

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  
Т. Ф. Малахова  
С. Г. Захаренко

## **ЗАЩИТНОЕ ЗАЗЕМЛЕНИЕ**

**Методические указания к практическим занятиям  
для студентов всех форм обучения**

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

Кемерово 2015

**РЕЦЕНЗЕНТЫ:**

**С. А. Захаров** – заведующий кафедрой электроснабжения горных и промышленных предприятий

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

**Малахова Татьяна Федоровна, Захаренко Сергей Геннадьевич.** Защитное заземление: методические указания к практическим занятиям по дисциплине «Электробезопасность» [Электронный ресурс] для студентов направления подготовки 13.03.02 (140400.62) «Электроэнергетика и электротехника», образовательная программа «Электроснабжение», всех форм обучения / сост.: Т. Ф. Малахова, С. Г. Захаренко. – Кемерово: КузГТУ, 2015. – Систем. требования: PentiumIV; ОЗУ 8 Мб; Windows XP; мышь. – Загл. с экрана.

Составлено в соответствии с программой дисциплины «Электробезопасность» и предназначено для проведения практических занятий и самостоятельной подготовки студентов по изучению действия защитного заземления, видов заземления, явления растекания тока в земле с одиночного и группового заземлителя, систем заземления электрических сетей.

Приведены примеры решения задач по оценке эффективности защитного заземления.

© КузГТУ  
© Малахова Т. Ф.,  
Захаренко С. Г.  
составление, 2015

## 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ

В соответствии с программой целью дисциплины «Электробезопасность» является изучение мероприятий по повышению надежности, безопасности, рационального и безаварийного использования электрооборудования.

**Цель практического занятия:** Изучить основные требования к защитному заземлению для обеспечения электробезопасности.

### Порядок выполнения

1. Предварительное самостоятельное изучение теоретического материала
2. Обсуждение вопросов
  - Использование различных типов заземления в производстве, на электрических подстанциях, в быту
  - Особенности схем заземления согласно ПУЭ
  - Особенности расчета эффективности защитного заземления в различных режимах нейтрали
3. Решение задач по расчету эффективности защитного заземления.

## 2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Тема «Защитное заземление» изучается бакалаврами на практических занятиях.

Практические занятия проводятся в интерактивной форме и заключаются в дискуссии между преподавателем и студентами. На занятиях может быть предложено решение задач совместно с преподавателем. Защита тем, рассмотренных на практических занятиях, происходит по окончании их изучения в виде собеседования. При опросе преподаватель вправе задать любой вопрос, касающийся материала практического занятия.

## 3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Существует три вида заземления:

- рабочее;
- защитное;

– заземление молниезащиты.

К *рабочему заземлению* относится заземление нейтралей силовых трансформаторов и генераторов, глухое или через дугогаасящий реактор.

*Защитное заземление* – выполняется для обеспечения безопасности, в первую очередь людей.

*Заземление молниезащиты* служит для отвода тока молнии в землю от защитных разрядников и молниеотводов (стержневых или **троссовых**).

*Заземление* – преднамеренное электрическое соединение какой-либо точки сети, электроустановки или оборудования с заземляющим устройством (ПУЭ 1.7.28).

*Заземление* – это устройство, состоящее из:

- *заземлителей*, обеспечивающих контакт с землей;
- *заземляющих проводников*, обеспечивающих соединение между заземлителями и заземляемыми частями.

*Защитное заземление* – это преднамеренное электрическое соединение с землей или ее эквивалентом металлических нетоковедущих частей, которые могут оказаться под напряжением [1].

*Заземляющим устройством* называется совокупность заземлителя и заземляющих проводников.

В различных частях электрических установок возможны пробой изоляции и замыкания на металлические корпуса двигателей, пускателей, светильников, оболочек кабелей, стальных труб проводки и т.п.

Вследствие этого металлические нетоковедущие части оборудования, не находящиеся под напряжением могут оказаться под током и представлять опасность в случае прикосновения к ним людей.

Средством защиты от поражения током при переходе напряжения на нетоковедущие части электроустановок 3 (рис. 1) является защитное заземление.

Различают два вида заземляющих устройств: контурное и выносное.

Контурное устройство в виде отдельных заземлителей, размещаемых по периметру (контуру) площадки с заземляемым оборудованием, применяется на открытых подстанциях и других установках напряжением свыше 1000 В.

Выносное заземление состоит из заземлителя 1 (рис. 2) и магистрали (заземляющих проводников) 2. Заземляемое оборудование 3 находится вне поля растекания электрического тока, так как заземлитель 1 вынесен за пределы площадки с оборудованием 3.

Заземлители делятся на искусственные и естественные.

Искусственные заземлители (электроды) делятся на: вертикальные, горизонтальные.

В качестве искусственных заземлителей (рис. 3) применяют стальные уголки, забиваемые в землю вертикально, или стальные некондиционные трубы, толщина стенок которых не менее 3,5 мм и длина 2,5-3 м. Их забивают вертикально в землю на расстоянии 2,5-3 м друг от друга и более.

Диаметр трубы не оказывает особого влияния на величину сопротивления растеканию, чаще всего берут трубы с наружным диаметром 6 см (рис. 4).

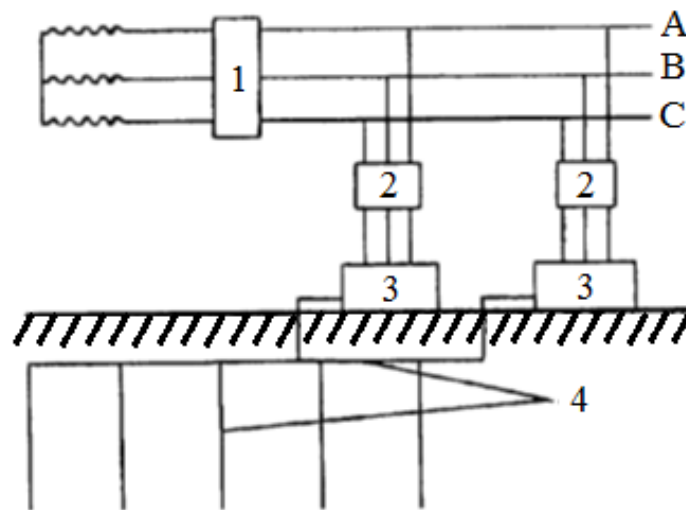


Рис. 1. Схема защитного заземления: А, В, С – фазы электросети; 1 – устройство защитного отключения; 2 – автоматические выключатели; 3 – электрооборудование; 4 – заземляющий проводник; 5 – заземлитель

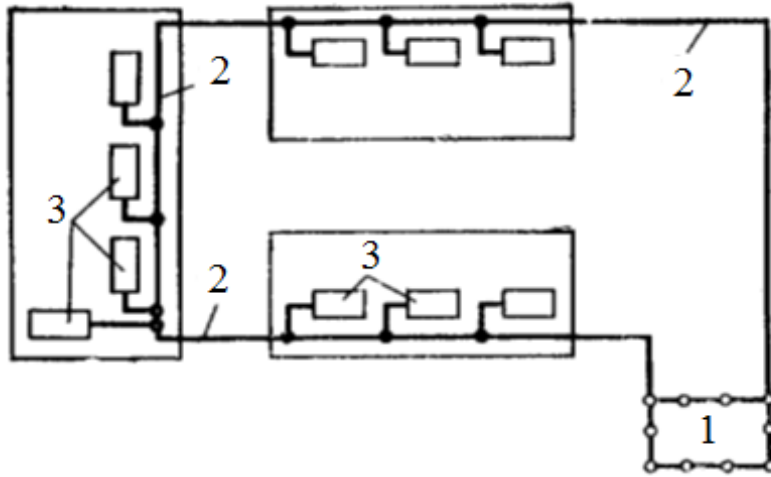


Рис. 2. Схема выносного заземления

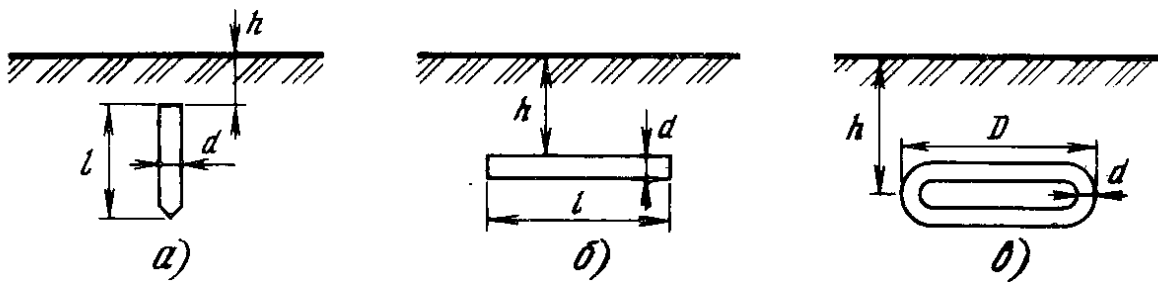


Рис. 3. Заземлители: а – вертикальный, б – горизонтальный, в – кольцевой

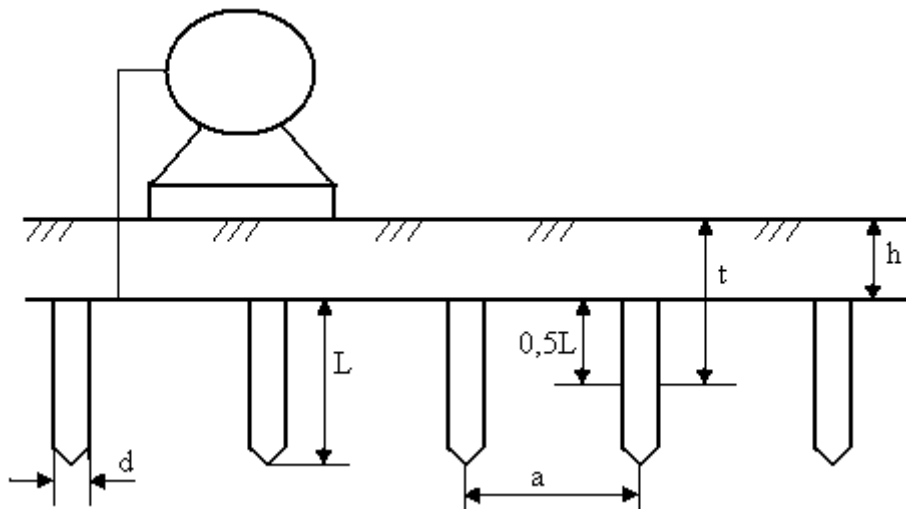


Рис. 4. Схема заземляющего устройства

Широкое применение находят углубленные прутковые заземлители из круглой стали диаметром 12-14 мм, длиной до 5 м и более, ввертываемые в грунт с помощью электрифицированного ручного заглубителя. При использовании углубленных прутковых заземлителей снижают расход металла и затраты труда по устройству заземления.

