

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 ШАГА

**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 шага: 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 шага, 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 шага 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 шага называется напряжение между двумя точками цепи тока, находящимися одна от другой на расстоянии шага, на которых одновременно стоит человек, или, иначе говоря, падение напряжения в сопротивлении тела человека, V ,

$$U_{ш} = I_h R_h, \quad (1)$$

где I_h – ток, проходящий через человека по пути нога-нога, А; R_h – сопротивление тела человека, Ом.

В области защитных устройств от поражения током – заземления, зануления и др. – интерес представляют в первую очередь напряжения между точками на поверхности земли (или иного основания, на котором стоит человек) в зоне растекания тока с заземлителя. В этом случае напряжением шага будет являться разность потенциалов $\varphi_x, В$, и $\varphi_{x+a}, В$, двух точек на поверхности земли в зоне растекания тока, которые находятся на расстоянии x и $(x + a)$ от заземлителя и на расстоянии шага одна от другой и на которых одновременно стоит человек (рис. 1). При этом длина шага a принимается равной 0,8 м. Таким образом, напряжение шага, V , будет

$$U_{ш} = \varphi_x - \varphi_{x+a}. \quad (2)$$

Поскольку φ_x и φ_{x+a} являются частями потенциала заземлителя φ_3 , разность их также есть часть этого потенциала. Поэтому выражение (2) мы вправе записать так:

$$U_{ш} = \varphi_x \beta_1, \quad (3)$$

где β_1 – коэффициент напряжения шага или просто коэффициент шага, учитывающий форму потенциальной кривой:

$$\beta_1 = \frac{\varphi_x - \varphi_{x+a}}{\varphi_3} < 1. \quad (4)$$

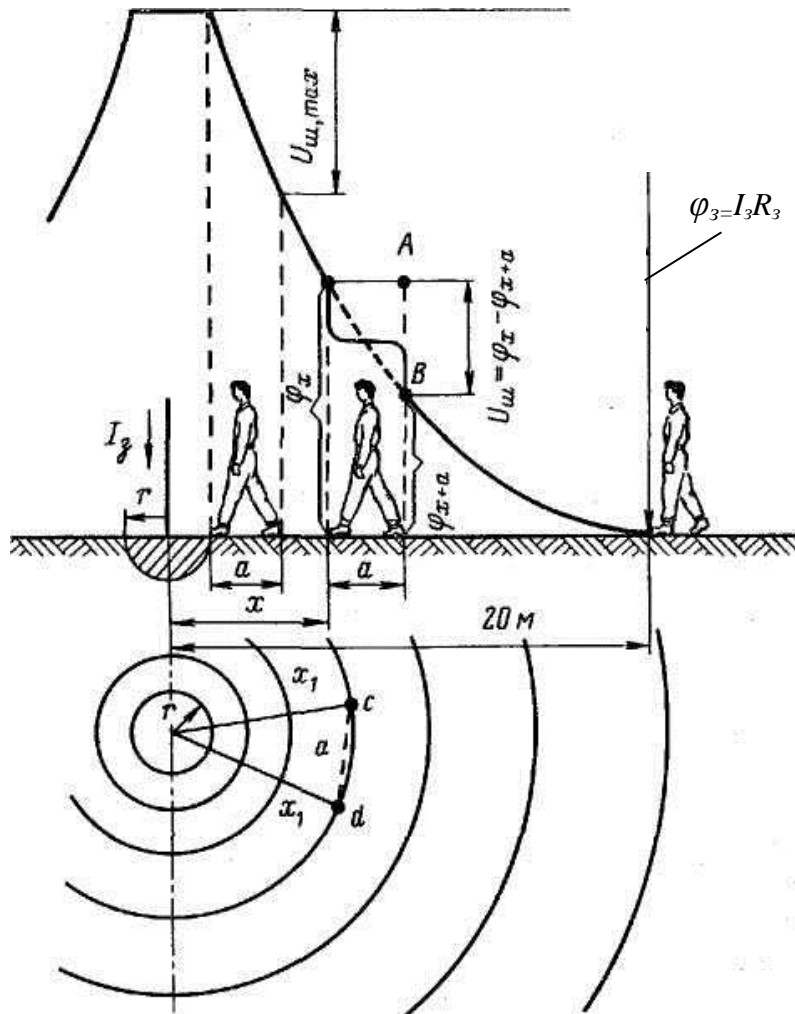


Рис. 1. Напряжение шага при одиночном заземлителе

2.1. Напряжение шага при одиночном заземлителе

Напряжение шага определяется отрезком АВ (рис. 1), длина которого зависит от формы потенциальной кривой, т. е. от типа заземлителя, и изменяется от некоторого максимального значения до нуля с изменением расстояния от заземлителя.

