

**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**

## **ВОЗДЕЙСТВИЕ ТОКА НА ЧЕЛОВЕКА**

**Методические указания к практическому занятию**

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:**

**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. Воздействие тока на человека:** методические указания к практическому занятию 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: Pentium IV; ОЗУ 8 Мб; Windows XP; мышь. – Загл. с экрана.

Составлено в соответствии с программой дисциплины «Электробезопасность» и предназначено для проведения практических занятий студентов по изучению оценки состояния электробезопасности рабочих мест, факторов, определяющих поражение электрическим током, расчет возможных токов поражения, нормирование напряжения прикосновения и токов через тело человека. Примеры решения задач.

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

## 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

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

**Цель практического занятия:** Изучить основные факторы, влияющие на тяжесть поражения человека электрическим током.

## 2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ И СОДЕРЖАНИЕ ПРАКТИЧЕСКОГО ЗАНЯТИЯ

Тема «Воздействие тока на человека» изучается бакалаврами на практических занятиях.

Практические занятия проводятся в интерактивной форме и заключаются в дискуссии между преподавателем и студентами. 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

### Оценка состояния электробезопасности на рабочих местах

На промышленных предприятиях используется большое количество различного электрооборудования, что создает опасность поражения электрическим током обслуживающего персонала, так как во многих случаях его действие является неожиданным.

Для защиты от поражения электрическим током все рабочие места, связанные с использованием электроэнергии, должны соответствовать требованиям электробезопасности по ГОСТ 12.1.030-82.

Доля электротравм по отношению ко всем травмам на производстве составляет около 11,2 %. Из них:

57 % – при прикосновении к токоведущим частям;

23 % – от прикосновения к металлическим частям;

16 % – от прикосновения к неметаллическим частям;  
2,5 % – от шагового напряжения;  
1,5 % – при приближении к токоведущим частям (не каса-  
ясь) в высоковольтных установках более 1000 В.

Попадают под напряжение:

42 % – электрики;

35 % – электромонтеры.

Поражение электрическим током происходит в результате прикосновения человека к токоведущим частям, находящимся под напряжением. Величина тока, проходящего через тело человека, зависит от режима нейтрали сети, активного и емкостного сопротивления между фазными проводами и землей, а также схемы включения человека в цепь тока.

Установлено, что путь прохождения тока в теле человека играет существенную роль в исходе поражения.

Существует 15 характерных путей тока в теле человека (петли тока). Наибольшее распространение получили следующие петли тока: рука-нога; нога-нога; рука-рука; голова-нога; голова-рука.

Проходя через организм человека, электрический ток оказывает термическое, электролитическое и биологическое действие.

Термическое действие выражается в ожогах отдельных участков тела, нагреве кровеносных сосудов, нервов и других тканей.

Электролитическое действие выражается в разложении крови и других органических жидкостей, что вызывает значительные нарушения их физико-химических составов.

Биологическое действие выражается в возбуждении живых тканей организма (что сопровождается непроизвольными судорожными сокращениями мышц), а также могут возникнуть прекращение органов дыхания и кровообращения.

### **Оценка опасности поражения электрическим током**

Оценка опасности поражения электротоком заключается в расчете максимально возможного тока, проходящего через тело

человека  $I_h$ , или напряжения прикосновения  $U_{np}$  и сравнении этих величин с предельно допустимыми значениями в зависимости от продолжительности воздействия этого тока или напряжения прикосновения. Оценка должна производиться как в нормальном режиме работы электроустановки, так и в аварийном. Под аварийным режимом понимается режим работы неисправной установки, при котором могут возникнуть опасные ситуации, приводящие к электротравмированию людей, взаимодействующих с установкой. Оценка опасности электропоражения позволяет определить необходимость применения способов и средств защиты, а фактические и предельно допустимые значения  $I_h$  и  $U_{np}$  служат исходными данными для их проектирования и расчёта.

Степень поражения человека электрическим током определяется силой тока  $1 \text{ A} = 1 \text{ K/с}$ , прошедшего через тело человека, и является определяющим фактором при воздействии на организм человека.

*Токи поражения.* Условно различают три ступени воздействия тока на организм человека и три пороговых значения (ГОСТ12.1009-76): осязаемый, неотпускающий и фибрилляционный.

Осязаемый ток вызывает мало или безболезненные раздражения 1–3 мА (табл. 1).

Неотпускающий ток 10–15 мА (табл. 1).

Фибрилляционный ток 80–100 мА (табл. 1).

Таблица 1

Характер воздействия тока на тело человека

Ток, проходящий через тело человека, мА	Переменный (50 Гц) ток	Постоянный ток
1	2	3
0,5 ... 1,5	Начало ощущений: слабый зуд, пощипывание кожи	Не ощущается
2 ... 4	Ощущение распространяется на запястье; слегка сводит мышцы	Не ощущается
5 ... 7	Болевые ощущения усиливаются по всей кисти; судороги; слабые боли во всей руке до предплечья	Начало ощущений; слабый нагрев кожи под электродами

Продолжение табл. 1

1	2	3
8 ... 10	Сильные боли и судороги во всей руке, включая предплечье. Руки трудно оторвать от электродов	Усиление ощущения
10 ... 15	Едва переносимы боли во всей руке. Руки невозможно оторвать от электродов. С увеличением продолжительности протекания тока боли усиливаются	Значительный нагрев под электродами и в прилегающей области кожи
20 ... 25	Сильные боли. Руки парализуются мгновенно, оторвать их от электродов невозможно. Дыхание затруднено	Ощущение внутреннего нагрева, незначительное сокращение мышц рук
25 ... 50	Очень сильная боль в руках и в груди. Дыхание крайне затруднено. При длительном воздействии может наступить остановка дыхания или ослабление сердечной деятельности с потерей сознания	Сильный нагрев, боли и судороги в руках. При отрыве рук от электродов возникают сильные боли
50 ... 80	Дыхание парализуется через несколько секунд, нарушается работа сердца. При длительном воздействии может наступать фибрилляция сердца	Очень сильный поверхностный и внутренний нагрев. Сильные боли в руке и в области груди. Руки невозможно оторвать от электродов из-за сильных болей
80 ... 100	Фибрилляция сердца через 2...3 с.; еще через несколько секунд – остановка дыхания	То же действие выраженное сильнее. При длительном действии остановка дыхания
300	То же действие за меньшее время	Фибрилляция сердца через 2...3 с.; еще через несколько секунд остановка дыхания
Более 5000	Фибрилляция сердца не наступает; возможна временная остановка его в период протекания тока	При протекании тока в течение нескольких секунд тяжелые ожоги и разрушение тканей

### **Факторы, определяющие опасность поражения электрическим током**

Характер и последствия воздействия на человека электрического тока зависят от следующих факторов:

- электрического сопротивления тела человека;
- величины напряжения и тока;
- продолжительности действия электрического тока;

- пути тока через тело человека;
- рода и частоты электрического тока;
- индивидуальных свойств человека;
- условий внешней среды.

*Электрическое сопротивление тела человека.* Сила тока  $I_h$ , проходящего через какой-либо участок тела человека, зависит от подведенного напряжения  $U_{np}$  (напряжения прикосновения) и электрического сопротивления  $Z_T$ , оказываемого току данным участком тела:

$$I_h = \frac{U_{np}}{Z_T}.$$

На участке между двумя электродами электрическое сопротивление тела человека в основном состоит из сопротивлений двух тонких наружных слоев кожи, касающихся электродов, и внутреннего сопротивления остальной части тела.