Прутковые заземлители, а также отрезки стальных уголков, используемые для заземления, наиболее выгодны, так как с их помощью можно достичь более глубоких слоев земли при значительно меньшем объеме земляных работ. Глубокая же закладка необходима для создания контакта со слоями почвы, не подверженными промерзанию или высыханию.

Для связи уголков и труб между собой применяют стальные полосы (ленты). Толщина их должна быть не менее 4 мм, а площадь поперечного сечения не менее 48 мм<sup>2</sup> для установок до 1000 В и 100 мм<sup>2</sup> – для установок выше 1000 В.

Наименьшие размеры заземлителей и заземляющих проводников приведены в табл. 1.

Таблица 1

Размеры заземлителей и заземляющих проводников  
в зданиях, наружных установках и в земле

Наименование и форма заземляющих проводников	В зданиях	В наружных установках	В земле
Круглые диаметром, мм	5	6	10
Прямоугольные: сечение, мм <sup>2</sup> толщина, мм	24 3	48 4	100 4
Угловая сталь, толщина по- лок, мм	2	2,5	4
Газопроводные трубы, толщина стенок, мм	2,5	2,5	3,5

Правила устройства электроустановок (ПУЭ) предусматривают использование естественных заземлителей – электропроводящих частей коммуникаций, зданий и сооружений производственного или иного назначения, находящихся в соприкоснове-

нии с землей. В качестве естественных заземлителей могут использоваться:

- проложенные в земле водопроводные и другие металлические трубы, за исключением трубопроводов горючих жидкостей, горючих или взрывоопасных газов; обсадные трубы артезианских колодцев, скважин и т.п.;
- металлические и железобетонные конструкции зданий и сооружений, имеющие соединение с землей;
- свинцовые оболочки кабелей, проложенных в земле;
- металлические шпунты гидротехнических сооружений;
- заземлители опор отходящих от подстанций воздушных линий электропередач, соединенных с заземляющим устройством подстанции при помощи грозозащитных тросов линий; рельсовые пути неэлектрифицированных железных дорог при наличии перемычек между рельсами.

Естественные заземлители обладают, как правило, малым сопротивлением растеканию тока, и поэтому использование их для заземления дает весьма ощутимую экономию металла. Недостатками естественных заземлителей являются доступность некоторых из них неэлектротехническому персоналу и возможность нарушения непрерывности соединения протяженных заземлителей.

Если сопротивление естественных заземлителей не удовлетворяет требованиям [2], используются искусственные заземлители, т.е. заземлители, специально выполняемые для целей заземления. Искусственные заземлители выполняются в виде вертикальных и горизонтальных электродов. В качестве вертикальных электродов используются стальные трубы с толщиной стенки не менее 3,5 мм и диаметром не менее 10 мм (обычно 50-60 мм); угловая сталь с толщиной полок не менее 4 мм (обычно размеры 40×50 мм<sup>2</sup>) и длиной 2,5-3 м. Горизонтальные электроды выполняются из полосовой стали размером не менее 4×12 мм<sup>2</sup> или стали круглого сечения диаметром не менее 6 мм. Заземлители прокладывают на глубине 0,7-0,8 м от поверхности земли. Горизонтальные и вертикальные заземлители соединяют между собой при помощи сварки.

Перед вводом заземляющих устройств в строй их испытывают – измеряют сопротивление растеканию тока, о чем должен



свидетельствовать специальный протокол. В процессе эксплуатации сопротивление заземляющего устройства не остается постоянным, оно изменяется в зависимости от погодных условий и за счет коррозии заземлителей. Поэтому заземляющие устройства периодически подвергаются осмотрам и испытаниям. При этом время испытания выбирается таким образом, чтобы удельное сопротивление грунта в момент испытания было наибольшим (летом – во время наибольшего просыхания грунта, зимой – во время наибольшего промерзания).

Измерение сопротивления заземляющих устройств подстанций промышленных предприятий производится: после монтажа и капитального ремонта; в первый год эксплуатации; периодически не реже одного раза в 3 года. Измерение сопротивления заземляющих устройств цеховых электроустановок осуществляется не реже одного раза в год. Порядок проведения испытаний и результаты измерений оформляются протоколом. Если измеренные величины сопротивлений не отвечают требованиям [2], то проводят ревизию заземляющих устройств, устанавливают дополнительные заземлители.

### *Явление растекания тока в земле*

В процессе эксплуатации электроустановок возможны случаи, когда по земле будет протекать ток. Протекание тока может быть преднамеренным (использование земли в качестве провода) или случайным (замыкание токоведущей части на заземленный корпус электроустановки, падение провода на землю). Стеkanie тока в землю сопровождается возникновением на заземлителе и поверхности земли вокруг него разности потенциалов. Возникающую при этом картину поля рассмотрим на примере одиночного полусферического заземлителя на поверхности земли (рис. 5).

Приращение потенциала на элементарном слое полусферических поверхностей вокруг заземлителя (считаем грунт однородным)

$$\partial\varphi_x = -E_x \times \partial X,$$

где  $E_x$  – напряженность электрического поля в точке, удаленной от заземлителя на расстояние  $X$

$$E_x = j_x \times \rho_x,$$

где  $j_x$  – плотность тока в рассматриваемом слое;

$\rho$  – удельное сопротивление грунта

$$j_x = \frac{I_3}{2\pi X^2},$$

где  $I_3$  – величина тока, стекающего в землю (ток замыкания).

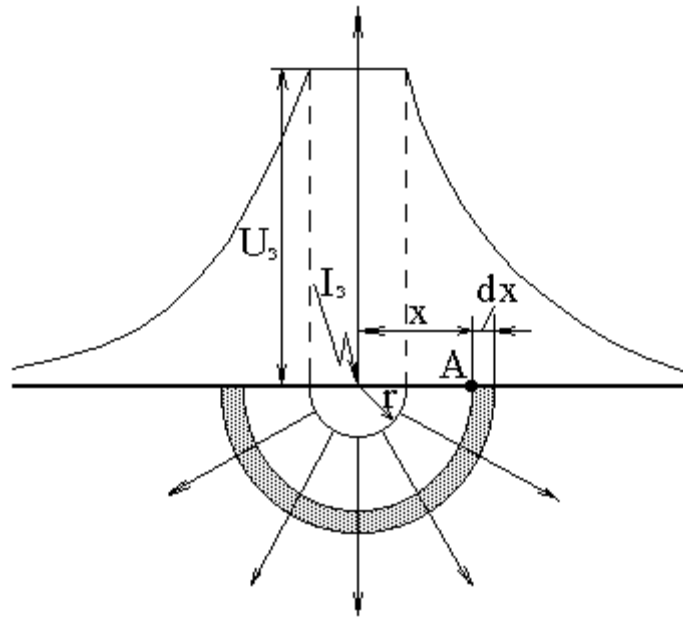


Рис. 5. Одиночный полусферический заземлитель на поверхности земли

Тогда приращение потенциала на элементарном слое можно записать

$$\partial\varphi_x = -\frac{I_3\rho}{2\pi X^2}\partial X.$$

Интегрируя по  $X$  в пределах от  $X$  до  $\infty$ , получаем выражение, характеризующее поле растекания потенциала в земле:

$$\varphi_x = \frac{I_3\rho}{2\pi X} = \frac{K}{X}.$$

где  $K$  – постоянная величина.

Таким образом, потенциал на поверхности земли вокруг заземлителя изменяется по закону гиперболы, уменьшаясь от своего максимального значения непосредственно на заземлителе

$$\varphi_3 = \frac{I_3 \rho}{2\pi \cdot r} = I_3 R_3,$$

где  $r$  – радиус заземлителя до нуля по мере удаления от заземлителя. Теоретически поле растекания простирается до бесконечности, однако для одиночного заземлителя уже на расстоянии около 20 м площадь слоя земли настолько велика, что плотность тока здесь практически равна нулю. Поэтому потенциал в точках, удаленных на 20 м и более от заземлителей, можно принимать равным нулю.

Проведенный анализ показывает, что грунт в поле растекания ведет себя как обычное сопротивление, уменьшая потенциал от некоторого значения в месте ввода тока в землю до нуля.

*Сопротивлением заземляющего устройства, или сопротивлением растеканию тока данного заземлителя*, называется сопротивление грунта поля растекания, создаваемого проводящим элементом, с которого в землю стекает ток.

Специальный анализ, выходящий за рамки настоящей работы, показывает, что величина сопротивления этой области грунта зависит от формы, количества и расположения элементов, создающих поле растекания, и удельного сопротивления земли.

В нашем случае сопротивление растеканию тока полусферического заземлителя можно определить как

$$R = \frac{U_R}{I}.$$

Падение напряжения на сопротивлении полусферического заземлителя

$$U_3 = \varphi_3 - \varphi_0,$$

$$\varphi_3 = \frac{I_3 \rho}{2\pi \cdot r},$$

где  $r$  – радиус заземлителя.

Деля это выражение на ток, получаем окончательно для сопротивления растеканию тока полусферического заземлителя

$$R_3 = \frac{\rho}{2\pi \cdot r}.$$

В реальных условиях, когда грунт вокруг заземлителя неоднороден, распределение потенциала происходит не по гиперболе, а по более сложной кривой, и выражение для сопротивления растеканию тока будет более сложным.

Протекание токов в земле представляет определенную опасность для человека. Это связано с возникновением напряжения прикосновения и шагового напряжения.

