9).

По окончании ремонта старший электромонтер с помощником, в обязанность которых входило обслуживание электрооборудования данного помещения, сняли с агрегатов знаки безопасности и брезентовые укрытия, наложенные на время ремонта, вытерли пыль с агрегатов, убедились в отсутствии вблизи агрегатов посторонних предметов, проверили исправность и правильность

положения органов управления механизмами и электродвигателями, убедились в наличии присоединения корпусов электродвигателей к магистрали зануления. Затем они включили выключатель в трансформаторной будке, т. е. подали напряжение в указанное помещение, и включили электродвигатели. Они работали нормально. Через некоторое время старший монтер поручил помощнику проверить исправность проводки освещения – включить свет в помещении (три светильника с лампами накаливания, подвешенные к потолку).

Помощник включил однополюсный выключатель в цепи ламп (поз. 3, рис. 9), и в этот момент старший монтер, стоявший около работающего электродвигателя, опираясь на его корпус рукой, упал, пораженный током.

Первая доврачебная помощь персонала предприятия, а также медицинская помощь прибывшей службы скорой помощи и, наконец, врачей больницы, куда был доставлен пострадавший, положительных результатов не дали. Поражение оказалось смертельным.

Причинами несчастного случая явились обрыв нулевого рабочего проводника сети, произошедший, очевидно, во время ремонта помещения.

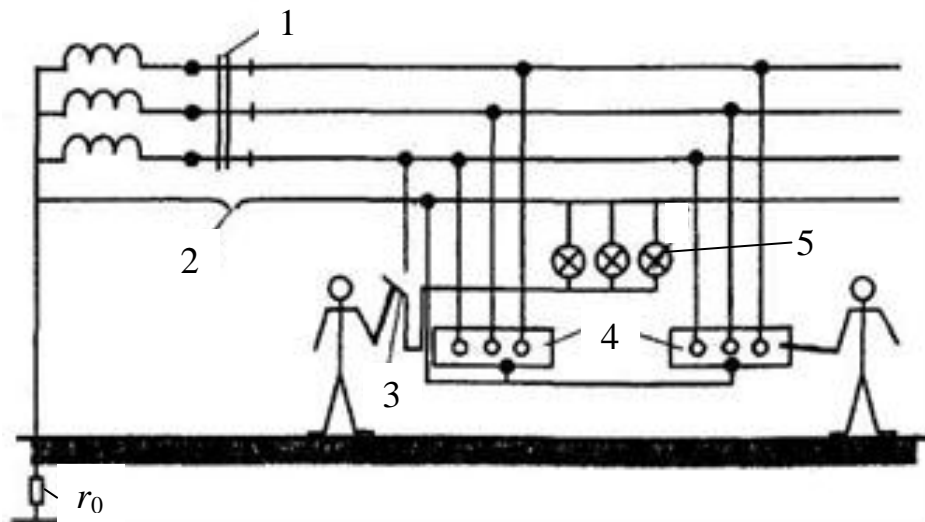


Рис. 9. Схема сети при смертельном поражении электромонтера током из-за обрыва нулевого рабочего провода: 1 – выключатель электросети помещения; 2 – место обрыва нулевого рабочего провода; 3 – выключатель освещения; 4 – электродвигатели; 5 – лампы накаливания

*Дано:* удельное сопротивление грунта  $\rho = 120 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ; сопротивление заземления нейтрали питающего трансформатора  $r_0 = 8 \text{ Ом}$ ; номинальное напряжение лампы  $U = 220 \text{ В}$ ; мощность лампы  $P = 300 \text{ Вт}$ ; сопротивление тела человека  $R_h = 850 \text{ Ом}$ .

*Требуется:* определить ток  $I_h$ , поразивший человека, и его напряжение прикосновения  $U_{пр}$ .

4. На ВЛ 380/220 В в месте ее ввода в служебное помещение произошло замыкание одной фазы на металлическую трубу, в которой проложены провода, идущие к светильнику наружного освещения. Эта труба оказалась в контакте с металлической тросовой оттяжкой деревянной опоры ВЛ, в результате чего был смертельно поражен ток электромонтер, касавшийся этой оттяжки в момент аварии (рис. 10). Как показало, вскрытие земли в месте заделки оттяжки в землю, в качестве якоря, фиксирующего нижний конец оттяжки, служила чугунная машинная деталь неопределенной формы. Эту деталь при расчетах следует уподобить металлическому шару диаметром  $d = 0,8 \text{ м}$ .