Наибольшие значения $U_{ш}$ и β_1 будут при наименьшем расстоянии от заземлителя, когда человек одной ногой стоит непосредственно на заземлителе, а другой – на расстоянии шага от него. Объясняется это тем, что потенциал вокруг заземлителей рас-

пределяется по вогнутым кривым и, следовательно, наибольший перепад оказывается, как правило, в начале кривой.

Наименьшие значения $U_{ш}$ и β_1 будут при бесконечно большом удалении от заземлителя, т. е. за пределами поля растекания тока, а практически дальше 20 м. В этом месте $U_{ш} \approx 0$ и $\beta_1 = 0$.

На расстояниях меньше 20 м $U_{ш}$ и β_1 будут иметь промежуточные значения, зависящие от типа заземлителя.

При одиночном полушаровом заземлителе радиусом r (рис. 1) напряжение шага, В, с учетом выражения для потенциала любой точки на поверхности земли вокруг заземлителя $\varphi = \varphi_3 r \frac{1}{x}$ составит

$$U_{ш} = \varphi_3 \frac{r}{x} - \varphi_3 \frac{r}{x+a} = \varphi_3 \frac{ra}{x(x+a)}, \quad (5)$$

а коэффициент шага

$$\beta_1 = \frac{ra}{x(x+a)}, \quad (6)$$

где x – расстояние от центра заземлителя, м; a – длина шага, м.

При $x = \infty$ (практически при $x \geq 20$ м) $U_{ш} = 0$ и $\beta_1 = 0$. Этот же результат получим и вблизи заземлителя, если $a = 0$, т. е. когда ступни ног человека находятся рядом или на одной эквипотенциальной линии, а, следовательно, на одинаковом расстоянии от заземлителя (точки c и d на рис. 1).

При наименьшем значении x (при $x = r$), т. е. когда человек одной ногой стоит на заземлителе, а другой – на расстоянии $(r+a)$ от его центра, получим максимальные значения $U_{ш}$ и β_1 :

$$U_{ш.\max} = \varphi_3 \frac{a}{r+a}; \quad \beta_{1.\max} = \frac{a}{r+a}.$$

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

Для одиночного стержневого вертикального заземлителя $U_{ш.\max}$ можно получить, вычтя уравнение потенциала некоторой

точки основания $\varphi = \frac{I_3 \rho}{2\pi l} \int_0^l \frac{dy}{\sqrt{x^2 + y^2}} = \frac{I_3 \rho}{2\pi l} \ln \frac{\sqrt{x^2 + l^2} + l}{x}$ из урав-

нения 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; ρ – удельное сопротивление земли, Ом·м). При этом в уравнении потенциала некоторой точки основания надо заменить x на a и для упрощения принять $a^2 + l^2 = l^2$.

Тогда получим, В,

$$U_{ш.макс} = \frac{I_3 \rho}{2\pi l} \ln \frac{a}{r}; \quad (7)$$

соответственно

$$\beta_{1.макс} = \frac{U_{ш.макс}}{\varphi_3} = \frac{\ln a - \ln r}{\ln 2l - \ln r}. \quad (8)$$

Для протяженного заземлителя круглого сечения, лежащего на поверхности земли, аналогично:

а) вдоль оси

$$U_{ш.макс} = \frac{I_3 \rho}{2\pi l} \ln \frac{al}{r^2}; \quad (9)$$

б) поперек оси

$$U_{ш.макс} = \frac{I_3 \rho}{\pi l} \ln \frac{a}{r}. \quad (10)$$

2.2. Напряжение шага при групповом заземлителе

В пределах площади, на которой размещены электроды группового заземлителя, напряжение шага меньше, чем при одиночном заземлителе, но также изменяется от некоторого максимального значения до нуля при удалении от электродов (рис. 2).