Принцип действия защитного заземления в сетях с изолированной нейтралью заключается в снижении до безопасных значений напряжений прикосновения и шага, что достигается путем уменьшения потенциала заземленного оборудования (за счет уменьшения сопротивления заземляющих устройств), а также путем выравнивания потенциалов основания, на котором стоит человек, до значений, близких к значению потенциала заземленного оборудования. Заземление применяется в сетях как выше, так и ниже 1000 В. В сетях выше 1 кВ защитное заземление обеспечивает срабатывание максимальной защиты, при этом рекомендуется предусматривать устройства автоматического поиска места замыкания на землю.

*Напряжением прикосновения* называется разность потенциалов двух точек электрической цепи, которых одновременно касается человек.

В случае касания человеком корпуса заземленной установки, на которой произошло замыкание токоведущей части, под напряжением прикосновения понимается разность между потенциалом рук, касающихся корпуса, и потенциалом основания, на котором стоит человек (рис. 6).

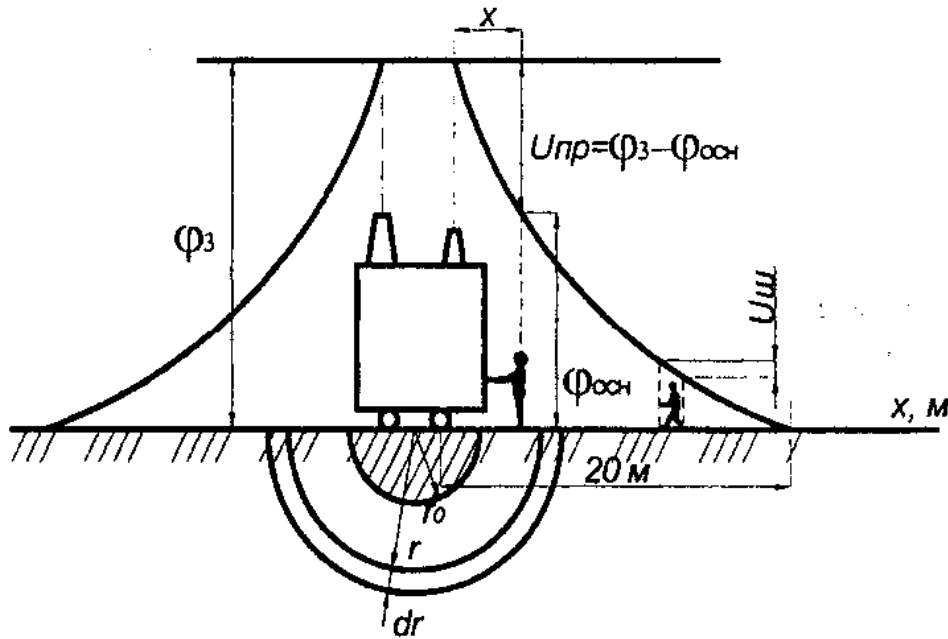


Рис. 6. Напряжение прикосновения и шага одиночного заземлителя

Пренебрегая падением напряжения в заземляющих проводниках, можно считать, что потенциал рук равен потенциалу заземлителя, а напряжение прикосновения

$$U_{пр} = \varphi_p - \varphi_{осн} = \varphi_z - \varphi_{осн} = \varphi \cdot \lambda_1,$$

где  $\lambda_1$  – коэффициент прикосновения.

Поскольку  $\varphi_z$  – величина постоянная, напряжение прикосновения определяется формой кривой распределения потенциала, оно возрастает по мере удаления от заземлителя. Практически при расстояниях, превышающих 20 м, напряжение прикосновения постоянно и имеет наибольшее значение, при этом  $\lambda_1 = 1$ . Если прикосновение происходит около заземлителя, то напряжение прикосновения равно нулю и  $\lambda_1 = 0$ .

*Шаговым напряжением* называется разность потенциалов двух точек на поверхности земли в зоне растекания тока, которые находятся на расстоянии шага и на которых одновременно стоит человек (рис. 7):

$$U_{ш} = \varphi_x - \varphi_{x+a},$$

где  $a$  – длина шага (обычно в расчетах принимается равной 0,8 м).

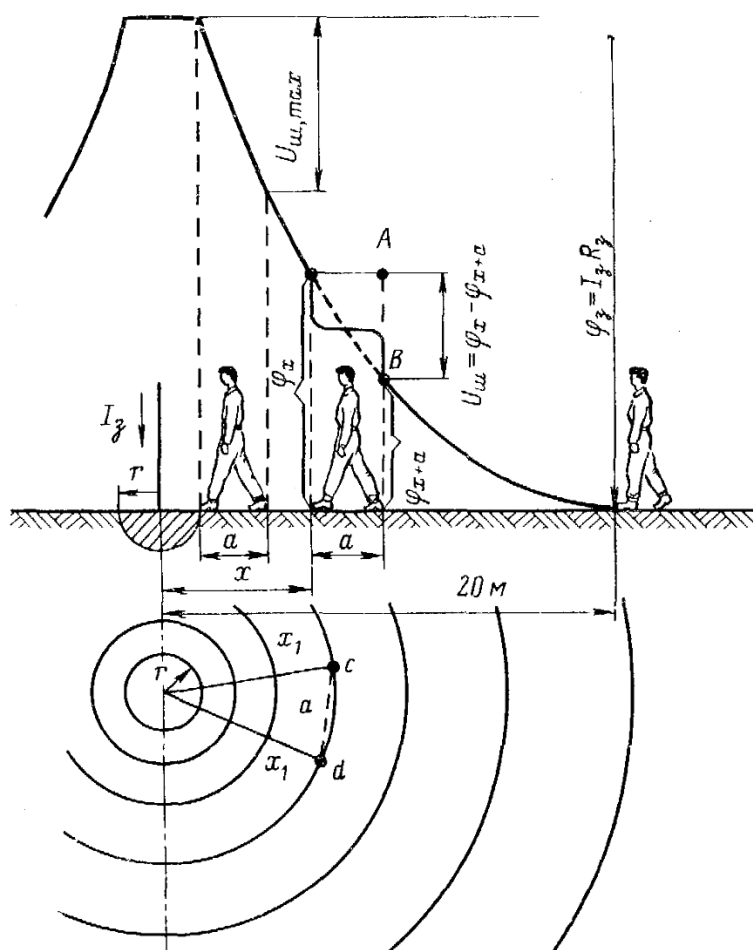


Рис. 7. Явление растекания тока в земле

Поскольку  $\varphi_x$  и  $\varphi_{x+a}$  являются частями потенциала заземлителя, то выражение шагового напряжения можно записать в виде где  $\beta_1$  – коэффициент шага, учитывающий форму кривой распределения потенциала.

Максимальным значением напряжения шага будет при наименьшем расстоянии от заземлителя, когда человек одной ногой стоит непосредственно на заземлителе, а другой – на расстоянии шага от него. Наименьшим значением шагового напряжения будет при бесконечно большом удалении от заземлителя, а практически – за пределами поля растекания тока, т.е. далее 20 м.

Шаговое напряжение зависит от ширины шага, удаления идущего человека от заземлителя, а также удельного сопротивления грунта (рис. 7).

### Явление стекания тока с группового заземлителя

Обычно заземляющие устройства состоят из нескольких вертикальных и горизонтальных заземлителей. Расстояние между вертикальными заземлителями принимают, как правило, равное их длине.

Рассмотрим стекание тока в землю через групповой заземлитель (рис. 8).

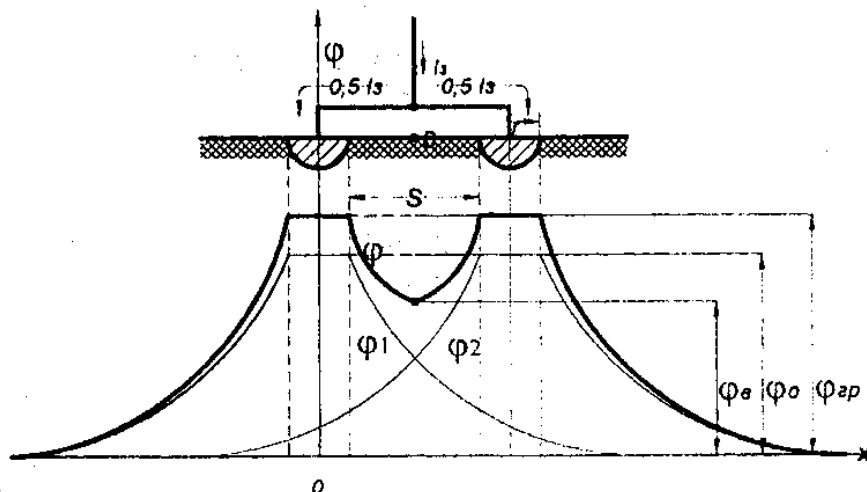


Рис. 8. Потенциальная кривая группового заземлителя, состоящего из двух полушаровых электродов

Стекание тока происходит через заземлители 1 и 2, которые имеют одинаковое сопротивление и соединены между собой изолированным проводом. Стекающие токи равны  $I_3/2$ .

Для нашей задачи

$$\varphi_1 = \varphi_0 \frac{r}{x},$$

$$\varphi_2 = \varphi_0 \frac{r}{(s-x)},$$

где  $\varphi_0$  – собственный потенциал заземлителя.

Искомое уравнение потенциальной кривой между заземлителями выражается следующим уравнением:

$$\varphi_\phi = \varphi_1 + \varphi_2 = \varphi_0 \frac{Sr}{x(S-x)}.$$

Наибольший групповой потенциал будет при  $x = r$

$$\varphi_{z.p.\max} = \varphi_0 \frac{S}{S-r}.$$

Потенциал в точке В

$$\varphi_B = \varphi_0 \frac{4r}{S} \text{ при } x = \frac{S}{2}.$$

Значение  $\varphi_{z.p.}$  в любой точке по оси  $x$  представим через  $\varphi_{z.p.\max}$ .

$$\varphi_{z.p.} = \varphi_{z.p.\max} \frac{r(S-r)}{x(S-x)}.$$

Очевидно, что с уменьшением  $S$  потенциал группового заземлителя приближается к  $\varphi_{z.p.\max}$ , т.е. к  $2\varphi_0$ . При большом  $S$  потенциал группового заземлителя  $\varphi_{z.p.}$  приближается к  $\varphi_0$ .