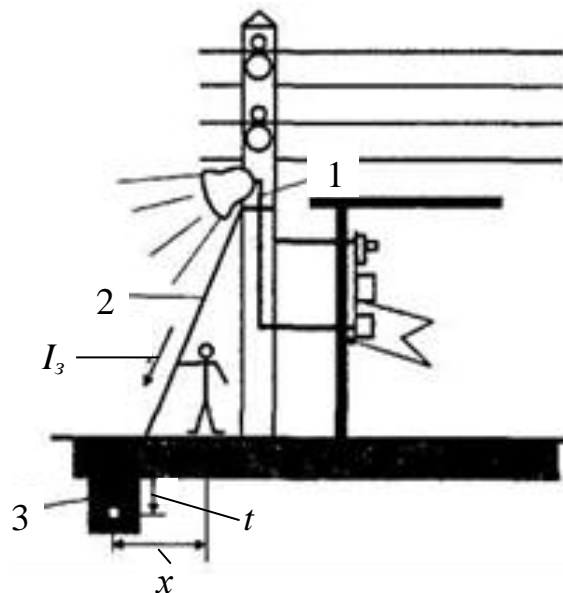


Рис. 10. Схема при смертельном поражении электрическим током человека, прикоснувшегося к стальной оттяжке: 1 – стальная труба; 2 – стальная оттяжка, имеющая контакт с трубой; 3 – якорь (чугунная деталь неопределенной формы)

*Дано:* ток, стекающий в землю с оттяжки в период замыкания фазы на трубу,  $I_3 = 4$  А; сопротивление тела человека  $R_h = 1000$  Ом; сопротивление обуви пострадавшего  $R_{об} = 0$ ; удельное сопротивление земли  $\rho = 200$  Ом·м; заглубление шара в землю  $t = 1,2$  м; расстояние от центра шара до пострадавшего  $x = 2$  м.

*Требуется:* определить напряжение прикосновения  $U_{пр}$  и ток  $I_h$ , поразивший человека.

5. На строительной площадке рабочему было поручено закрепить траверзу на крюке неработающего порталного крана (рис. 11). Прикоснувшись к крюку, рабочий упал на землю и, как оказалось, был мертв. Предполагалось, что он поражен электрическим током. Однако расследование несчастного случая показало, что кран смонтирован недавно и к нему еще не проведена электропроводка. Поэтому человек не мог быть поражен электрическим током.

Согласно следующей версии смерть наступила от инфаркта. Однако медицинское обследование обнаружило метки тока на ладони и ступне пострадавшего, свидетельствующие о прохождении через него электрического тока.

Дополнительное расследование выявило, что другой рабочий, стоявший непосредственно около металлической опоры ВЛ, проходящей вблизи крана, видел искрение проводов на опоре во время несчастного случая. Выяснилось, что на одной из фаз ВЛ имелся проволочный наброс, который при ветре замыкал фазу на опору. Это обстоятельство и стало первопричиной несчастного случая, что подтвердили специальные измерения и расчеты.

*Дано:* ток, стекающий в землю при замыкании фазного провода линии на тело опоры,  $I_0 = 27,6$  А; глубина погружения опоры в землю  $L = 2$  м; удельное сопротивление земли  $\rho = 210$  Ом·м; расстояния от опоры и от заземлителя крана до места нахождения пострадавшего  $x_1 = 4$  м,  $x_2 = 8$  м.

*Требуется:* вычислить ток и напряжение прикосновения, воздействию которых подвергся пострадавший, с учетом сопротивления основания, на котором он стоял.

*Указания:* поскольку за несколько часов до несчастного случая прошел слабый дождь, крюк крана, которого касался пострадавший голыми руками, и участок земли, на котором он стоял, были сырými, поэтому при расчете следует принять сопротивление тела человека  $R_h = 800 \text{ Ом}$ ; сопротивление обуви  $R_{об} = 0$ .