Наибольшее напряжение шага будет, как и при одиночном заземлителе, в начале потенциальной кривой, т. е. когда человек одной ногой стоит непосредственно на электроде (или на участке земли, под которым зарыт электрод), а другой – на расстоянии шага от электрода (положения А и Д на рис. 2)

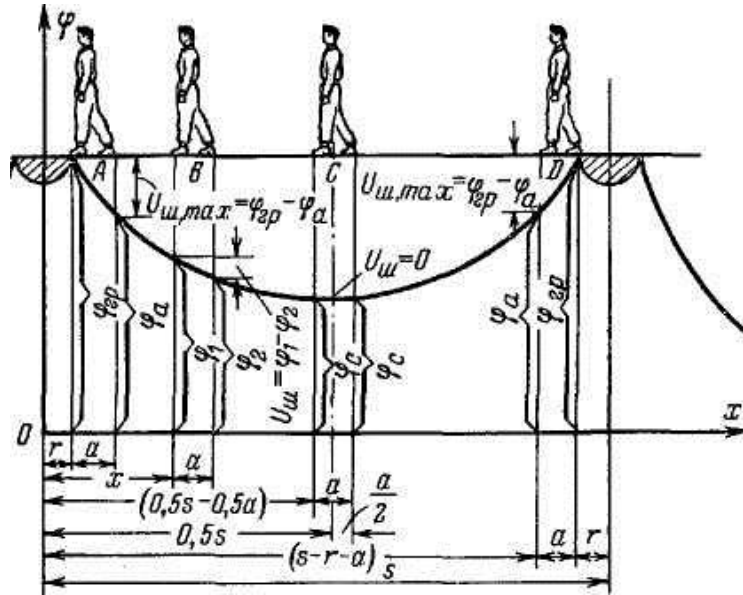


Рис. 2. Напряжение шага при групповом заземлителе

Наименьшее напряжение шага соответствует случаю, когда человек стоит на «точках» с одинаковыми потенциалами (положение С). В этом случае $U_{ш} = 0$.

Проверим эти выводы на примере группового заземлителя, состоящего из двух одиночных полушаровых электродов (рис. 2).

Зная уравнение потенциальной кривой $\varphi = \varphi_{зр} \frac{r(s-r)}{x(s-x)}$, напишем уравнение для $U_{ш}$, в

$$U_{ш} = \varphi_x - \varphi_{x+a} = \varphi_{зр} r(s-r) \left[\frac{1}{x(s-x)} - \frac{1}{(x+a)(s-x-a)} \right].$$

Из этого уравнения видно, что $U_{ш.маx}$ будет при наименьшем и наибольшем значениях x , т. е. при $x=r$ и $x=s-(r+a)$:

$$U_{ш.маx} = \varphi_{зр} \left[1 - \frac{r(s-r)}{(r+a)(s-r-a)} \right].$$

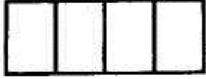
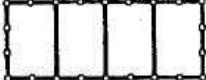
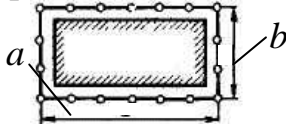
Наименьшее значение $U_{ш} = 0$ будет при $x = s/2 - a/2$.

С уменьшением s снижается и $U_{ш}$.

Максимальные значения β_1 для некоторых заземлителей приведены в табл. 1.

Таблица 1

Наибольшие значения коэффициентов шага

Тип заземлителя	Число внутренних полос	Расстояние между параллельными полосами, м	β_1
Одиночный горизонтальный; заглубление $t_0 \approx 0,5$ м	–	–	0,3
Групповой – вертикальные стержневые электроды расположены в ряд и соединены полосой; заглубление $t_0 \approx 0,8$ м	–	–	0,6
Групповой контурный из полос с внутренними параллельными полосами; $t_0 \approx 0,5$ м 	2	2,5 5 10 15	0,15
	5	2,5 5 10 15	
	10	2,5 5 10 15	
Групповой контурный из стержней и полос с внутренними параллельными полосами; $t_0 \approx 0,5$ м 	5	2,5 5 10 15	0,15
	10	2,5 5 10 15	
Групповой контурный из стержней и полос (внутри здания, сооружения); $t_0 \approx 0,5$ м 	–	$a = b$ $a = 2b$ $a = 3b$	0,3 0,25 0,2

Примечание. Для заземлителя последнего типа отношение расстояния между соседними вертикальными электродами s и длиной вертикального электрода l_v , т. е. s/l_v , находится в пределах 1-3.