Плохо проводящий ток наружный слой кожи, прилегающий к электроду, и внутренняя ткань, находящиеся под этим слоем, как бы образуют обкладки конденсатора емкостью  $C$  с сопротивлением  $r_n$  (рис. 1). Из схемы замещения видно, что в наружном слое кожи ток протекает по двум параллельным путям; через активное наружное сопротивление  $r_n$  и емкость, электрическое сопротивление которой

$$X_c = \frac{1}{(\omega \times C)},$$

где  $\omega = 2\pi f$  – угловая частота, Гц;  $f$  – частота тока, Гц.

Тогда полное сопротивление наружного слоя кожи для переменного тока:

$$Z_n = \frac{r_n \times X_c}{\sqrt{r_n^2 + X_c^2}}.$$

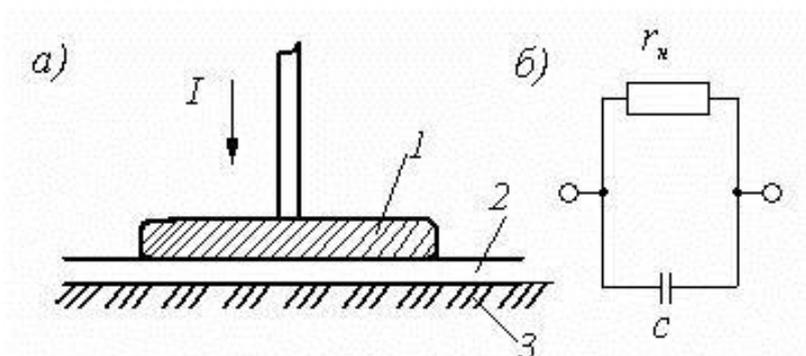


Рис. 1. Электрическая схема замещения сопротивления наружного слоя кожи: а – схема контакта электрода; б – электрическая схема замещения (1 – электрод; 2 – наружный слой кожи; 3 – внутренняя область кожи)

Сопротивление  $r_n$  и емкость  $C$  зависят от площади электродов (площадь контакта). С ростом площади контакта  $r_n$  уменьшается, а емкость  $C$  увеличивается. Поэтому увеличение площади контакта приводит к уменьшению полного сопротивления наружного слоя кожи. Опыты показали, что внутреннее сопротивление тела  $r_b$  можно рассматривать как чисто активное. Таким образом, для пути тока «рука-рука» общее электрическое сопротивление тела может быть представлено схемой замещения, представленной на рисунке 2.

С увеличением частоты тока из-за уменьшения  $X_C$  сопротивление тела человека уменьшается и при больших частотах (более 10 кГц) практически становится равным внутреннему сопротивлению  $r_b$ . Зависимость сопротивления тела человека от частоты приведена на рис. 3.

Между током, протекающим через тело человека, и приложенным к нему напряжением существует нелинейная зависимость: с увеличением напряжения сила тока растет быстрее. Это объясняется главным образом нелинейностью электрического сопротивления тела человека. Так, при напряжении на электродах 40...45 В на наружном слое кожи возникают значительные напряженности электрического поля, при которых полностью или частично происходит пробой наружного слоя, что снижает  $Z_T$  – полное сопротивление тела человека (рис. 4).

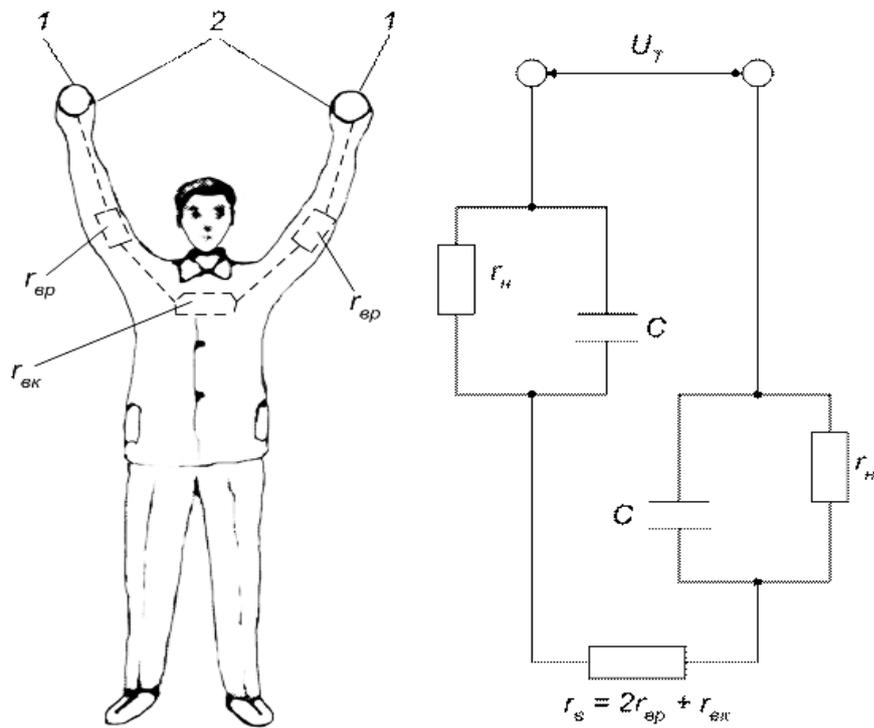


Рис. 2. Электрическая схема замещения сопротивления тела человека: 1 – электрод; 2 – наружный слой кожи;  $r_{ер}$ ,  $r_{вк}$  – внутреннее сопротивление рук и корпуса

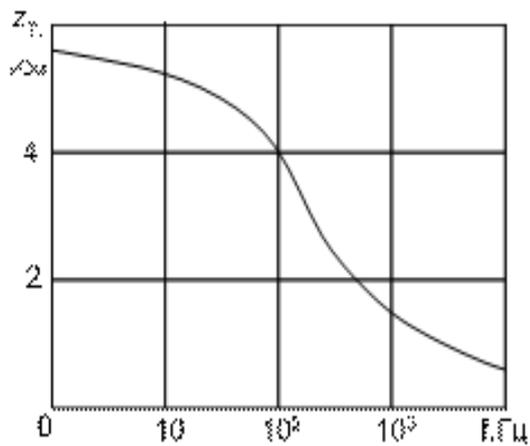


Рис. 3. Зависимость сопротивления тела человека от частоты

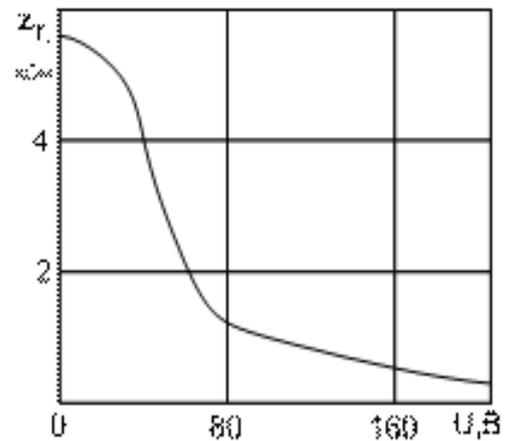


Рис. 4. Зависимость сопротивления тела человека от напряжения

При напряжении 127...220 В оно практически падает до значения внутреннего сопротивления тела. Внутреннее сопро-

тивление тела считается активным. Его величина зависит от длины поперечного размера участка тела, по которому проходит ток.