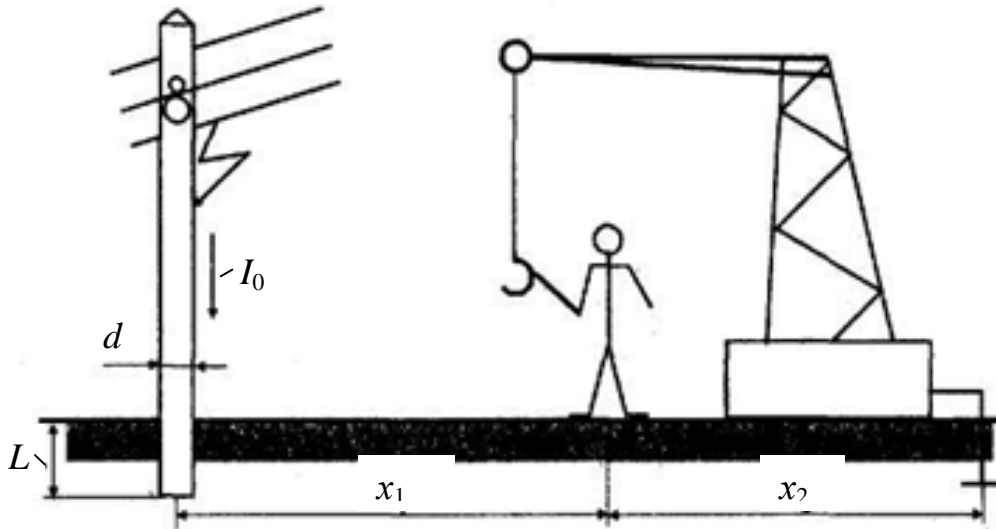


Рис. 11. Поражение электрическим током монтажника, прикоснувшегося к крюку грузоподъемного крана в момент замыкания фазы на металлическую опору ВЛ

6. На воздушной линии электропередачи оборвался фазный провод, один конец которого длиной  $L_1$  упал на землю. Защита ВЛ от замыкания на землю не сработала, и провод длительно находился под напряжением; по нему в землю стекал ток  $I_3$ . В это время человек коснулся оборванного провода и был смертельно поражен током (рис. 12).

*Дано:* ток, стекавший в землю,  $I_3 = 5 \text{ А}$ ; удельное сопротивление земли  $\rho = 180 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ; длина участка провода, лежащего на земле,  $L_1 = 6 \text{ м}$ ; расстояние от этого участка до человека  $L_2 = 4 \text{ м}$ ; диаметр провода  $2r = 0,01 \text{ м}$ ; сопротивление тела человека  $R_h = 1000 \text{ Ом}$ .

*Требуется:* вычислить напряжение прикосновения  $U_{пр}$ , воздействовавшее на пострадавшего с учетом сопротивления основания, на котором он стоял.



*Указания:* считать, что участок провода  $L_1$ , лежащий на земле, заглублен в землю так, что его продольная ось совпадает с поверхностью земли, т. е. он заглублен в землю на половину диаметра.

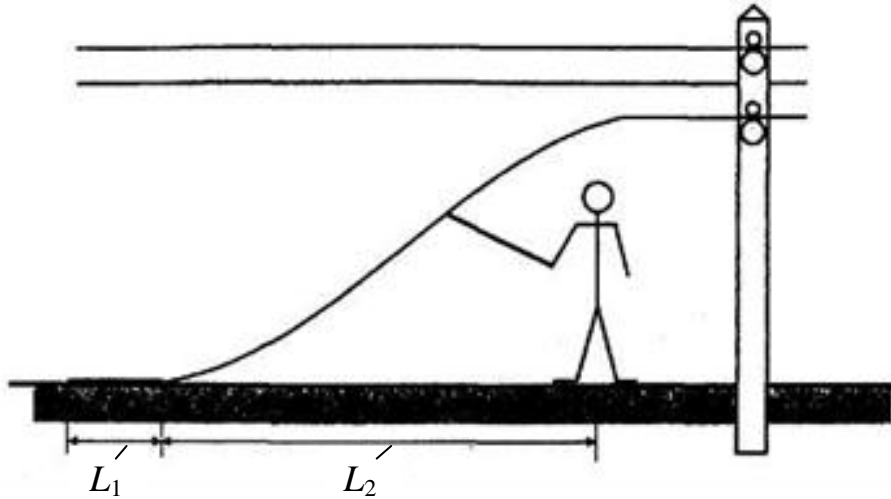


Рис. 12. Поражение человека электрическим током при прикосновении к оборванному проводу ВЛ