В общем случае собственные потенциалы электродов не равны, не равны и потенциалы, наводимые другими электродами. Однако сумма собственного и всех наведенных на заземлителе потенциалов на всех заземлителях одинакова и равна  $\varphi_{z.p.}$

$$\varphi_{z.p.} = \varphi_{01} + \sum_2^n \varphi_n.$$

Рассмотрим сопротивление группового заземлителя растеканию тока.

При расстояниях между электродами  $l > 40$  м сопротивление всей группы  $R_{z.p.}$  (Ом) определяется как и в случае параллельного соединения активных сопротивлений

$$R_{z.p.} = \frac{1}{\sum_1^n \frac{1}{R_3}},$$

Если заземлители имеют одинаковое сопротивление  $R_3$  (Ом), то

$$R_{z.p.} = \frac{R_3}{n}.$$

При расстояниях между электродами меньше 40 м происходит взаимодействие полей растеканию тока, в результате чего на



общих участках земли, по которым проходят токи, стекающие с нескольких электродов, увеличивая плотность тока и, следовательно, на этих участках увеличивается падение напряжения. Это явление, равноценное уменьшению сечения земли, по которому проходит ток, стекающий с заземлителя, приводит к увеличению сопротивления растеканию как отдельных заземлителей, составляющих групповой заземлитель, так и заземлители в целом.

При уменьшении расстояния между электродами до 40 м и менее, сопротивление растеканию группового заземлителя увеличивается

$$R_{zp} = \frac{R_{zp}}{\eta_u} = \frac{1}{\eta_u \sum_1^n \frac{1}{R_3}},$$

где  $\eta_u$  – коэффициент использования проводимости группового заземлителя.

При равенстве сопротивления всех заземлителей

$$R_{zp} = \frac{R_3}{\eta_u n}.$$

Значение  $\eta_u$  зависит от формы, размеров и размещения заземлителей, составляющих групповой заземлитель, а также от их числа ( $n$ ) и расстояния между соседними заземлителями. Так, с увеличением расстояния  $\eta_u$  возрастает и стремится к значению  $\eta_u = 1$ .

$$\eta_u = \frac{R_{zpo}}{R_{zp}}$$

или

$$\eta_u = \frac{I_3 \times R_{zpo}}{I_3 \times R_{zp}} = \frac{\Phi_{zpo}}{\Phi_{zp}}.$$

*Рассмотрим пример.*

Заземлитель состоит из 2 полушаровых заземлителей радиусом  $r = 0,5$  м, расстояние между заземлителями  $S = 2,5$  м

$$\eta_u = \frac{\varphi_0}{\varphi_0 + \varphi_n} = \frac{\varphi_0}{\varphi_0 + \varphi_0 \frac{r}{S-r}} = \frac{S-r}{S} = 0,8.$$

При 3-х электродах, расположенных в вершинах равнобедренного треугольника

$$\eta_u = \frac{\varphi_0}{\varphi_0 + 2\varphi_n} = \frac{\varphi_0}{\varphi_0 + 2\varphi_0 \frac{r}{S-r}} = \frac{S-r}{S+r} = 0,67.$$

Таким образом, увеличение сопротивления заземлителя учитывается коэффициентом использования, который меньше единицы.

$\eta_v$  – коэффициент использования вертикального заземлителя,  $\eta_2$  – коэффициент использования горизонтального заземлителя.

Значения коэффициентов использования приведены в табл. 2-7.

Таблица 2

Коэффициенты использования вертикальных электродов, размещенных в ряд, без учета влияния полосы связи,  $\eta_v$

Число электродов	$\eta_v$ при отношении расстояния между электродами к длине электрода		
	1	2	3
2	0,84-0,87	0,90-0,92	0,93-0,95
3	0,76-0,80	0,85-0,88	0,90-0,92
5	0,67-0,72	0,79-0,83	0,85-0,88
10	0,56-0,62	0,72-0,77	0,79-0,83
15	0,51-0,56	0,66-0,73	0,76-0,80
20	0,47-0,50	0,65-0,70	0,74-0,79

Таблица 3

Коэффициенты использования вертикальных электродов,  
размещенных по контуру, без учета влияния полосы,  $\eta_g$

Число электродов	$\eta_g$ при отношении расстояния между электродами к длине электрода		
	1	2	3
4	0,66-0,72	0,76-0,80	0,84-0,86
6	0,58-0,65	0,71-0,75	0,78-0,82
10	0,52-0,58	0,66-0,71	0,74-0,78
20	0,44-0,50	0,61-0,66	0,70-0,74
40	0,38-0,44	0,55-0,61	0,64-0,69
60	0,36-0,42	0,52-0,58	0,62-0,67
100	0,33-0,39	0,49-0,55	0,59-0,65

Таблица 4

Коэффициенты использования соединительной полосы  
в ряду вертикальных электродов,  $\eta_2$

Отношение расстояния между электродами к длине электрода	$\eta_2$ при числе электродов в ряду			
	4	10	20	30
1	0,77	0,62	0,42	0,31
2	0,89	0,75	0,56	0,46
3	0,92	0,82	0,68	0,58

Таблица 5

Коэффициенты использования соединительной полосы  
в контуре вертикальных электродов,  $\eta_2$

Отношение расстояния между электродами к длине электрода	$\eta_2$ при числе электродов в ряду					
	4	10	20	30	50	70
1	0,45	0,34	0,27	0,24	0,21	0,20
2	0,55	0,40	0,32	0,30	0,28	0,26
3	0,70	0,56	0,45	0,41	0,37	0,35

Таблица 6

Коэффициенты использования параллельно уложенных полос  
(ширина полки  $b = 20-40$  мм)

Длина каждой полосы	Число параллельных полос	Расстояние между параллельными полосами, м				
		1	2,5	5	10	15
15	2	0,55	0,65	0,75	0,80	0,85
	5	0,37	0,49	0,60	0,73	0,79
	10	0,25	0,37	0,49	0,64	0,72
25	2	0,50	0,60	0,70	0,75	0,80
	5	0,35	0,45	0,55	0,66	0,73
	10	0,23	0,31	0,43	0,57	0,66
50	2	0,45	0,55	0,65	0,70	0,75
	5	0,33	0,40	0,48	0,58	0,65
	10	0,20	0,27	0,35	0,46	0,53

Таблица 7

Коэффициенты использования  $\eta_l$  лучевых заземлителей

Длина луча, м	Число лучей			
	3		4	
	Диаметр проводника луча, мм			
	10	20	10	20
2,5	0,76	0,74	0,63	0,61
5	0,78	0,76	0,67	0,65
10	0,81	0,79	0,70	0,69
15	0,82	0,80	0,72	0,70
30	0,84	0,82	0,75	0,73

*Примечание:* при применении для лучей полосовой стали эквивалентный диаметр принимается равным  $b/2$ , где  $b$  – ширина полосы.

Исходя из вышеизложенного, сопротивление заземлителя с учетом коэффициентов использования определяется:

– для вертикальных электродов

$$R_{3г} = \frac{R_г}{n \times \eta_г},$$

– для горизонтальных электродов

$$R_{3г} = \frac{R_г}{\eta_г},$$

– для лучевого заземлителя

$$R_{3л} = \frac{R_л}{n \times \eta_л},$$

где  $R_г, R_г, R_л$  – сопротивление растекания одного вертикального электрода, одного горизонтального электрода, одного луча;  $n$  – число электродов луча.

При сложном сочетании заземлителей значения  $\eta$  берутся из таблиц. Сложный заземлитель чаще всего выполняется из вертикальных и горизонтальных элементов. При этом возникает взаимодействие полей растекания тока вертикальных электродов не только между собой, но и с полями горизонтальных электродов. Степень их взаимодействия учитывается двумя коэффициентами использования – вертикальных и горизонтальных электродов  $\eta_г$  и  $\eta_г$

$$\eta_{гг} = \frac{R_г \eta_г + R_г n \eta_г}{R_г + R_г n},$$

а сопротивление группового заземлителя определяется выражением

$$R_{гг} = \frac{R_г \times R_г}{R_г \eta_г + R_г n \eta_г}.$$

### ***Системы заземления электрических сетей***

В соответствии с ГОСТом Р 50571.2-94, который практически соответствует требованиям публикации МЭК 364-3-93 в части требований к системам заземления электроустановок, системы заземления электрических сетей могут быть следующих типов – *TN-S, TN-C, TN-C-S, TT и IT*.