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

Как и в случае напряжения прикосновения, разность потенциалов между двумя точками, на которых стоит человек, т. е. $\varphi_x - \varphi_{x+a} = \varphi_3 \beta_1$, делится между сопротивлением тела человека и последовательно соединенным с ним сопротивлением растеканию основания, на котором он стоит, $R_{осн}$, Ом.

В данном случае сопротивление основания складывается из двух последовательно соединенных сопротивлений растеканию ног человека: $R_{осн} = 2R_h$ (рис. 3).

Следовательно,

$$\varphi_3 \beta_1 = I_h (R_h + R_{осн}) = \frac{U_{ш}}{R_h} (R_h + 2R_h),$$

Откуда напряжение шага, В,

$$U_{ш} = \varphi_3 \beta_1 \frac{R_h}{R_h + 2R_h} \quad \text{или} \quad U_{ш} = \varphi_3 \beta_1 \beta_2, \quad (11)$$

где β_2 – коэффициент напряжения шага, учитывающий падение напряжения в сопротивлении растеканию основания, на котором стоит человек:

$$\beta_2 = \frac{R_h}{R_h + 2R_h}. \quad (12)$$

или с учетом того, что $R_h = \rho/2d \approx 3\rho$ (пояснения см. в методических указаниях по теме «Напряжение прикосновения»)

$$\beta_2 = \frac{R_h}{R_h + 6\rho}. \quad (13)$$

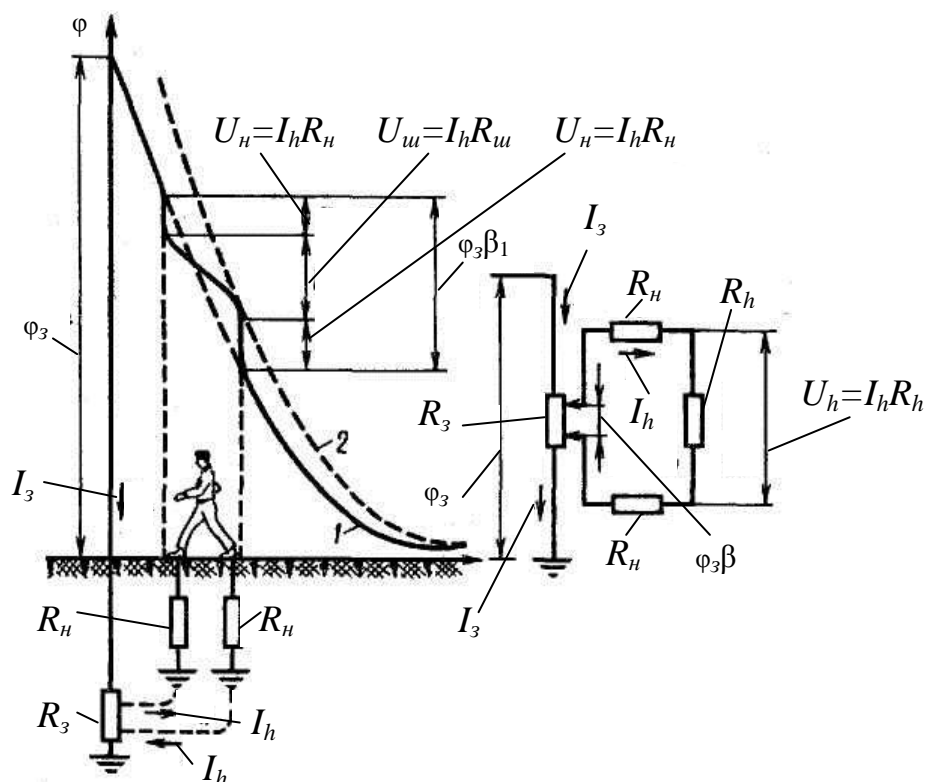


Рис. 3. К определению напряжения шага с учетом падения напряжения в сопротивлении растеканию ног человека: 1 – потенциальная кривая; 2 – кривая, характеризующая изменение $U_{ш}$ с изменением расстояния от заземлителя

3. ЗАДАЧИ

1. На ВЛ напряжением 10 кВ оборвался один из проводов. Участок этого провода длиной $2L$ лег на землю.