В качестве расчетной величины при переменном токе промышленной частоты принимают активное сопротивление тела человека, равное 1000 Ом.

В действительных условиях сопротивление тела человека не является постоянной величиной. Оно зависит от ряда факторов, в том числе от состояния кожи, состояния окружающей среды, параметров электрической цепи и др.

Повреждение рогового слоя (порезы, царапины, ссадины и др.) снижает сопротивление тела до 500...700 Ом, что увеличивает опасность поражения человека током.

Такое же влияние оказывает увлажнение кожи водой или потом. Таким образом, работа с электроустановками влажными руками или в условиях, вызывающих увлажнение кожи, а также при повышенной температуре, вызывающей усиленное потовыделение, усугубляет опасность поражения человека током.

Загрязнение кожи вредными веществами, хорошо проводящими электрический ток (пыль, окалина и т. п.), приводят к снижению ее сопротивления.

На сопротивление тела оказывает влияние площадь контактов, а также место касания, так как у одного и того же человека сопротивление кожи неодинаково на разных участках тела. Наименьшим сопротивлением обладает кожа лица, шеи, рук на участке выше ладоней, и в особенности на стороне, обращенной к туловищу, подмышечных впадинах, тыловой стороны кисти и др. Кожа ладоней и подошв имеет сопротивление, во много раз превышающее сопротивление кожи других участков тела.

С увеличением тока и времени его прохождения сопротивление тела человека падает, так как при этом усиливается местный нагрев кожи, что приводит к расширению сосудов, к усилению снабжения этого участка кровью и увеличению потовыделения.

Сопротивление тела человека зависит от пола и возраста людей: у женщин это сопротивление меньше, чем у мужчин, у детей меньше, чем у взрослых, у молодых людей меньше, чем у пожилых. Это объясняется толщиной и степенью огрубления верхнего слоя кожи. Кратковременное (несколько минут) сниже-

ние сопротивления тела человека (на 20...50 %) вызывает внешние, неожиданно возникающие физические раздражения: болевые (удары, уколы), световые и звуковые.

*Величина напряжения и тока.* Основным фактором, обуславливающим исход поражения электрическим током, является сила тока проходящего через тело человека (табл. 1).

Напряжение, приложенное к телу человека, также влияет на исход поражения, но лишь постольку, поскольку оно определяет значение тока, проходящего через человека.

Из приведенной таблицы можно выделить следующие пороговые значения тока:

*Ощутимый ток* – электрический ток, при прохождении через организм человека вызывающий ощутимые раздражения. Переменный ток силой 0,6...1,5 мА и постоянный – силой 5...7 мА. Указанные значения являются пороговыми ощутимыми токами, с них начинается область ощутимых токов.

*Неотпускающий ток* – электрический ток, вызывающий при прохождении через человека непреодолимые судорожные сокращения мышц руки, в которой зажат проводник. Пороговый неотпускающий ток составляет 10...15 мА переменного тока и 50...60 мА постоянного. При таком токе человек уже не может самостоятельно разжать руку, в которой зажата токоведущая часть, и оказывается как бы прикованным к ней.

*Фибрилляционный ток* – электрический ток, вызывающий при прохождении через организм фибрилляцию сердца. Пороговый фибрилляционный ток составляет 100 мА переменного тока и 300 мА постоянного при длительности 1...2 с по пути «рука-рука» или «рука-ноги». Фибрилляционный ток может достичь 5 А. Ток больше 5 А фибрилляцию сердца не вызывает. При таких токах происходит мгновенная остановка сердца.

Пороговые (наименьшие) значения ощутимого, неотпускающего и фибрилляционного токов представляют собой случайные величины, нормируемые значения которых определяются законом распределения и его параметрами. Численные значения токов соответствуют определенной вероятности возникновения данной биологической реакции.

Допустимые для человека токи оценивают по трем критериям электробезопасности.

Первый критерий – осязаемый ток. В качестве первого критерия для переменного тока частотой 50 Гц принят ток  $I = 0,6$  мА, который не вызывает нарушений деятельности организма. Допускаемая длительность протекания такого тока через человека не более 10 мин.

Второй критерий – неотпускающий ток. В качестве второго критерия электробезопасности принят ток  $I = 6$  мА, при протекании которого через человека вероятность отпущения равна 99,5 %. Длительность воздействия такого тока ограничивается защитной реакцией самого человека.

Третий критерий – фибрилляционный ток. Это ток промышленной частоты, который при длительном воздействии 1...3 с не вызывает фибрилляцию сердца у человека массой 50 кг, с некоторым запасом принят равным 50 мА.

Таким образом, величина тока оказывает существенное влияние на степень поражения человека. При одинаковой длительности протекания тока через человека характер воздействия существенно изменяется от ощущения (0,6...1,6 мА) до неотпущения (6...24 мА) и фибрилляции сердца (более 50 мА).

*Продолжительность действия электрического тока.* Существенное влияние на исход поражения оказывает длительность прохождения тока через тело человека. Продолжительное действие тока приводит к тяжелым, а иногда смертельным поражениям.

При кратковременном воздействии (0,1 ... 0,5 с) ток порядка 100 мА не вызывает фибрилляции сердца. Если увеличить длительность воздействия до 1 с, то этот же ток может привести к смертельному исходу. С уменьшением длительности воздействия значения допустимых для человека токов существенно увеличиваются. Так, при изменении времени воздействия от 1 до 0,1 с допустимый ток возрастет примерно в 16 раз.

Кроме того, сокращение длительности воздействия электрического тока уменьшает опасность поражения человека исходя из некоторых особенностей работы сердца.

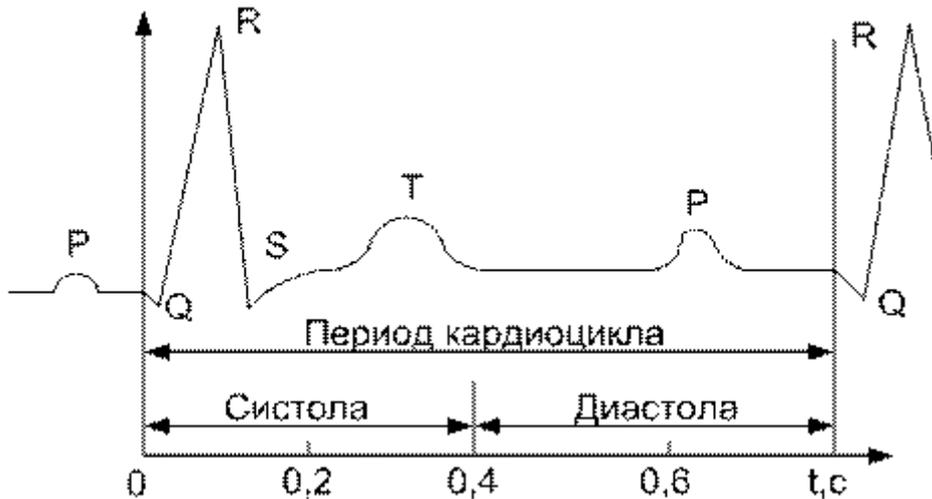


Рис. 5. Схема электрокардиограммы

Продолжительность одного периода кардиоцикла (рис. 5) составляет  $0,75 \dots 0,85$  с. В каждом кардиоцикле наблюдается период систолы, когда желудочки сердца сокращаются (пик QRS) и выталкивают кровь в артериальные сосуды. Фаза T соответствует окончанию сокращения желудочков и они переходят в расслабленное состояние.