*Система TN* – система, в которой нейтраль источника питания глухо заземлена, а открытые проводящие части электроустановки присоединены к глухозаземленной нейтрали источника посредством нулевых защитных проводников;

*Система TN-C* – система *TN*, в которой нулевой защитный и нулевой рабочий проводники совмещены в одном проводнике, на всем ее протяжении (рис. 9);

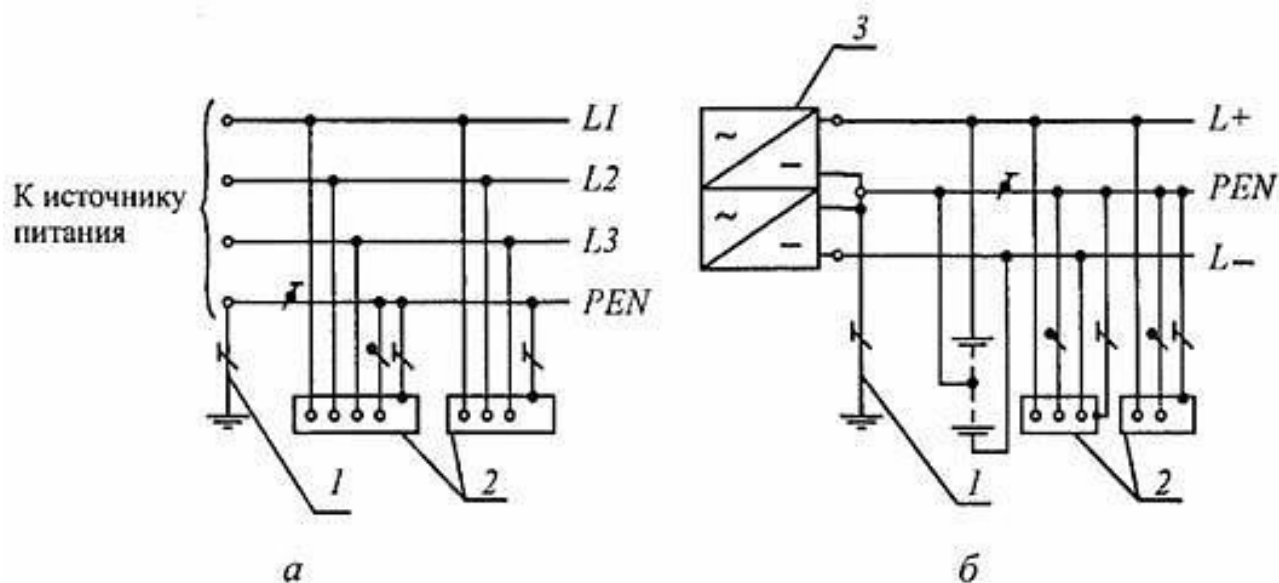


Рис. 9. Система *TN-C* переменного (а) и постоянного (б) тока. Нулевой защитный и нулевой рабочий проводники совмещены в одном проводнике: 1 – заземлитель нейтрали (средней точки) источника питания; 2 – открытые проводящие части; 3 – источник питания постоянного тока

*Система TN-S* – система *TN*, в которой нулевой защитный и нулевой рабочий проводники разделены на всем ее протяжении (рис. 10);

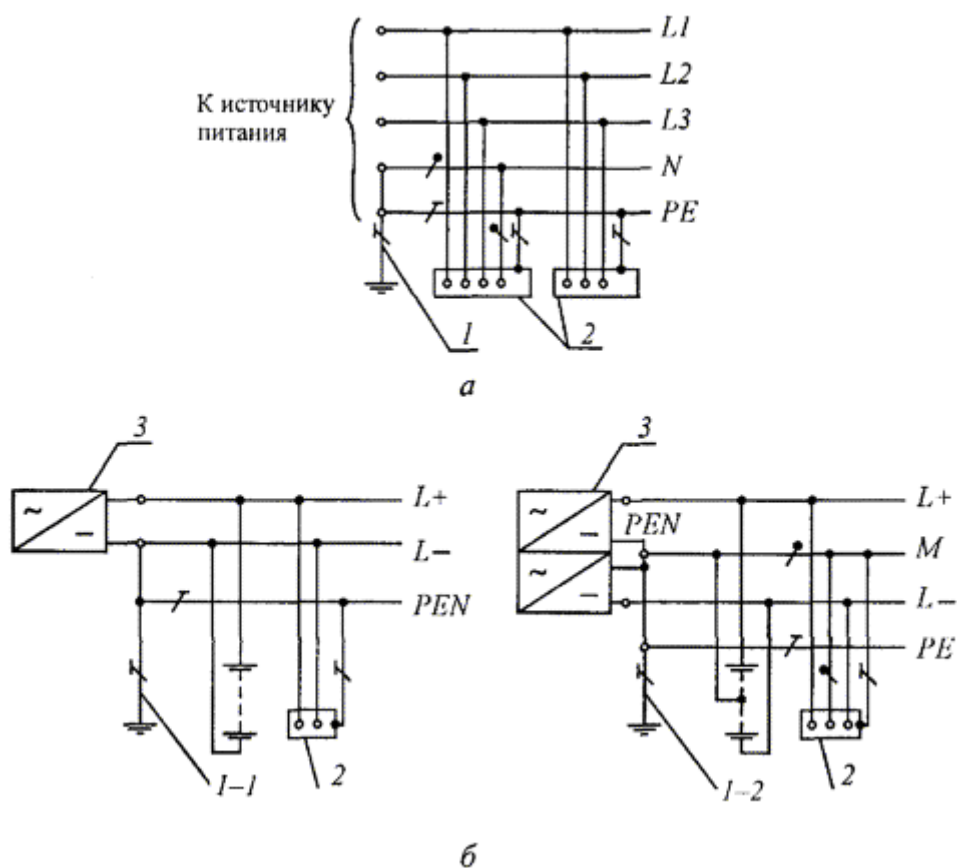


Рис. 10. Система *TN-S* переменного (а) и постоянного (б) тока. Нулевой защитный и нулевой рабочий проводники разделены: 1 – заземлитель нейтрали источника переменного тока; 1-1 – заземлитель вывода источника постоянного тока; 1-2 – заземлитель средней точки источника постоянного тока; 2 – открытые проходящие части; 3 – источник питания

*Система TN-C-S* – система *TN*, в которой функции нулевого защитного и нулевого рабочего проводников совмещены в одном проводнике в какой-то ее части, начиная от источника питания (рис. 11);

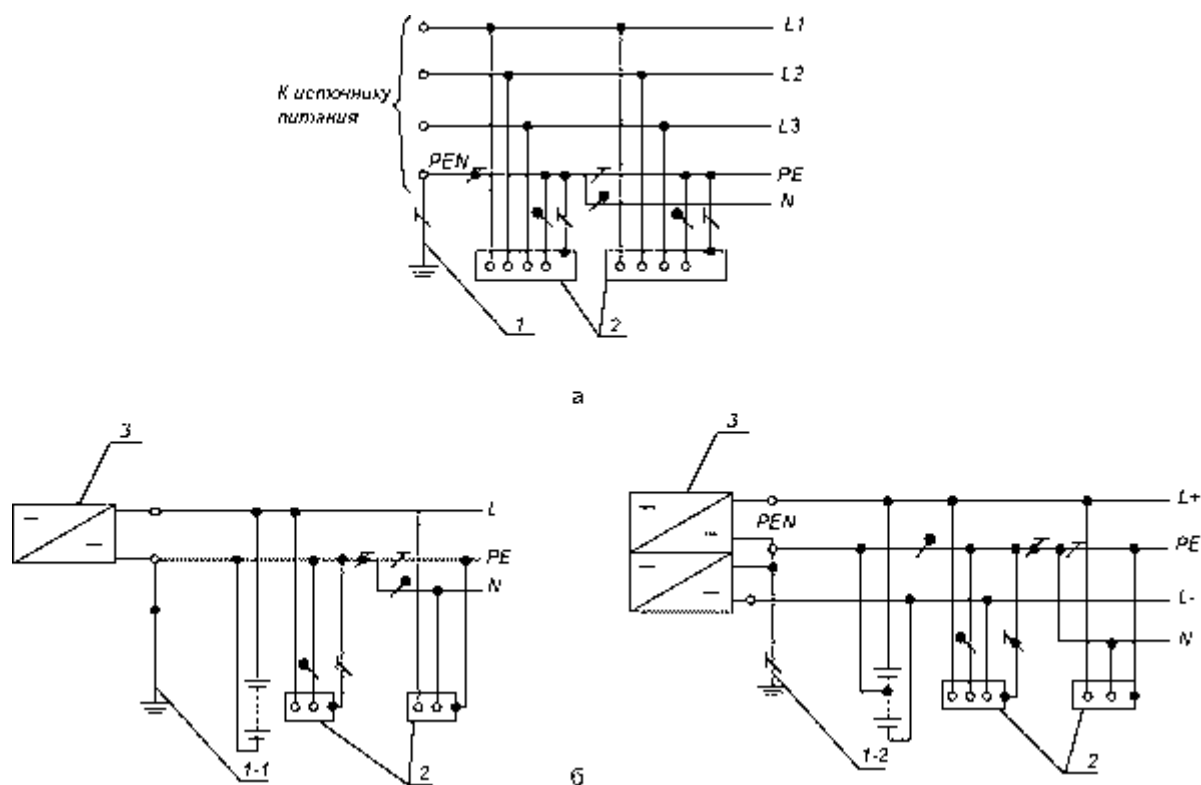


Рис. 11. Система  $TN-C-S$  переменного (а) и постоянного (б) тока. Нулевой защитный и нулевой рабочий проводники совмещены в одном проводнике в части системы: 1 – заземлитель нейтрали источника переменного тока; 1-1 – заземлитель вывода источника постоянного тока; 1-2 – заземлитель средней точки источника постоянного тока; 2 – открытые проводящие части; 3 – источник питания

Система  $TT$  – система, в которой нейтраль источника питания глухозаземлена, а открытые проводящие части электроустановки заземлены при помощи заземляющего устройства, электрически независимого от глухозаземленной нейтрали источника (рис.12).