Человек, идущий поперек оси участка провода, лежащего на земле, наступил одной ногой точно на середину этого участка, а другой ногой на землю на расстоянии шага от первой (рис. 4). Человек подвергся воздействию шагового напряжения и упал на землю, однако остался жив.

Дано: длина линии электросети, в состав которой входит и поврежденный участок: воздушной $L_в = 105$ км, кабельной $L_к = 12$ км; длина участка провода, лежащего на земле, $2L = 18$ м; длина шага $a = 0,8$ м; удельное сопротивление земли $\rho = 100$ Ом·м; диаметр провода $d = 0,2$ м; сопротивление тела человека $R_ч = 1000$ Ом.

Требуется: вычислить потенциал оборванного провода и шаговое напряжение пострадавшего.

Указания: принять, что участок провода, лежащий на земле, погружен в землю на половину его диаметра; сопротивление обуви пострадавшего и сопротивление растеканию тока с его ног вследствие сырой погоды принять равными нулю.

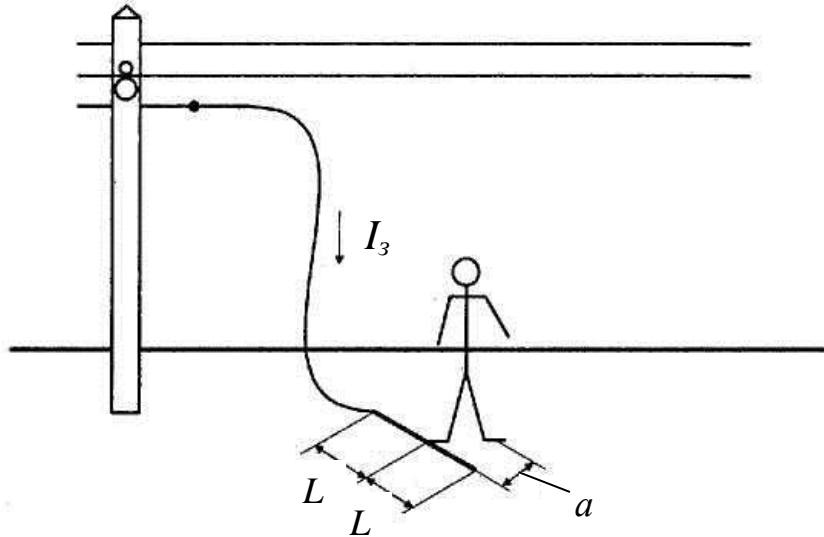


Рис. 4. Человек под шаговым напряжением

2. На ВЛ напряжением 35 кВ с металлическими решетчатыми опорами в результате наброса провода произошло замыкание одной фазы на тело опоры. При этом воздействию тока во время аварии подверглись два человека: первый шел вблизи опоры, на которую произошло замыкание, на расстоянии x_1 от оси опоры, второй касался металлической стойки забора 3, вбитой в землю и отстоящей от опоры на расстоянии x_2 (рис. 5).

Дано: суммарная протяженность ВЛ 35 кВ, к которой относится и поврежденный участок, $L_{\Sigma} = 200$ км (кабельная сеть отсутствует); удельное сопротивление земли $\rho = 100$ Ом·м; длина шага человека $a = 0,8$ м; сопротивление тела человека $R_h = 1000$ Ом; расстояния: $x_1 = 2$ м; $x_2 = 4$ м; $b = 0,8$ м.

Требуется: определить шаговое напряжение для первого человека и напряжение прикосновения для второго с учетом сопротивления основания, на котором стоит человек, а также потенциал стойки 3.