В период диастолы желудочки наполняются кровью. Фаза P соответствует сокращению предсердий. Установлено, что сердце наиболее чувствительно к воздействию электрического тока во время фазы T кардиоцикла. Для того, чтобы возникла фибрилляция сердца, необходимо совпадение по времени воздействия тока с фазой T, продолжительность которой  $0,15 \dots 0,2$  с. С сокращением длительности воздействия электрического тока вероятность такого совпадения становится меньше а, следовательно, уменьшается опасность возникновения фибрилляции сердца.

В случае несовпадения времени прохождения тока через человека с фазой T, токи, значительно превышающие пороговые значения, не вызовут фибрилляции сердца.

Влияние длительности прохождения тока через тело человека на исход поражения можно оценить эмпирической формулой

$$I_h = \frac{50}{t},$$

где  $I_h$  – ток, проходящий через тело человека, мА;  $t$  – продолжительность прохождения тока, с.

Эта формула действительна в пределах 0,1...1,0 с. Ее используют для определения предельно допустимых токов, проходящих через человека по пути «рука-ноги», необходимых для расчета защитных устройств.

*Пути тока через тело человека.* Путь тока в теле человека зависит от того, какими участками тела пострадавший прикасается к токоведущим частям, его влияние на исход поражения проявляется еще и потому, что сопротивление кожи на разных участках тела неодинаково.

Наиболее опасно прохождение тока через дыхательные мышцы и сердце. Так отмечено, что на пути «рука-рука» через сердце проходит 3,3 % общего тока. «Левая рука-ноги» – 3,7 %, «правая рука-ноги» – 6,7 %, «нога-нога» – 0,4 % , «голова-ноги» – 6,8 % , «голова-руки» – 7 %.

По данным статистики потеря трудоспособности на три дня и более наблюдалась при пути тока «рука-рука» в 83 % случаев, «левая рука-ноги» – 80 %, «правая рука-ноги» – 87 %, «нога-нога» – в 15 % случаев.

Таким образом, путь тока влияет на исход поражения; ток в теле проходит необязательно по кратчайшему пути, что объясняется большой разницей в удельном сопротивлении различных тканей (костная, мышечная, жировая и т. д.).

Наименьший ток через сердце проходит при пути тока по нижней петле «нога-нога». Однако из этого не следует делать выводы о малой опасности нижней петли (действие шагового напряжения). Обычно, если ток достаточно велик, он вызывает судороги ног, и человек падает, после чего ток уже проходит через грудную клетку, т. е. через дыхательные мышцы и сердце.

*Род и частота тока.* Установлено, что переменный ток более опасен, чем постоянный. Это следует также из табл. 1, так как одни и те же воздействия вызываются большими значениями постоянного тока, чем переменного. Однако это характерно для относительно небольших напряжений (до 250...300 В). Считают, что напряжение 120 В постоянного тока при одинаковых условиях эквивалентно по опасности напряжению 40 В переменного тока промышленной частоты. При более высоких напряжениях опасность постоянного тока возрастает.

В интервале напряжений 400...600 В опасность постоянно-

го тока практически равна опасности переменного тока с частотой 50 Гц, а при напряжении более 600 В постоянный ток опаснее переменного. При попадании под постоянное напряжение особенно резкие болевые ощущения возникают в момент замыкания и размыкания электрической цепи.

Исследования показали, что самыми неблагоприятными для человека являются токи промышленной частоты (50 Гц). С увеличение частоты значения (от 50 Гц до 0) неотпускающего тока возрастают (рис. 6) и при частоте равной нулю (постоянный ток – болевой эффект), они становятся больше примерно в 3 раза.

При увеличении частоты значения (более 50 Гц) неотпускающего тока возрастают. Дальнейшее же повышение частоты тока сопровождается снижением опасности поражения, которая полностью исчезает при частоте 45...50 кГц. Но эти токи могут вызвать ожоги, как при возникновении электрической дуги, так и при прохождении их непосредственно через тело человека. Снижение опасности поражения током с повышением частоты практически заметно при частоте 1000...2000 Гц.

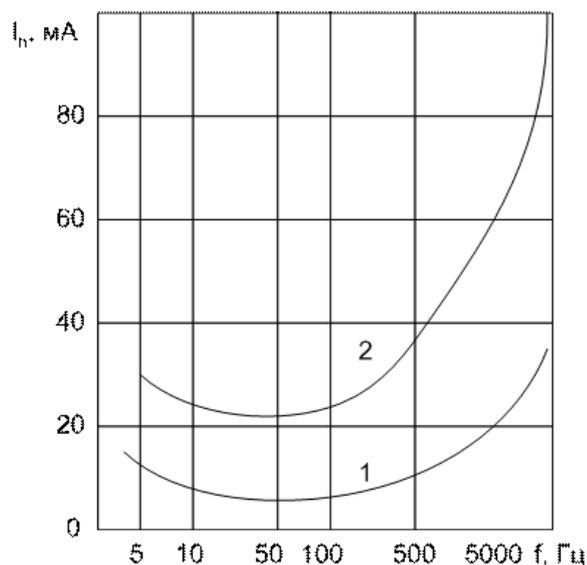


Рис. 6. Зависимость неотпускающего тока от частоты:  
1 – для 0,5 % испытуемых; 2 – для 99,5 % испытуемых

*Индивидуальные свойства человека.* Установлено что, физически здоровые и крепкие люди легче переносят электрические удары.

Повышенной восприимчивостью к электрическому току отличаются лица, страдающие болезнями кожи, сердечнососудистыми заболеваниями, органов внутренней секреции, легких, нервными болезнями и др.

Правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок предусматривают отбор персонала для обслуживания действующих электроустановок по состоянию здоровья. С этой целью проводится медицинское освидетельствование лиц при поступлении на работу и периодически 1 раз в два года в соответствии со списком болезней и расстройств, препятствующих допуску к обслуживанию действующих электроустановок.

*Условия внешней среды.* Влажность и температура воздуха, наличие заземленных металлических конструкций и полов, токопроводящей пыли оказывают дополнительное влияние на условия электробезопасности. Степень поражения электрическим током во многом зависит от плотности и площади контакта человека с токоведущими частями. Во влажных помещениях с высокой температурой или наружных электроустановках складываются неблагоприятные условия, при которых площадь контакта человека с токоведущими частями увеличивается. Наличие заземленных металлических конструкций и полов создает повышенную опасность поражения вследствие того, что человек практически постоянно связан с одним полюсом (землей) электроустановки. В этом случае любое прикосновение человека к токоведущим частям сразу приводит к двухполюсному включению его в электрическую цепь. Токопроводящая пыль также создает условия для электрического контакта, как с токоведущими частями, так и с землей.

В зависимости от наличия перечисленных условий, повышающих опасность воздействия тока на человека, все помещения по опасности поражения людей электрическим током подразделяются на следующие классы: без повышенной опасности, с повышенной опасностью, особо опасные.

*Помещения без повышенной опасности* характеризуются отсутствием условий, создающих повышенную или особую опасность.