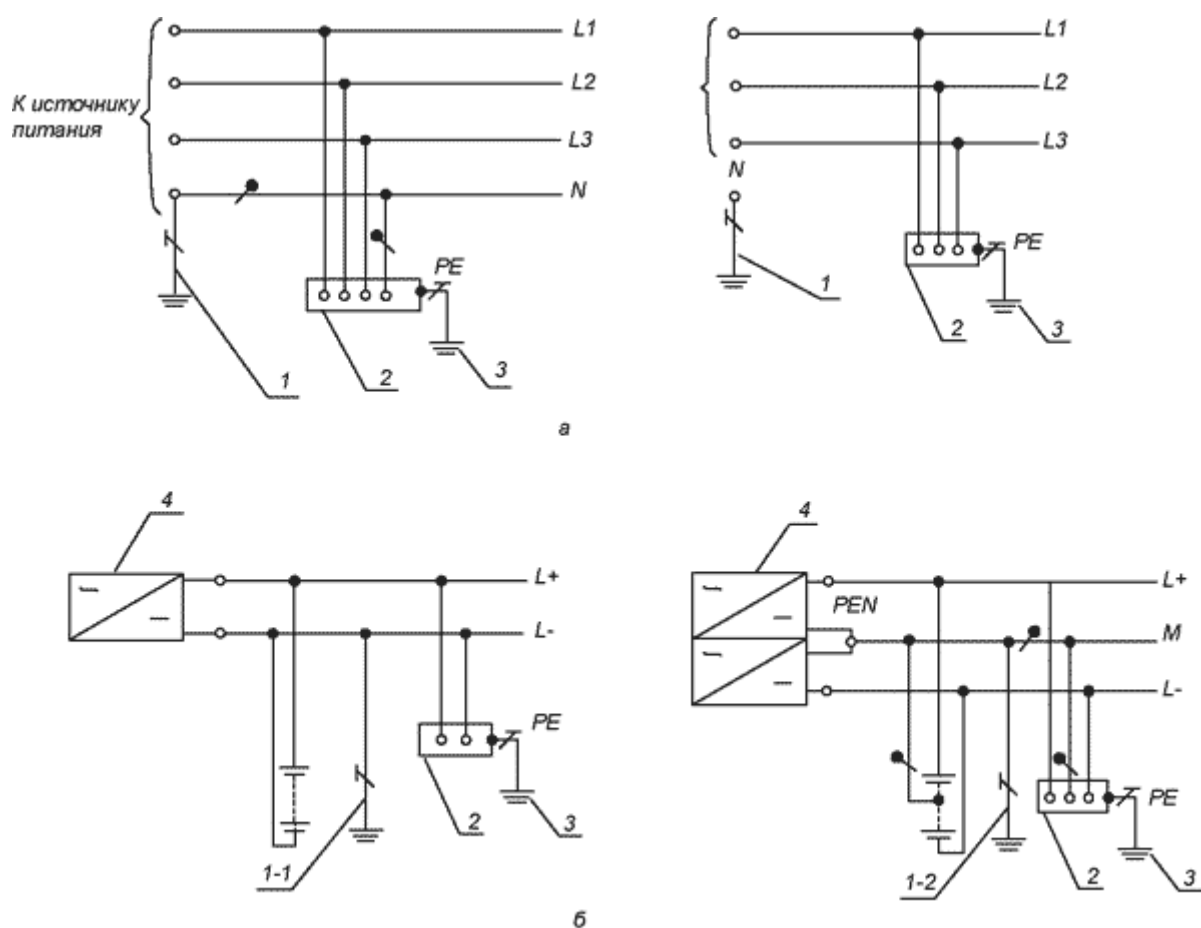


Рис. 12. Система  $TT$  переменного (а) и постоянного (б) тока. Открытые проводящие части электроустановки заземлены при помощи заземления, электрически независимого от заземлителя нейтрали: 1 – заземлитель нейтрали источника переменного тока; 1-1 – заземлитель вывода источника постоянного тока; 1-2 – заземлитель средней точки источника постоянного тока; 2 – открытые проводящие части; 3 – заземлитель открытых проводящих частей электроустановки; 4 – источник питания

Система  $IT$  – система, в которой нейтраль источника питания изолирована от земли или заземлена через приборы или устройства, имеющие большое сопротивление, а открытые проводящие части электроустановки заземлены (рис.13).

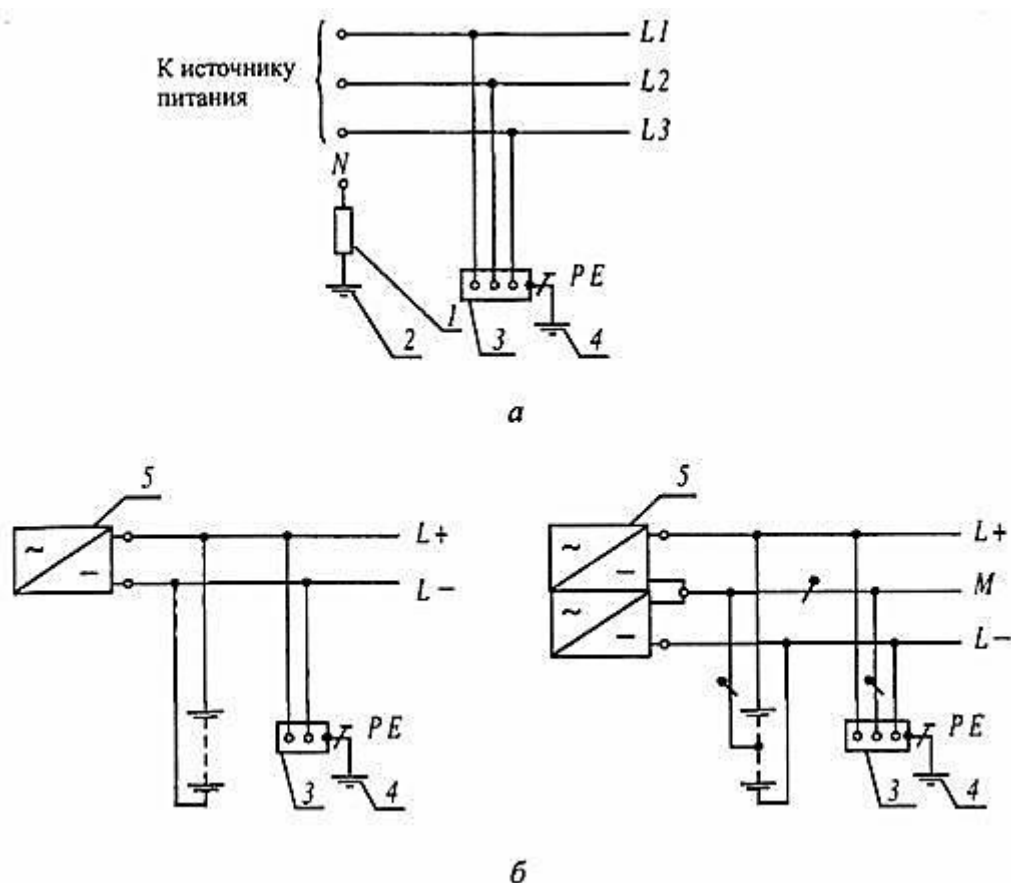


Рис. 13. Система  $IT$  переменного (а) и постоянного (б) тока. Открытые проводящие части электроустановки заземлены. Нейтраль источника питания изолирована от земли или заземлена через большое сопротивление: 1 – сопротивление заземления нейтрали источника питания (если имеется); 2 – заземлитель; 3 – открытые проводящие части; 4 – заземляющее устройство электроустановки; 5 – источник питания

Первая буква – состояние нейтрали источника питания относительно земли:

$T$  – заземленная нейтраль;

$I$  – изолированная нейтраль.

Вторая буква – состояние открытых проводящих частей относительно земли:

$T$  – открытые проводящие части заземлены, независимо от отношения к земле нейтрали источника питания или какой-либо точки питающей сети;

$N$  – открытые проводящие части присоединены к глухозаземленной нейтрали источника питания.

Последующие (после  $N$ ) буквы – совмещение в одном проводнике или разделение функций нулевого рабочего и нулевого защитного проводников:

$S$  – нулевой рабочий ( $N$ ) и нулевой защитный ( $PE$ ) проводники разделены;

$C$  – функции нулевого защитного и нулевого рабочего проводников совмещены в одном проводнике ( $PEN$ -проводник);

$N-\overline{\prime}$  – нулевой рабочий (нейтральный) проводник;

$PE-\overline{\prime}$  – защитный проводник (заземляющий проводник, нулевой защитный проводник, защитный проводник системы уравнения потенциалов);

$PEN-\overline{\prime}$  – совмещенный нулевой защитный и нулевой рабочий проводники.

*Электрическая сеть с эффективно заземленной нейтралью* – трехфазная электрическая сеть напряжением выше 1 кВ, в которой коэффициент замыкания на землю не превышает 1,4.

*Коэффициент замыкания на землю в трехфазной электрической сети* – отношение разности потенциалов между неповрежденной фазой и землей в точке замыкания на землю другой или двух других фаз к разности потенциалов между фазой и землей в этой точке до замыкания.

*Глухозаземленная нейтраль* – нейтраль трансформатора или генератора, присоединенная непосредственно к заземляющему устройству. Глухозаземленным может быть также вывод источника однофазного переменного тока или полюс источника постоянного тока в двухпроводных сетях, а также средняя точка в трехпроводных сетях постоянного тока.

*Изолированная нейтраль* – нейтраль трансформатора или генератора, не присоединенная к заземляющему устройству или присоединенная к нему через большое сопротивление приборов сигнализации, измерения, защиты и других аналогичных им устройств.

### ***Повторное заземление нулевого защитного проводника***

Повторное заземление необходимо в ситуации, например, обрыва нулевого защитного проводника.

При применении системы *TN* рекомендуется выполнять повторное заземление *PE*-и *PEN*-проводников на вводе в электроустановки зданий, а также других доступных местах.

Для повторного заземления нулевых защитных проводников следует в первую очередь использовать естественные заземлители.

*В этом случае сопротивление растеканию тока заземлителя повторного заземления не нормируется.*

Внутри больших и многоэтажных зданий аналогичную функцию выполняет уравнивание потенциалов посредством присоединения нулевого защитного проводника к главной заземляющей шине.

Повторному заземлению подвергаются нулевые рабочие провода воздушных линий, которые одновременно используются как нулевые защитные проводники (*PEN*-проводники). При этом в соответствии с ПУЭ повторные заземления выполняются на концах линий.

Кратковременно до срабатывания защиты на всех элементах цепи зануления появляется напряжение. Повторное заземление предназначается для снижения этого напряжения как при исправном (целом), так и при неисправном (имеющем разрыв) нулевом защитном проводе. Рассмотрим эти случаи.