7. Во время аварии на воздушной линии электропередачи один из ее проводов коснулся металлической беседки, в результате чего был смертельно поражен током мальчик, сидевший в беседке на металлической скамье, облокотившись на металлический стол (рис. 13, а). Одежда пострадавшего – шорты и рубашка с короткими рукавами. Открытые части его тела соприкасались с сиденьем и столом.

*Дано:* беседка целиком выполнена из металла. Несущими элементами ее конструкции являются три стойки – стальные трубы диаметром  $d = 0,05$  м. Трубы забиты в землю на глубину  $L_1 = 2,5$  м в вершинах равностороннего треугольника на расстоянии  $S = 3$  м друг от друга (см. рис. 13, б). Стойки скреплены в единую металлическую конструкцию крышей из стальных листов и углового железа.

Стол и сиденья также целиком выполнены из металла. Столешница стола – металлический лист, укрепленный на стальной трубе, забитой в землю в центре треугольника, образованного стойками беседки. Сиденье приварено к несущим трубам.

После несчастного случая измерениями были установлены значения тока, стекающего с провода в землю через беседку,  $I = 60 \text{ А}$  и удельного сопротивления грунта  $\rho = 200 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ .

*Требуется:* определить разность потенциалов между стойкой (сиденьем) и столом. Эту разность потенциалов в данном случае можно считать напряжением прикосновения  $U_{пр}$  для пострадавшего.