Указания: ток с опоры в землю стекает через ее фундамент, представляющий собой бетонный параллелепипед, считать его токопроводящим и заменить металлическим полушаром.

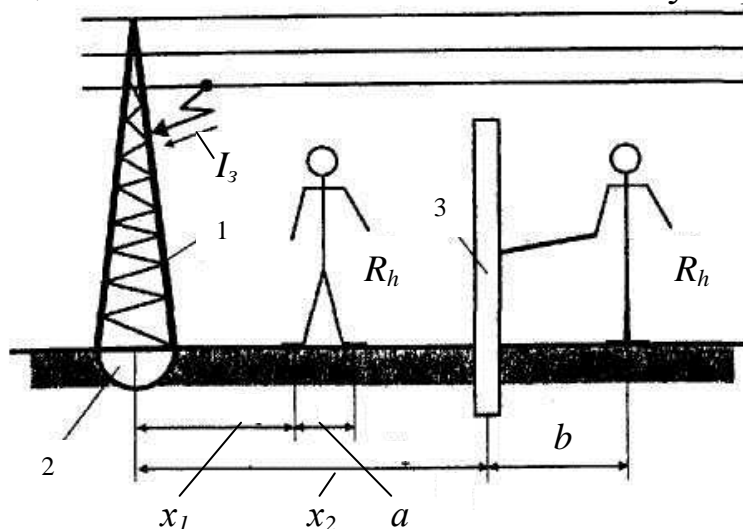


Рис. 5. Случай воздействия электрического тока на людей, оказавшихся вблизи металлической решетчатой опоры ВЛ 35 кВ, на которую произошло замыкание провода: 1 – опора линии; 2 – бетонный фундамент опоры; 3 – металлическая стойка забора

3. На воздушной линии электропередачи (ВЛ) с металлическими опорами круглого сечения произошло замыкание фазного провода на тело опоры. При этом воздействию тока подверглись два человека: первый, идущий к опоре, на которую произошло замыкание, и находившийся на расстоянии x_1 от нее, и второй, касавшийся металлической стойки забора, закрепленной в земле и отстоящей от центра опоры ВЛ на расстоянии x_2 (рис. 6).

Дано: ток, стекающий с опоры в землю, $I = 50$ А; заглубление опоры в землю $L = 2$ м; диаметр опоры $d = 0,2$ м; удельное сопротивление земли $\rho = 100$ Ом·м; сопротивление тела человека $R_h = 1000$ Ом; длина шага $a = 0,8$ м; расстояния: $x_1 = 2$ м; $x_2 = 4$ м, $b = 1,0$ м, $x_3 = 45$ м.

Требуется: определить напряжение шага для первого человека и напряжение, прикосновения для второго человека; в обоих случаях учесть сопротивления оснований, на которых находились эти люди. Необходимо также определить потенциал стойки и показание вольтметра.