#### *1. Нулевой защитный провод не имеет обрыва (рис. 14)*

Если повторное заземление нулевого провода отсутствует, напряжение на корпусе поврежденного электрооборудования равно падению напряжения на нулевом проводе (см. эпюру напряжений на рис. 14, а):

$$\dot{U}_3 = \dot{I}_{к.з} \times Z_{н.л}.$$

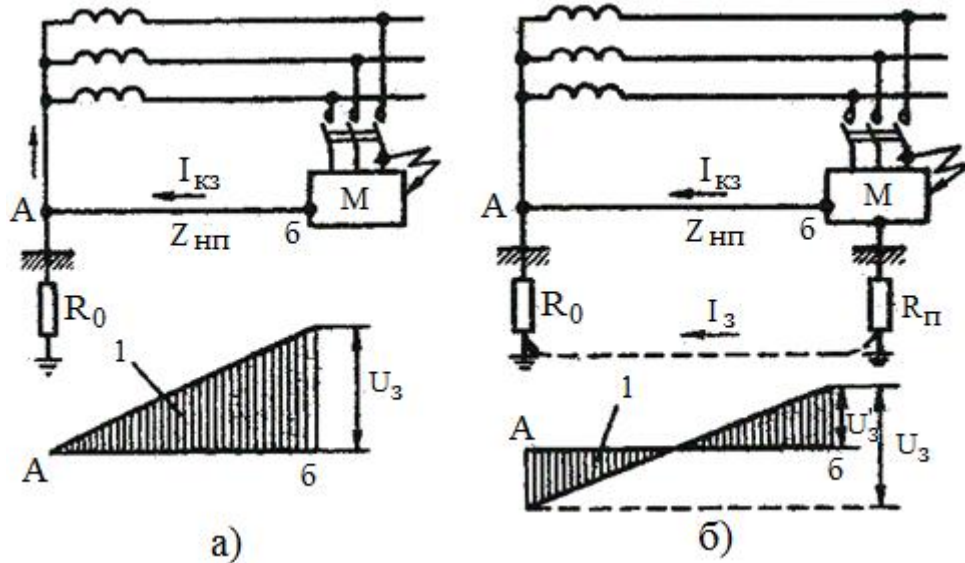


Рис. 14. Схема прохождения тока в цепи зануления без повторного заземлителя (а) и с повторным заземлителем (б):

$U_3$  – падение напряжения на нулевом проводе,  $I_{к.з.}$  – ток короткого замыкания,  $Z_{н.н}$  – сопротивление нулевого провода,  $R_n, R_0$  – сопротивления повторного и рабочего заземлителей,  $I_3$  – ток, проходящий через повторный заземлитель, 1 – эпюры распределения напряжения вдоль нулевого провода

Ток, проходящий через тело человека при его прикосновении к корпусу, будет равен

$$\dot{I}_ч = \dot{U}_3 / R_ч = \dot{I}_{к.з.} \times Z_{н.н} / R_ч. \quad (1)$$

Предельное максимальное время срабатывания защиты по условиям безопасности должно быть не более, с:  $t_{откл} = 50 / I_ч$ , где  $I_ч$  (мА) из формулы (1).

Из формулы (1) следует, что ток  $I_ч$  можно снизить уменьшением значения  $Z_{н.н}$ . Кроме того, этот ток понижается, если заземлить нулевой защитный провод вблизи электроприемника. Тогда напряжение  $U_3$  будет приложено к двум последовательно соединенным сопротивлениям – рабочему  $R_0$  и повторному  $R_n$ , которые сработают как делители напряжения. Потенциал на корпусе понизится до значения (см. эпюру напряжений на рис. 14, б):

$$\dot{U}_3 = \dot{I}_3 \times R_n = \dot{I}_{к.з} \times Z_{н.н} \times R_n / (R_0 + R_n), \quad (2)$$

где  $I_3$  – ток, проходящий через рабочий и повторный заземлители.

Ток, проходящий через тело человека при наличии повторного заземления нулевого защитного провода, будет равен

$$\dot{I}_ч = \dot{I}_{к.з} \times Z_{н.н} \times R_n / [(R_0 + R_n)R_ч] \quad (3)$$

2. Нулевой защитный провод неисправен – имеет обрыв (рис.15).

В этом случае зануленное электрооборудование не отключится и на его корпусах появятся опасные потенциалы.

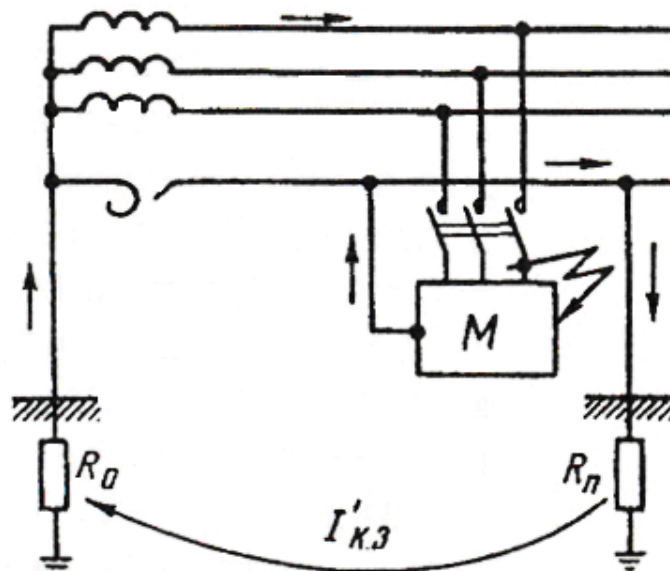


Рис. 15. Схема прохождения тока короткого замыкания  $I_{к.з}$  при обрыве нулевого провода:  $R_0, R_n$  – сопротивления рабочего и повторного заземлителей

Повторное заземление нулевого защитного провода не создает полной безопасности, но все же снижает напряжение на корпусах, соединенных с нулевым проводом за местом его обрыва, до значения:

$$U_3 = I_{к.з} \times R_n = U_\phi \times R_n / (R_n + R_0). \quad (4)$$

Напряжение на зануленном оборудовании, находящимся до места обрыва,

$$U_3 = I_{к.з} \times R_0 = U_\phi \times R_0 / (R_n + R_0). \quad (5)$$

## ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАЩИТНОГО ЗАЗЕМЛЕНИЯ

### Задача 1

В сети типа IT ( $U_{л}=380$  В) произошло замыкание двух различных фаз на два отдельно заземленных корпуса. Заземлитель первого корпуса имеет полусферическую форму с радиусом  $r = 0,2$  м и расположен на поверхности земли. Человек одной ногой стоит на этом заземлителе. Расстояние до второго заземлителя более 30 м.

Определить напряжение шага  $U_{ш}$  и ток  $I_{ч}$ , протекающий через человека, если сеть короткая,  $R_{L1} = R_{L2} = R_{L3} = 40$  кОм;  $R_{з1} = 4$  Ом;  $R_{з2} = 6$  Ом;  $R_{ч} = 1$  кОм; шаг человека  $a = 0,8$  м;  $b_2 = 0,5$ .

*Решение:*

При замыкании двух различных фаз сети IT на два отдельно заземленных корпуса (рис. 16) значение тока  $I_3$ , стекающего в землю, практически не зависит от значений сопротивления изоляции фаз относительно земли и определяется как

$$I_3 = \frac{U_{л}}{R_{з1} + R_{з2}} = \frac{380}{4 + 6} = 38 \text{ А.}$$

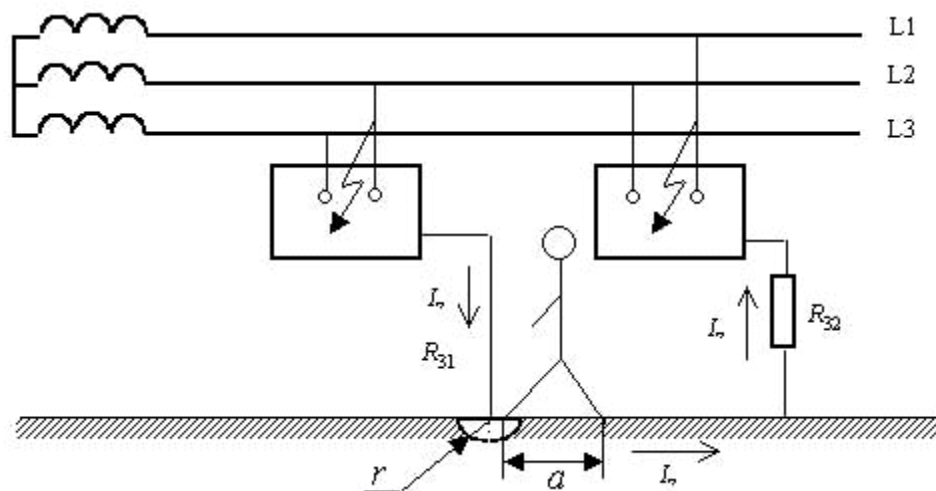


Рис. 16. Замыкание двух различных фаз на два отдельно заземленных корпуса

При этом потенциал заземлителя первого корпуса составит

$$\varphi_3 = I_3 \times R_3 = 38 \times 4 = 152 \text{ В.}$$

В общем случае напряжения шага с учетом формы потенциальной кривой и сопротивления основания растеканию тока определяется как

$$U_{ш} = \beta_1 \times \beta_2 \times \varphi_3,$$

где  $\beta_1$  – коэффициент напряжения шага, учитывающий форму потенциальной кривой. Поскольку человек стоит одной ногой на полушаровом заземлителе, в данном случае  $x = r$ , и  $\beta_1$  можно рассчитать следующим образом

$$\beta_1 = \frac{r \times a}{x(x+a)} = \frac{a}{r+a} = \frac{0,8}{(0,2+0,8)} = 0,8.$$

Коэффициент, учитывающий сопротивление основания растеканию тока,  $\beta_2 = 0,5$  по условиям задачи.

Поэтому искомое значение напряжения шага

$$U_{ш} = 0,8 \times 0,5 \times 152 = 60,8 \text{ В,}$$

а ток, протекающий через тело человека,

$$I_ч = \frac{U_{ш}}{R_ч} = \frac{60,8}{1 \times 10^3} = 60,8 \text{ мВ,}$$

Ответ задачи:  $U_{ш} = 60,8 \text{ В; } I_ч = 60,8 \text{ мВ.}$

### Задача 2

Потребитель электроэнергии подключен к сети типа IT, произошло замыкание одного из фазных проводов на заземленный корпус. При каком значении сопротивления изоляции напряжение прикосновения человека, касающегося заземленного корпуса, равно длительно допустимому значению.

Дано:  $U_n = 380 \text{ В. } R_{L1} = R_{L2} = R_{L3} = R; R_ч = 1 \text{ кОм; } R_3 = 4 \text{ Ом;}$   
сеть короткая;  $a_1 = a_2 = 1$ .