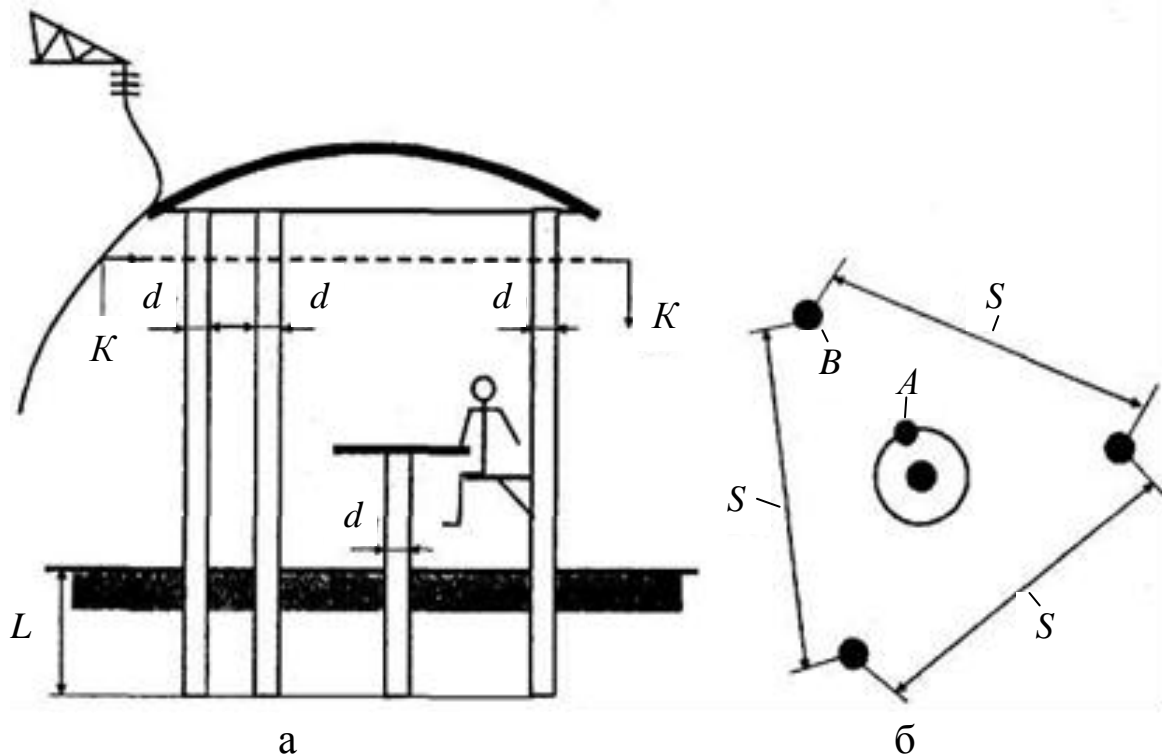


Рис. 13. Смертельное поражение мальчика электрическим током в металлической беседке: а – общий вид беседки; б – расположение несущих нагрузку стоек беседки (вид сверху)

8. Электромонтер, производя измерительные работы в трехфазной трехпроводной электросети напряжением 660 В с изолированной нейтралью, случайно замкнул одну из фаз на землю и оказался под напряжением этой фазы.

*Дано:* сопротивления изоляции относительно земли  $r_1 = r_2 = r_3 = r = 3000 \text{ Ом}$ , сопротивления емкости проводов относительно земли  $C_1 = C_2 = C_3 = C = 1,2 \text{ мкФ}$ ; сопротивление замыкания провода на землю  $r_{з.м} = 180 \text{ Ом}$ ; сопротивление тела чело-

века  $R_h = 800$  Ом; удельное сопротивление земли  $\rho = 80$  Ом·м; расстояние от человека до места замыкания фазы на землю 20 м; сопротивление обуви пострадавшего  $R_{об} = 0$ .

*Требуется:* определить ток, протекавший через тело пострадавшего, и его напряжение прикосновения без учета и с учетом сопротивления основания.

9. На территории предприятия в трехфазной трехпроводной электрической сети 660 В небольшой протяженности произошло замыкание одной фазы на металлический сосуд в виде бочки с полусферическим дном радиусом  $R_1$ . Сосуд заглублен в землю до центра его полусферы.

В момент замыкания к сосуду прикоснулся человек, стоявший на металлическом предмете, который по форме можно уподобить шару радиусом  $R_2$ , заглубленному в землю до его центра (рис. 14). Человек получил электрический удар и ожог руки, но остался жив.

*Дано:* радиусы сосуда и полусферы, на которой стоял пострадавший,  $R_1 = R_2 = 0,15$  м; расстояние между указанными полусферами  $L = 20$  м; удельное сопротивление земли  $\rho = 160$  Ом·м; сопротивление изоляции каждого провода относительно земли  $r_1 = r_2 = r_3 = r = 1800$  Ом; сопротивление тела человека  $R_h = 1000$  Ом.

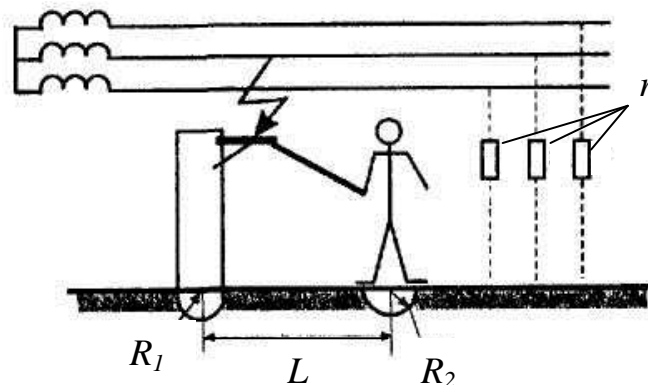


Рис. 14. Поражение человека электрическим током при замыкании фазы электросети на металлическую конструкцию

*Требуется:* определить ток  $I_h$  и напряжение прикосновения  $U_{пр}$ , воздействию которых подвергся пострадавший.

*Указания:* емкости проводов электросети относительно земли вследствие малой ее протяженности принять равными нулю; в соответствии с результатами измерений, сопротивление обуви пострадавшего следует также считать равным нулю.

#### 4. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Данные методические указания предназначены как для практического занятия, так и для самостоятельной работы студентов.