*Помещения с повышенной опасностью* характеризуются наличием в них одного из следующих условий, создающих по-

вышенную опасность:

- сырости (относительная влажность воздуха длительно превышает 75 %) или токопроводящей пыли;
- токопроводящих полов (металлические, земляные, железобетонные, кирпичные и др.);
- высокой температуры (выше + 35 °С);
- возможности одновременного прикосновения человека к имеющим соединения с землей металлоконструкциям зданий, технологическим аппаратам, механизмам и т. п., с одной стороны, и к металлическим корпусам электрооборудования – с другой.

*Особо опасные помещения* характеризуются наличием одного из следующих условий, создающих особую опасность:

- особой сырости (относительная влажность воздуха близка к 100 %: потолок, стены, пол и предметы в помещении покрыты влагой);
- химически активной или органической среды (разрушающей изоляцию и токоведущие части электрооборудования);
- одновременно двух или более условий повышенной опасности.

### **Освобождение человека от действия электрического тока**

При поражении человека электрическим током необходимо быстро и осторожно, так, чтобы самому не попасть под напряжение, освободить его от воздействия тока. Для этого лучше всего отключить установку ближайшим выключателем или разорвать цепь тока (в электроустановках до 1000 В), перерезав провод при помощи инструментов с изолированными ручками (нож, кусачки, топор и др.). При использовании топора провода надо рубить по одному, чтобы не образовалась электрическая дуга из-за короткого замыкания между проводами.

В случаях, когда пострадавший в момент поражения находится на высоте, после отключения электроустановки ему угрожает падение. Необходимо принять меры, предупреждающие падение или возможные ушибы пострадавшего.

При невозможности отключения установки для освобождения пострадавшего от воздействия электрического тока необхо-

димо отделить его от токоведущих частей. В установках до 1000 В для этого используют любой предмет, непроводящий ток, например, деревянную палку (доску), или, обмотав шарфом руку, взять пострадавшего за сухую одежду и оттащить его от токоведущих частей. Лучше, конечно, использовать для этого диэлектрические средства защиты (перчатки, боты, коврики). Если пострадавший судорожно сжал один из проводов, можно разорвать электрическую цепь через пострадавшего, отделив его не от провода, а от заземленных частей. Для этого под пострадавшего надо подсунуть сухую доску, фанеру или оттянуть его ноги от земли при помощи сухой веревки. Если напряжение установки более 1000 В и быстрое ее отключение невозможно, нужно надеть диэлектрические перчатки и боты и изолирующей штангой или изолирующими клещами, рассчитанными на напряжение данной электроустановки, освободить пострадавшего от контакта с токоведущими частями.

Для отключения пострадавшего от действия тока можно использовать также преднамеренное замыкание накоротко и заземление фаз электроустановки. Этот способ применяют в том случае, когда никакие другие способы не могут быть применены, так как сам по себе он довольно опасен. Замыкание и заземление проводов воздушной линии осуществляют путем набрасывания на нее гибкого изолирующего проводника. Набрасываемый провод предварительно надежно заземляют путем присоединения его к заземляющему устройству, металлическому телу опоры или специально забитому в землю стержневому заземлителю. Бросающий и находящиеся вблизи другие люди не должны касаться этого проводника после контакта его с проводами линии и находиться ближе 10 м от места соединения его с землей. Для удобства набрасывания к концу проводника прикрепляют небольшой груз. Напряжение шага или шаговым напряжением называется – напряжение между двумя точками цепи тока, находящихся одна от другой на расстоянии шага, на которых одновременно стоит человек (ГОСТ 12.1.009-76).

## Расчет возможных токов поражения

Фактические значения  $I_h$  и  $U_{np}$  могут быть определены расчётным путём или экспериментально. Расчётные зависимости для определения  $I_h$  приведены в табл. 2, 3 и 4.

Таблица 2

Формулы для расчёта тока, проходящего через человека при прикосновении к проводнику в двухпроводных сетях переменного тока

№ п/п	Характеристика сети	Схема включения человека в электрическую сеть	Формула для расчета тока
1	Изолированная от земли в нормальном режиме работы		$I_h = \frac{UR_1}{(R_1 \times R_2 + R_1 \times R_h + R_2 \times R_{ch})}$ <p>При <math>R_1 = R_2 = R</math></p> $I_h = \frac{U}{2 \times R_h + R}$
2	Изолированная от земли в аварийном режиме работы		$I_h = \frac{UR_1}{(R_1 \times R_2 + R_1 \times R_h + R_2 \times R_{ch})}$ <p>где</p> $R_3 = \frac{U \times r_{3M}}{2 \times R_h + r_{3M}}$
3	С заземленным проводом (прикосновение к незаземленному проводу)		$I_h = \frac{U_\phi}{R_{ch} + r_0}$
4	С заземленным проводом (с прикосновением к заземленному проводу)		$I_h = \frac{U_{ab}}{R_{ch} + r_0} = \frac{I_{pa\bar{b}} \times R_{ab}}{R_{ch} + r_0}$

В табл. 2 приведены следующие обозначения:  $U$  – напряжение сети;  $R_1, R_2$  – сопротивления проводов относительно земли;  $r_0$  – сопротивление заземления провода;  $r_{3м}$  – сопротивление замыкания провода на землю;  $R_{ch}$  – сопротивление в цепи тела человека;  $R_h$  – сопротивление нагрузки;  $R_{ab}$  – сопротивление провода на участке  $ab$ ;  $I_{раб}$  – рабочий ток нагрузки.

При расчете  $I_h$  необходимо знать сопротивление в цепи человека  $R_{ch}$ , которое включает в себя сумму сопротивлений тела человека  $R_h$ , обуви  $R_{об}$  и основания (пола или грунта), на котором стоит человек  $R_{ос}$ , т. е.

$$R_{ch} = R_h + R_{об} + R_{ос}, \text{ Ом.}$$

Сопротивление тела человека  $R_h$  при напряжениях прикосновения  $U_{np} \geq 50$  В принимается равным 1 кОм, а при  $U_{np} \leq 50$  В – 6 кОм.

Сопротивление основания грунта равно:  
если ступни ног расположены рядом

$$R_{ос} \approx 2,2\rho, \text{ Ом;}$$

если ступни ног отстоят одна от другой на расстоянии шага

$$R_{ос} \approx 1,5\rho, \text{ Ом,}$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление грунта, Ом·м.

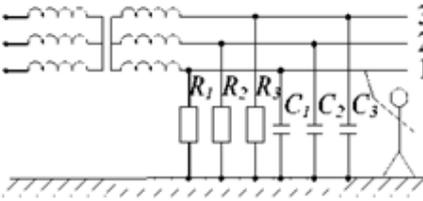
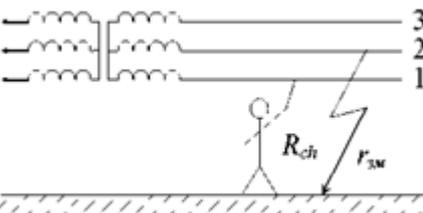
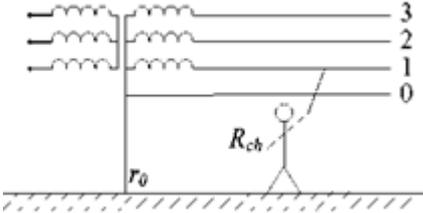
Электрическое сопротивление основания  $R_{ос}$ , если человек стоит на грунте, зависит от вида и влажности грунта; если человек стоит на полу – от материала и степени влажности пола. Сопротивление обуви  $R_{об}$  зависит от материала подошвы, влажности помещения и приложенного напряжения.