*Решение:*

В данном случае значение тока  $I_3$ , стекающего в землю через заземлитель, зависит от значений сопротивления изоляции фаз относительно земли (рис. 17) и определяется как



$$I_3 = \frac{U_\phi}{R_3 + \frac{R}{3}} = \frac{U_\lambda}{\sqrt{3} \times \left( R_3 + \frac{R}{3} \right)}.$$

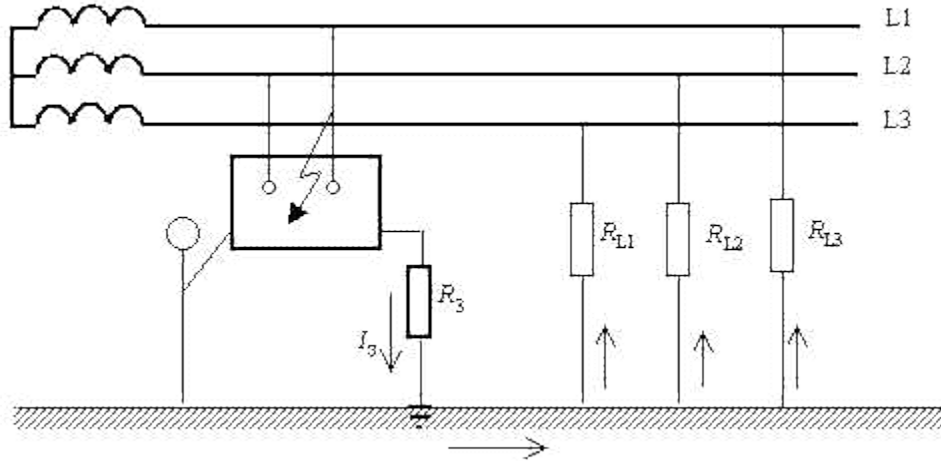


Рис. 17. Замыкание фазы сети ИТ на заземленный корпус

Значение напряжения прикосновения человека, касающегося заземленного корпуса, равно в данном случае значению потенциала на заземлителе

$$U_\psi = a_1 \times a_2 \times \varphi_3 = I_3 \times R_3.$$

По условиям задачи значение напряжения прикосновения может равняться длительно допустимому значению  $U_{\partial.\partial on}$ , т.е.

$$I_3 \times R_3 = U_{\partial.\partial on}.$$

Из полученного уравнения определяем искомые значения сопротивлений изоляции фаз

$$\frac{U_\lambda}{\sqrt{3} \times \left( R_3 + \frac{R}{3} \right)} \times R_3 = U_{\partial.\partial on};$$

$$U_\lambda \times R_3 = U_{\partial.\partial on} \times \sqrt{3} \times \left( R_3 + \frac{R}{3} \right);$$

$$U_\lambda \times R_3 - U_{\partial.\partial on} \times \sqrt{3} \times R_3 = U_{\partial.\partial on} \times \sqrt{3} \frac{R}{3};$$

$$R = \frac{R_3 \times \sqrt{3}}{U_{\partial.\partial on}} \times \left( U_\lambda - \sqrt{3} \times U_{\partial.\partial on} \right).$$

Подставив в последнее выражение значение длительно допустимого напряжения  $U_{д.доп} = 36$  В, получим искомое значение сопротивления изоляции фаз

$$R = \frac{4 \times \sqrt{3}}{36} \times (380 - \sqrt{3} \times 36) = 61,3 \text{ Ом.}$$

Ответ задачи: при  $R_{L1} = R_{L2} = R_{L3} = R = 6,3$  Ом.

*Примечание.* При полученном значении сопротивления изоляции (значительно меньшем реального значения) наличие защитного заземления обеспечивает безопасность при замыкании на корпус в сети IT.

Решите аналогичные задачи самостоятельно.

### Задача 3

Определить значение тока  $I_q$  и напряжение прикосновения  $U_q$ , если человек прикоснулся к заземленному корпусу электроустановки (рис. 18), на который произошло замыкание фазного провода  $L_1$  сети типа IT (линейное напряжение – 380 В), а фазный провод  $L_3$  замкнулся на землю (аварийный режим сети).

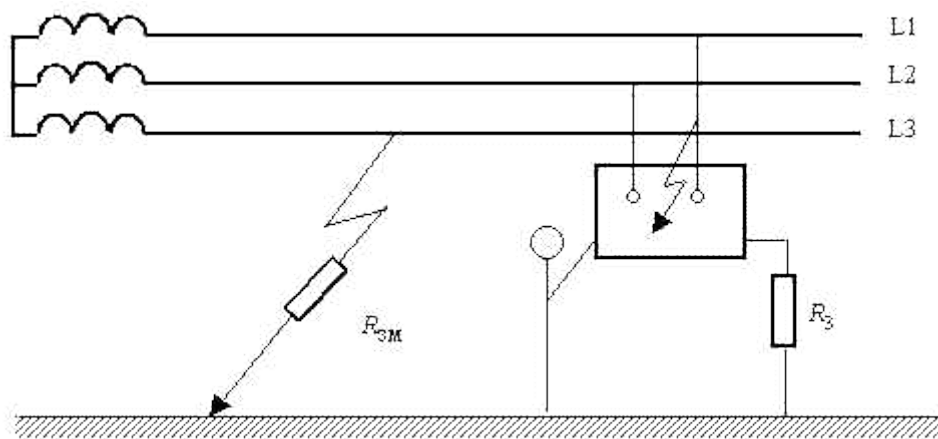


Рис. 18. Замыкание двух различных фаз на землю и заземленный корпус

Дано:  $R_з = 4$  Ом;  $R_{L1} = R_{L2} = R_{L3} = R = 20$  кОм;  
 $R_{эм} = 34$  Ом; человек находится на расстоянии 40 м от заземлителя;  
 $R_q = 1$  кОм;  $R_{осн} = 1$  кОм; сеть короткая.

Ответ задачи:  $I_q = 20$  мА.

Если Ваш ответ не совпал с приведенным, повторите раздел *Защитное заземление*.

#### Задача 4

Определить значение тока через тело человека, если человек прикоснулся к заземленному корпусу электроустановки, на который произошло замыкание одного из фазных проводов сети типа *TN-C* (380/220 В) (рис. 19).

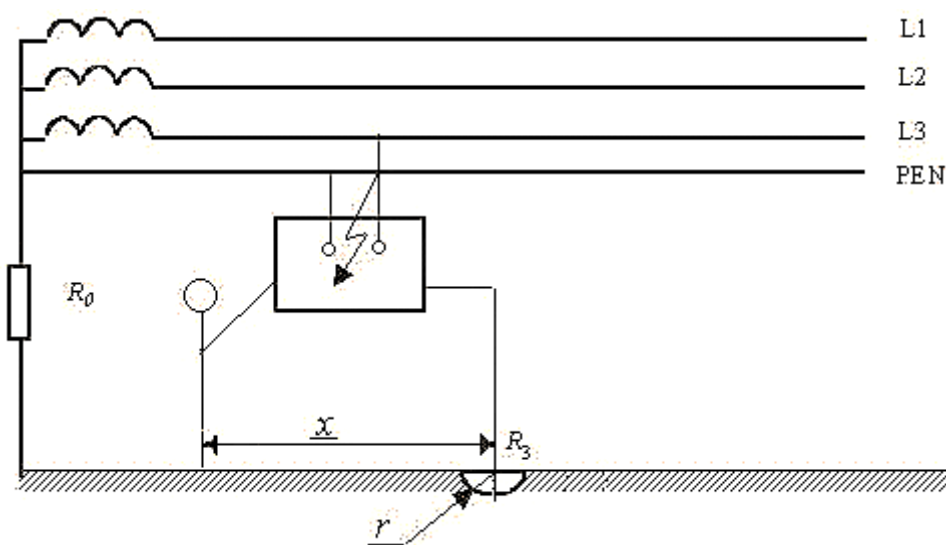


Рис. 19. Замыкание фазы на заземленный корпус в сети *TN-C*

Дано:  $R_{L1} = R_{L2} = R_{L3} = R = 30 \text{ кОм}$ ; сеть короткая;  $R_3 = 2 \text{ Ом}$ ;  $R_{\text{ч}} = 1 \text{ кОм}$ ;  $R_0 = 4 \text{ Ом}$ .

Заземлитель полушаровой с радиусом  $r = 0,4 \text{ м}$ ; человек стоит на земле на расстоянии  $x = 2 \text{ м}$  от заземлителя;  $R_{\text{очн}} = 9 \text{ кОм}$ . Оценить опасность поражения человека током, используя первичные критерии электробезопасности.

Ответ задачи:  $I_{\text{ч}} = 5,9 \text{ мА}$ .

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называют заземляющим устройством?
2. Каков принцип действия заземления как меры обеспечения электробезопасности?
3. Что называют сопротивлением растеканию тока заземляющего устройства?
4. От каких параметров зависит значение сопротивления растеканию тока заземляющего устройства?
5. Что может использоваться в качестве естественного заземлителя?
6. Что такое напряжение прикосновения?
7. От каких параметров зависит значение напряжения прикосновения?
8. Что такое напряжение шага?
9. От каких параметров зависит значение напряжения шага?

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

### Основная литература

1. ГОСТ 12.1.030-81 ССБТ. Электробезопасность. Защитное заземление, зануление.
2. Цапенко, Е. Ф. Электробезопасность на горных предприятиях: учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности «Электроснабжение» направления подготовки дипломированных специалистов «Электроэнергетика» / Е. Ф. Цапенко, С. З. Шкундин; Моск. гос. горный ун-т. – Москва: МГТУ, 2008. – 103 с. – Режим доступа:  
<http://www.biblioclub.ru/book/100037/>

### Дополнительная литература

3. Долин, П. А. Основы техники безопасности в электроустановках / П. А. Долин. – М.: Энергоатомиздат, 1984.

### Нормативная литература

4. Правила устройства электроустановок [Текст]. – 7-е изд. – М.: НТЦПБ, 2012. – 584 с.

5. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. – Новосибирск: Сибирское университетское издательство, 2011. – 192 с.

<http://www.biblioclub.ru/index.php?page=book&id=57238>