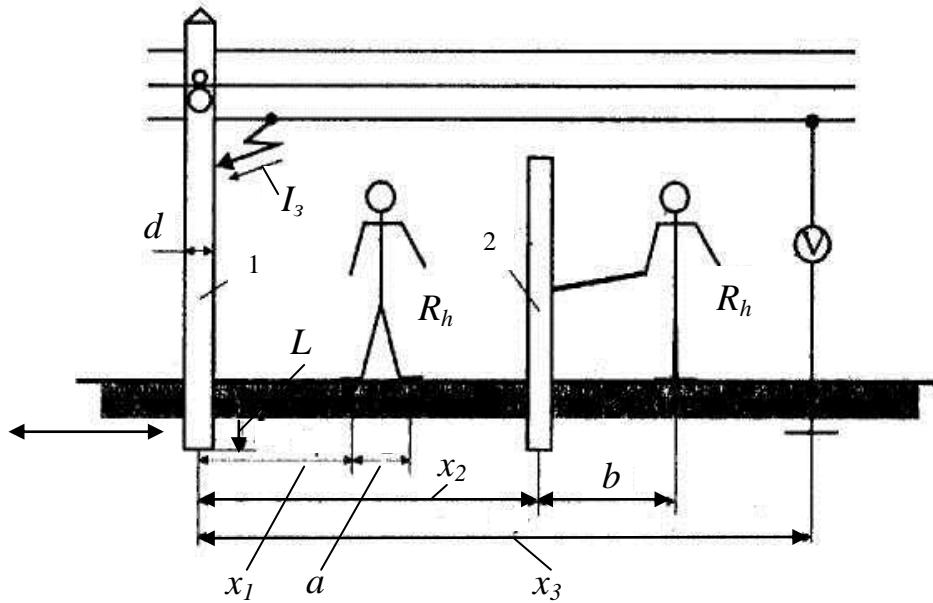


Рис. 6. Случай воздействия электрического тока на людей, оказавшихся вблизи металлической опоры ВЛ, на которую произошло замыкание провода: 1 – опора линии круглого сечения; 2 – металлическая стойка забора

4. На воздушной линии электропередачи напряжением 35 кВ оборвался провод и замкнулся на металлическую трубу, лежащую на земле.

Находившиеся вблизи трубы два человека оказались под напряжением. Первый случайно дотронулся до оборванного провода, стоя одной ногой на земле вблизи торца трубы (на продольной оси трубы), а другой – на ступеньке сухой деревянной лестницы. Второй пострадавший стоял одной ногой на торце трубы, а другой ногой – на земле на продольной оси трубы на расстоянии шага от торца (рис. 7).

Дано: длина трубы $L_T = 10$ м; диаметр трубы $d = 0,1$ м; длина электрически связанных воздушных линий электросети 35 кВ, частью которой является поврежденная линия, $L_B = 210$ км; удельное сопротивление земли $\rho = 150$ Ом·м; расстояние от конца трубы до ноги человека, стоящей на земле, $S = 1$ м; сопротивление тела человека $R_h = 1000$ Ом; длина шага человека $a = 0,8$ м.

Требуется: вычислить коэффициент напряжения прикосновения α_1 , а также напряжение прикосновения U_{np} пострадавшие-

го, работавшего на лестнице; вычислить коэффициенты напряжения шага β_1 и β_2 , а также напряжение шага $U_{ш}$ пострадавшего, стоявшего одной ногой на трубе.

Указания: считать, что труба погружена в землю на половину ее диаметра, вследствие чего продольная ось трубы лежит на поверхности земли; сопротивление обуви пострадавшего принять равным нулю; проводимость лестницы на участке нижней ступени, как показали испытания, весьма мала и при расчете должна быть принята равной нулю.

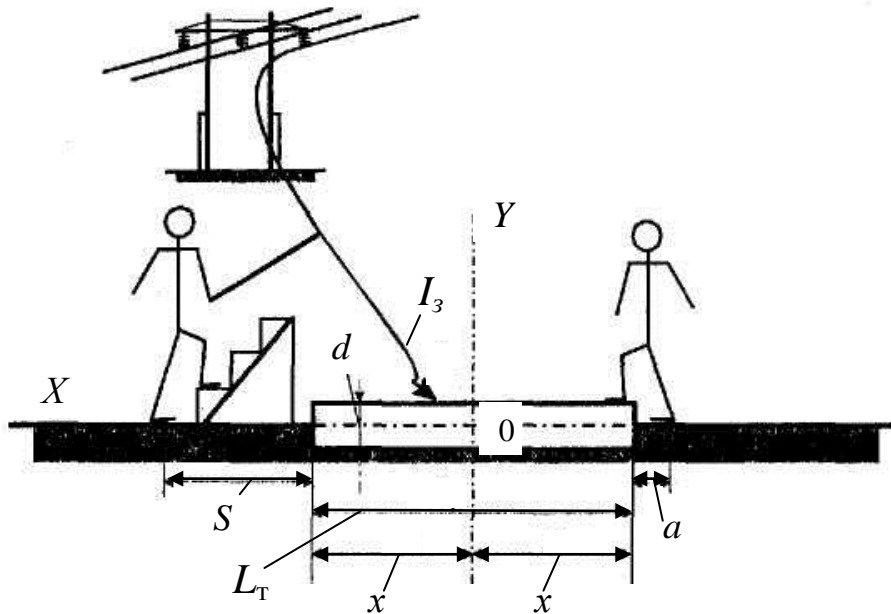


Рис. 7. Попадание людей под напряжение прикосновения и напряжение шага при обрыве и падении на землю провода ВЛ 35 кВ с изолированной нейтралью

5. На воздушной линии электропередачи 35 кВ с металлическими опорами, имеющей двухстороннее питание, произошел обрыв провода, конец которого упал в небольшой водоем (пруд).