При высокой влажности обуви и грунта  $R_{об}$  и  $R_{ос}$  принимают равными нулю, а сопротивление в цепи человека  $R_{ch}$  равным сопротивлению тела человека  $R_h$ .

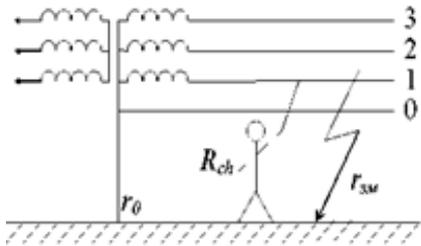
Для расчёта тока, проходящего через человека в случае прикосновения его к одной из фаз трёхфазных сетей, без учёта влияния систем защиты, контроля и автоматики можно воспользоваться формулами, указанными в табл. 3.

Таблица 3

Формулы для расчета  $I_h$ , проходящего через человека, прикоснувшегося к фазному проводу трехфазных сетей

№ п.п.	Характеристика сети	Схема включения человека в электрическую сеть	Формула для расчета тока
1	2	3	4
1	Трехпроводная сеть с изолированной нейтралью при нормальном режиме работы		<p>При <math>R_1 = R_2 = R_3 = R</math>  <math>C_1 = C_2 = C_3 = C</math>  <math display="block">I_h = \frac{3U_\phi}{3R_{ch} + Z}</math> или в действительном виде  <math display="block">I_h = \frac{U_\phi}{\sqrt{1 + \frac{R \times (R + 6R_{ch})}{9R_{ch}^2(1 + R^2\omega^2C^2)}}}</math> При <math>C_1 = C_2 = C_3 = C</math> стремится к 0 (в сетях с большой протяженностью)  <math>Z \approx R</math>, тогда  <math display="block">I_h = \frac{3U_\phi}{3R_{ch} + R}</math></p>
2	Трехпроводная сеть с изолированной нейтралью при аварийном режиме работы (одна из фаз замкнута на землю через сопротивление замыкания $r_{зм}$ )		$I_h = \frac{U_\phi}{R_{ch} + r_{зм}}$ $U_{np} = U_\phi$
3	Четырехпроводная сеть с глухозаземленной нейтралью при нормальном режиме работы		$I_h = \frac{U_\phi}{R_{ch} + r_0} = \frac{U_\phi}{R_{ch}}$ так как $r_0 \ll R_{ch}$ $U_{np} = U_\phi$

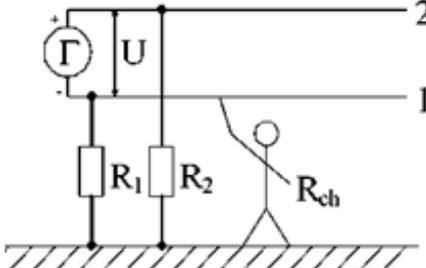
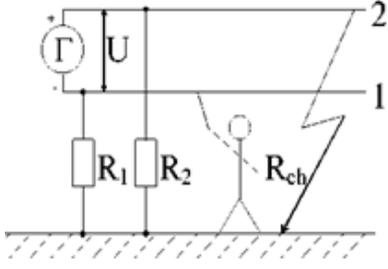
## Продолжение табл. 3

1	2	3	4
4	Четырехпроводная сеть с глухозаземленной нейтралью при аварийном режиме работы (одна из фаз замкнута на землю)		$U_{л} > U_{np} > U_{\phi}$

Расчёт тока  $I_h$  в случае прикосновения человека, имеющего электрическую связь с землёй, к токоведущим частям сетей постоянного тока можно производить по зависимостям, приведенным в табл. 4.

Таблица 4

Формулы для расчета тока  $I_h$ , проходящего через человека, прикоснувшегося к проводу в сетях постоянного тока

№ п.п.	Характеристика сети	Схема включения человека в электрическую сеть	Формула для расчета тока
1	Двухпроводная сеть в нормальном режиме работы		В установившемся режиме $I_h = \frac{UR_1}{R_{ch} \times (R_1 + R_2) + R_1 \times R_2}$ или $I_h = \frac{U}{2R_{ch} + R}$ при $R_1 = R_2 = R$
2	Двухпроводная сеть в аварийном режиме работы (провод 2 замкнут на землю через сопротивление замыкания $r_{зм}$ )		В установившемся режиме при $r_{уз} \ll R_1, R_2, R_c$ $I_h = \frac{U}{R_{ch}}$

В табл. 4 приведены следующие обозначения:  $\Gamma$  – генератор;  $U$  – напряжение источника питания (генератора);  $R$  – активное

сопротивление провода относительно земли;  $R_{ch}$  – полное сопротивление в цепи человека;  $r_{зм}$  – сопротивление замыкания проводов на землю.

### Нормирование напряжения прикосновения и токов через тело человека

В табл. 5 и 6 представлены предельно допустимые напряжения  $U_{np}$  и токи  $I_h$ , проходящие через человека, соответственно при нормальном (неаварийном) и аварийном режимах работы электроустановок.

Таблица 5

Напряжения  $U_{np}$  и токи  $I_h$ , проходящие через человека  
при нормальном режиме работы электроустановки

Род и частота тока	Наибольшие допустимые значения (нормальный режим)	
	$U_{np}$ , В	$I_h$ , мА
Переменный, 50 Гц	2	0,3
Переменный, 400 Гц	3	0,4
Постоянный	8	1,0

**Примечание.** Настоящие нормы соответствуют продолжительности воздействия тока на человека не более 10 мин. в сутки. Для лиц, выполняющих работу в условиях высоких температур (более 25 °С) и влажности (более 75 %), приведенные нормы должны быть уменьшены в три раза.

Таблица 6

Напряжения  $U_{np}$  и токи  $I_h$ , проходящие через человека при аварийном режиме работы электроустановки

Род и частота тока	Нормируемая величина	Наибольшие допустимые значения при продолжительности воздействия, 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	более 1,0
Переменный, 50 Гц	$U_{np.доп.}, В$	650	500	250	165	125	100	85	70	65	55	50	42
	$I_{h.доп.}, МА$	650	500	250	165	125	100	85	70	65	55	50	6
Переменный, 400 Гц	$U_{np.доп.}, В$	650	500	500	330	250	200	170	140	130	110	100	42
	$I_{h.доп.}, МА$	650	500	500	330	250	200	170	140	130	110	100	8
Постоянный	$U_{np.доп.}, В$	650	500	400	350	300	250	240	230	220	210	200	50
	$I_{h.доп.}, МА$	650	500	400	350	300	250	240	230	220	210	200	15

Для оценки опасности электропоражения может быть определена вероятность возникновения электротравмы в конкретных производственных условиях.

Поражение человека электрическим током наступает при совпадении двух факторов: вероятности того, что при прикосновении к электроустановке человек попал под напряжение,  $P(A)$ , и вероятности того, что ток, проходящий через человека, превысит (с учётом времени воздействия) допустимое значение,  $P(B)$ . Фактор  $B$  зависит от фактора  $A$ , поэтому вероятность поражения током

$$P = P(B/A)P(A).$$

Вероятность появления фактора  $A$

$$P = P(G)P(D),$$

где  $P(G)$  – вероятность прикосновения человека к электроустановке;  $P(D)$  – вероятность появления на установке напряжения.