В результате изучения темы «Напряжение прикосновения» студент должен получить навыки самостоятельного применения основных теоретических положений при решении конкретных задач.

Изучение темы складывается из:

- самостоятельного изучения теоретического материала;
- самоконтроля теоретического материала;
- объяснения теоретического материала преподавателем;
- решения задач на практических занятиях;
- получения зачета по теме.

При самостоятельной работе по изучению теоретического материала необходимо ознакомиться как с вышеприведенными теоретическими положениями, так и повторить необходимый теоретический материал, изучаемый ранее.

Большое значение для усвоения темы имеет выполнение заданий, которые способствуют усвоению и закреплению теоретических материалов, а также дают навык практического применения основных теоретических положений.

Перед решением задачи должно быть приведено её условие. Решение задачи предварительно выполнить в общем виде с последующей подстановкой числовых значений соответствующих величин. Все вычисления должны доводиться до конца с точностью до второго значащего знака. Для каждой величины, полученной в результате вычислений, необходимо указать её размерность.

При невыполнении вышеперечисленных требований студенты к зачету не допускаются. Зачет по теме осуществляется в виде собеседования преподавателя со студентом.

В случае затруднения при изучении темы, а также при решении задач следует обращаться на кафедру электроснабжения горных и промышленных предприятий для получения необходимых консультаций.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Долин, П. А. Основы техники безопасности в электроустановках: учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. / П. А. Долин. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 448 с.

2. Электробезопасность: Теория и практика: учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по направлениям подготовки «Электроэнергетика», «Электротехника, электромеханика и электротехнологии». – 3-е изд., перераб. и доп. / П. А. Долин [и др.]; под ред. В. Т. Медведева. – М.: МЭИ, 2012. – 280 с.

3. Долин, П. А. Электробезопасность: задачник: учеб. пособие для вузов / П. А. Долин, В. Т. Медведев, В. В. Корочков; под ред. В. Т. Медведева. – М.: Гардарики, 2003. – 215 с.

4. Куценко, Г. Ф. Охрана труда в электроэнергетике: практ. пособие для электротехн. персонала пром. предприятий и организаций / Г. Ф. Куценко. – Минск: Дизайн ПРО, 2005. – 784 с.

5. Манойлов, В. Е. Основы электробезопасности. – 5-е изд., перераб. и доп. / В. Е. Манойлов. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1991. – 480 с.

6. Электробезопасность на промышленных предприятиях: справочник / Р. В. Сабарно [и др.]. – Киев: Техніка, 1985. – 288 с.

7. Охрана труда в электроустановках: учеб. для студентов вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. / под ред. Б. А. Князевского. – М.: Энергия, 1977. – 320 с.

8. Белявин, К. Е. Электробезопасность при эксплуатации электроустановок: справ. пособие. – 2-е изд., стереотип. / К. Е. Белявин, Б. В. Кузнецов. – Минск: Технопринт, 2004. – 186 с.

9. Кораблев, В. П. Электробезопасность на предприятиях химической промышленности: справочник / В. П. Кораблев. – М.: Химия, 1991. – 240 с.

10. Безопасность жизнедеятельности в энергетике: учеб. для студентов вузов, обучающихся по специальности «Автоматизация технолог. процессов и пр-в (энергетика)» направления «Автоматизир. технологии и пр-ва» / В. Г. Еремин [и др.]. – М.: Академия, 2010. – 400 с.

11. Кисаримов, Р. А. Электробезопасность. – 2-е изд. / Р. А. Кисаримов. – М.: РадиоСофт, 2014. – 336 с.

12. Цапенко, Е. Ф. Электробезопасность на горных предприятиях: учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности «Электроснабжение» направления подготовки дипломированных специалистов «Электроэнергетика». – 2-е изд., стереотип. / Е. Ф. Цапенко, С. З. Шкундин. – М.: МГГУ, 2008. – 103 с.

13. ГОСТ 12.1.038–82. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов. Введ. 1983-07-01. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 8 с. – (Система стандартов безопасности труда).

14. ГОСТ 12.1.019–79. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты. Введ. 1980-07-01. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2000. – 7 с. – (Система стандартов безопасности труда).