При этом воздействию тока подверглись четыре человека: 1 – человек, работающий на опоре, которого коснулся оборвавшийся провод; 2 и 3 – касавшиеся в момент аварии металлического тела опоры; 4 – идущий в непосредственной близости от водоема (рис. 8). Один из них был смертельно поражен током. На его руке возник ожог и образовались электрические знаки в виде выпуклых круглых пятен темно-желтого цвета.

Дано: суммарная длина электрической сети 35 кВ, от которой питался поврежденный участок, равна 86 км, в том числе воздушной $L_{\text{в}} = 70$ км и кабельной $L_{\text{к}} = 16$ км; удельное сопротивление земли $\rho = 200$ Ом·м; сопротивление тела человека $R_h = 1000$ Ом; размеры: $D = 4$ м, $a = 0,8$ м, $b = 2$ м.

Требуется: определить значения напряжения прикосновения для первого, второго и третьего человека и напряжение шага для четвертого человека с учетом сопротивления основания каждого пострадавшего.

Указания: форму водоема следует принять в виде полусферы диаметром D , м.

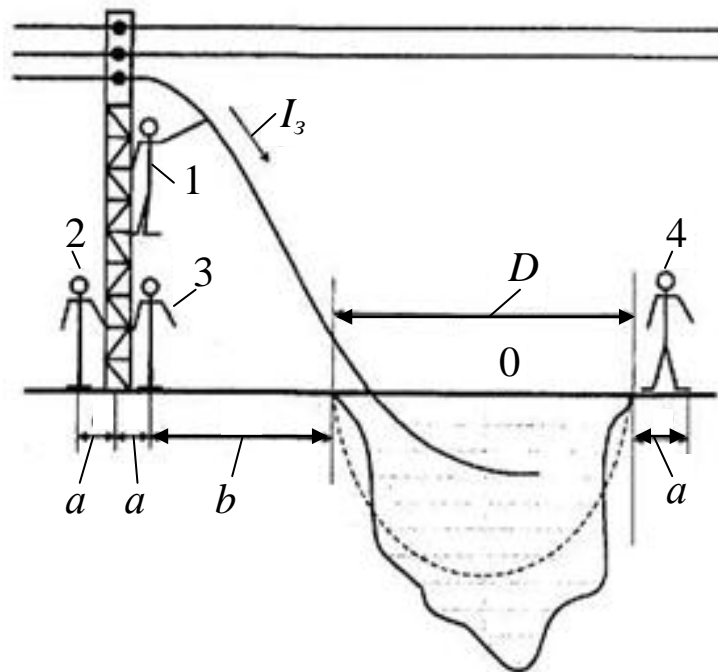


Рис. 8. Группа людей, оказавшихся под напряжением при аварии на ВЛ 35 кВ – обрыве провода и падении его в водоем

4. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

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

В результате изучения темы «Напряжение шага» студент должен получить навыки самостоятельного применения основ-

ных 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 / П. А. Долин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 448 с.

2. Электробезопасность: Теория и практика: учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по направлениям подготовки «Электроэнергетика», «Электротехника, электромеханика и электростроительство» / П. А. Долин, В. В. Козлов, В. В. Козлов, В. В. Козлов. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 448 с.

тротехнологии» / П. А. Долин [и др.]; под ред. В. Т. Медведева. – 3-е изд., перераб. и доп. – 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 / В. Е. Манойлов. – 5-е изд., перераб. и доп. – 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 / под ред. Б. А. Князевского. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1977. – 320 с.

8. Белявин, К. Е. Электробезопасность при эксплуатации электроустановок: справ. пособие / К. Е. Белявин, Б. В. Кузнецов. – 2-е изд., стереотип. – 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: учебник 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 / Р. А. Кисаримов. – 2-е изд. – М.: РадиоСофт, 2014. – 336 с.

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