Таким образом, вероятность поражения человека током

$$P = P(G)P(D)P(B/A).$$

Это выражение позволяет количественно оценить опасность электропоражения для данного типа электроустановок, определить эффективные пути снижения электротравматизма.

Вероятность появления факторов  $G$  и  $D$  для конкретных типов электроустановок можно определить путем анализа надёжности и условий эксплуатации, хронометрии производственного процесса. При этом учитываются только те отказы (аварии) в электроустановках, которые ведут к возникновению условий поражения.

Для нахождения вероятности реализации фактора  $B$  определяется ток, проходящий через тело человека, и его значение сравнивается с допустимым. От значения  $I_h$  зависят также выбор средств защиты и определение их характеристик.

### Примеры решения задач по оценке поражения электрическим током

**Задача 1.** Произвести оценку опасности электропоражения человека, оказавшегося в ситуации, указанной на рис. 7.

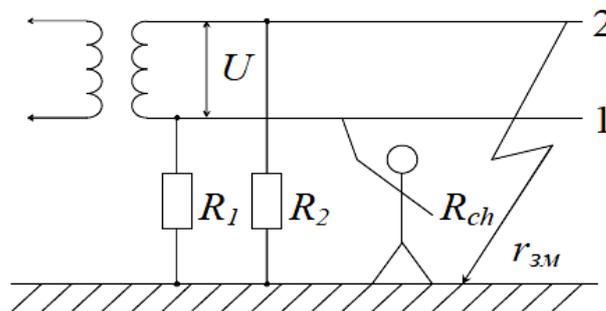


Рис. 7. Схема включения человека в электрическую сеть:

$$R_1 = R_2 = R = 200 \text{ кОм}; \quad r_{3m} = 100 \text{ Ом}; \quad U = 220 \text{ В}.$$

Человек стоит на влажном песчаном грунте в обуви с кожаной подошвой.

### *Решение*

Чтобы оценить, опасно ли такое прикосновение человека к токоведущим частям, необходимо знать ток, протекающий через человека  $I_h$ , или напряжение, действующее на него  $U_{np}$ , и сравнить эти значения с допустимыми.

Согласно п. 2 (табл.2)

$$I_h = \frac{UR_1}{(R_1R_9 + R_1R_{ch} + R_9R_{ch})}$$

где  $U = 220$  В – напряжение сети;  $R_1 = 200$  кОм – сопротивление изоляции проводов сети по отношению к земле;  $R_{ch}$  – сопротивление в цепи человека

$$R_{ch} = R_h + R_{об} + R_{ос},$$

откуда

$R_h$  (1 кОм) – сопротивление тела человека;

$R_{об}$  (0,5 кОм) – сопротивление обуви (табл. 7);

$R_{ос}$  (1,6 кОм) – сопротивление основания (табл. 8),

значит,  $R_{ch} = 1 + 0,5 + 1,6 = 3,1$  кОм;

$R_9$  – эквивалентное сопротивление согласно п. 2 (табл. 2):

$$R_9 = \frac{R_2 r_{3M}}{R_2 + r_{3M}},$$

где  $r_{3M}$  (100 Ом) – сопротивление замыкания провода на землю:

$$\text{значит, } R_9 = \frac{200 \times 10^3 \times 100}{200 \times 10^3 + 100} \approx 100 \text{ Ом.}$$

Таблица 7

Сопротивление обуви протеканию тока

Материал Подошвы	Сопротивление обуви, кОм, при напряжениях сети, В			
	до 65	127	220	выше 220
Помещение сухое				
Кожа	200	150	100	50
Кожимит	150	100	50	25
Резина	500	500	500	500
Помещение сырое				
Кожа	1,6	0,8	0,5	0,2
Кожимит	2,0	1,0	0,7	0,5
Резина	2,0	1,8	1,5	1,0

Тогда

$$I_h = \frac{220 \times 10^3}{200 \times 10^3 \times 100 + 200 \times 10^3 \times 3,1 \times 10^3 + 100 \times 3,1 \times 10^3} \approx 0,07 \text{ А.}$$

Таблица 8

Сопrotивление опорной поверхности ног человека  
растеканию тока в зависимости от вида грунта

Материал	Сопrotивление опорной поверхности ног, Ом, в зависимости от грунта	
	Сухой	Влажный
Асфальт, гравий, Щебень	7200	3800
Вода на поверхности	–	30
Глина	200	40
Каменистый грунт	8500	5000
Лед, снег	$2 \times 10^6$	300
Мерзлый грунт	$10^4$	4000
Песок	8000	1600
Садовая земля	190	90
Скалистый грунт	$3 \times 10^7$	$3 \times 10^4$
Суглинок	500	125
Супесок	1250	500
Торф	–	50
Чернозем	160	50

**Вывод.** Предельно допустимое значение тока через человека при  $t \geq 1$  с равно 6 мА (табл. 5), значит прикосновение человека к проводу сети в данном случае опасно.

**Задача 2.** Рассчитать ток, проходящий через человека, стоящего на мокром полу в обуви с кожмитовой подошвой и касающегося заземленного корпуса установки, находящейся в аварийном режиме (рис. 8). Установка питается трехфазным напряжением от сети с изолированной нейтралью. Сделать вывод относительно опасности такого прикосновения.

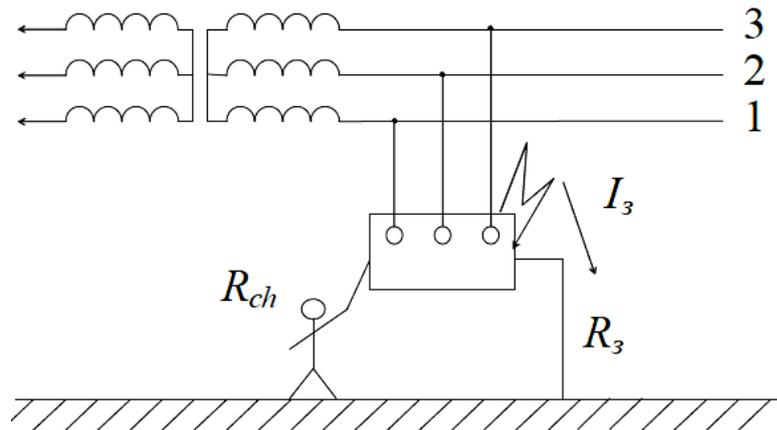


Рис. 8. Схема включения человека в электрическую цепь ( $U = 380/220 \text{ В}$ )

### Решение

1. Для определения тока через человека необходимо знать напряжение прикосновения (действующего в данной ситуации на человека)

$$U_{np} = I_3 \times R_3,$$

где  $I_3$  – ток через заземлитель,

$$I_3 = \frac{3U_{\phi}}{3R_3 + R},$$

где  $R_3$  – сопротивление заземлителя. Оно не должно превышать 4 Ом в сети с указанными напряжением и мощностью;  $R$  – сопротивление изоляции. В нормальном режиме работы сети сопротивление заземлителя не должно опускаться ниже 500 кОм.

2. Ток через человека

$$I_h = \frac{U_{np}}{R_{ch}},$$

где  $R_{ch} = R_h + R_{об} + R_{oc}$ ,  $R_{об} = 0,5 \text{ кОм}$  (табл. 7);  $R_{oc} = 0,1 \text{ кОм}$ , значит,  $R_{ch} = 1 + 0,1 + 0,5 = 1,6 \text{ кОм}$ .

**Вывод.** Так как предельно допустимый ток при продолжительном воздействии (более 1 с) в заданных условиях равен 6 мА, то человеку опасность поражения током не угрожает.

**Задача 3.** Сравнить опасность электропоражения персонала при прикосновении к поврежденной (пробой фазы на корпус), заземленной электроустановке при питании ее от трёхфазной четырёхпроводной сети с заземленной нейтралью и от трёхфазной сети с изолированной нейтралью при следующих условиях: напряжение в сети  $U = 380/220$  В, сопротивление заземления нейтрали  $r_0 = 4$  Ом, сопротивление изоляции фазных проводов по отношению к земле  $R = 500$  кОм, сопротивление заземления установки  $R_3 = 4$  Ом. Сделать вывод об эффективности защитного заземления в сетях с различным режимом нейтрали заземленной и изолированной от земли.

### Решение

1. Представим указанные условия схематично (рис. 9).

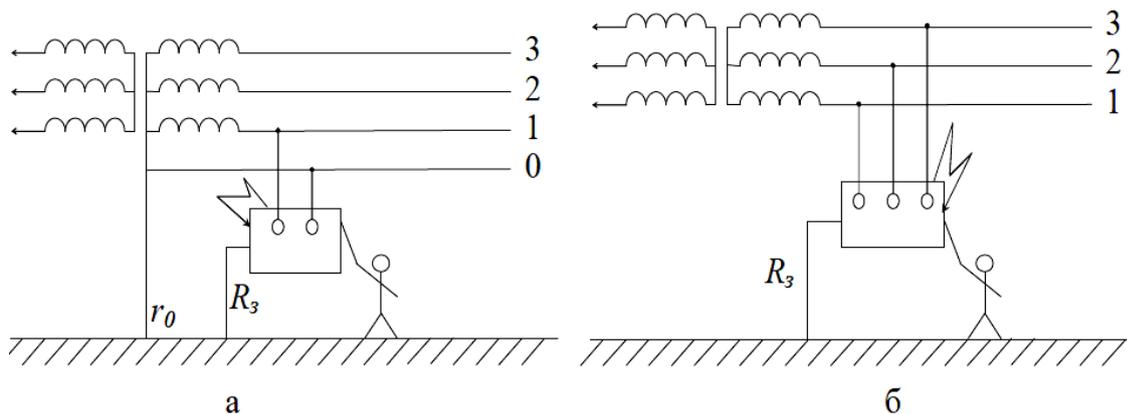


Рис. 9. Схема включения человека в электрическую цепь для различных цепей

2. Для сравнения степени опасности однофазного прикосновения в указанных случаях (а, б) необходимо знать значения тока, протекающего через человека, либо значения напряжений прикосновения, которые соответственно равны

для случая «а»

$$U_{np} = I_3 \times R_3 = \frac{U_{\phi}}{R_3 + r_0} R_3 = \frac{220}{4 + 4} \times 4 = 110 \text{ В};$$

для случая «б»

$$U_{np} = I_3 \times R_3 = \frac{3U_\phi}{3R_3 + Z} R_3 = \frac{3 \times 220}{3 + 4 + 500 \times 10^3} \times 4 = 5,3 \times 10^{-3} \text{ В.}$$

**Вывод.** Как видно из результатов расчёта, защитное заземление эффективно в сетях с изолированной нейтралью.

**Задача 4.** Определить вероятность возникновения электро-травмы в указанных условиях (рис. 10):  $U=380/220$  В, человек стоит на влажном полу в обуви с кожаной подошвой. Помещение сырое.

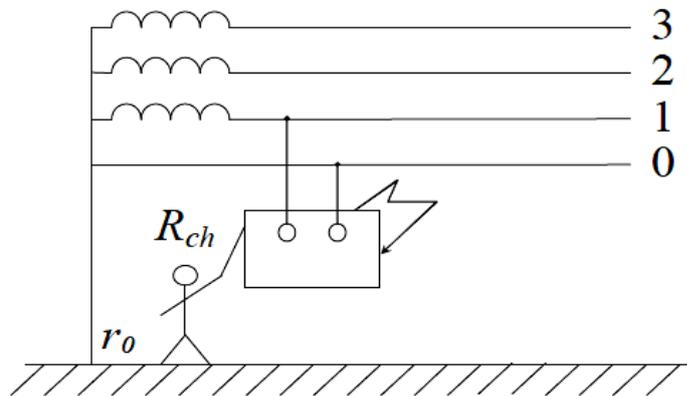


Рис. 10. Схема включения человека в электрическую цепь

### *Решение*

Вероятность поражения человека током равна

$$P = P(G)P(D)P(B/A),$$

где  $P(G)$  – вероятность прикосновения человека к электроустановке. Согласно условию, человек прикоснулся к установке, значит,  $P(G) = 1$ ;

$P(D)$  – вероятность появления на установке напряжения. По условию задачи (рис. 10) напряжение пробито на корпус установки, значит,  $P(D) = 1$ ;

$P(A)$  – вероятность того, что при прикосновении к корпусу человек попадет под напряжение. На корпусе электроустановки, согласно условию задачи, имеется напряжение, значит,  $P(A) = 1$ ;

$P(B)$  – вероятность того, что ток, проходящий через человека, превысит с учетом времени воздействия допустимое значение.

Предельно допустимое значение тока  $I_{h.дон}$  при длительном воздействии (более 1с), согласно табл. 6 равно 6 мА. Значение тока  $I_h$  в указанных условиях равно (табл. 2, п. 3)

$$I_h = \frac{U_\phi}{R_3 + r_0}.$$

где  $U_\phi$  – фазное напряжение, 220 В;  $r_0$  – сопротивление заземления нейтрали источника, согласно табл. 9, равное 4 Ом.

Таблица 9

Сопротивления нейтрали источника питания  
и повторных заземлений нулевого провода  
отходящих воздушных линий

Напряжение, В	Сопротивление заземления нейтрали трансформатора, Ом		Сопротивление повторного за- земления нулевого провода, Ом	
	Эквивалентное (с учетом ис- пользования естественных заземлителей и повторных заземлений нулевого провода)	В том числе только искусственных заземлителей	Эквивалентное сопротивление всех повторных заземлений	В том числе сопротивление каждого повторного заземления
660/380	2	15	5	15
380/220	4	30	10	30
220/127	8	60	20	60

## Вопросы

1. Какие действия может оказывать электрический ток на человека?
2. Назовите местные электротравмы.
3. На какие степени подразделяются электрические удары?
4. Что влияет на сопротивление тела человека?
5. Назовите три критерия электробезопасности.
6. Как продолжительность тока влияет на степень поражения человека электрическим током?
7. Как путь прохождения тока влияет на степень поражения человека электрическим током?
8. Как можно освободить человека от действия электрического тока?

## Рекомендуемая литература

1. Охрана труда в химической промышленности / Г. В. Макаров, А. Я. Васин, Л. К. Маринина [и др.]. – М.: Химия, 1989.
2. Манайлов, В. Е. Основы электробезопасности. – 5-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, 1991.
3. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации, утвержденные приказом Министерства энергетики Российской Федерации от 19.06.2003 № 229.
4. ГОСТ Р 12.1.009-2009. Национальный стандарт Российской Федерации. Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Термины и определения.
5. Правила охране труда при эксплуатации электроустановок