

Федеральное агентство
железнодорожного транспорта
Уральский государственный
университет путей сообщения
Кафедра «Техносферная безопасность»

С. Р. Гимаев
И. И. Гаврилин

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕЛА ЧЕЛОВЕКА

Екатеринбург
Издательство УрГУПС
2014

Федеральное агентство
железнодорожного транспорта
Уральский государственный
университет путей сообщения
Кафедра «Техносферная безопасность»

С. Р. Гимаев
И. И. Гаврилин

Исследование электрического сопротивления тела человека

Методические указания
к выполнению лабораторных работ
по дисциплине «Безопасность жизнедеятельности»
для студентов всех специальностей
всех форм обучения

Екатеринбург
Издательство УрГУПС
2014

УДК 614.8

Г48

Гимаев, С. Р.

Г48 Исследование электрического сопротивления тела человека : метод. указания к выполнению лабораторных работ / С. Р. Гимаев, И. И. Гаврилин. — Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2014. — 27, [1] с.

Рассмотрены вопросы, связанные с электрическим сопротивлением тела человека при протекании через него электрического тока. Выделены основные факторы, влияющие на степень и исход поражения человека электрическим током. Представлены основные принципы и зависимости изменения сопротивления тела человека от различных факторов и условий среды.

Методические указания предназначены для студентов всех специальностей и всех форм обучения, разработаны в соответствии с учебной программой дисциплины «Безопасность жизнедеятельности» и общепринятыми требованиями в области обеспечения электробезопасности человека.

УДК 614.8

*Издано по решению
редакционно-издательского совета университета*

Авторы: С. Р. Гимаев, ассистент кафедры «Техносферная безопасность», УрГУПС

И. И. Гаврилин, старший преподаватель кафедры «Техносферная безопасность», канд. биол. наук, УрГУПС

Рецензент: В. Г. Булаев, профессор кафедры «Техносферная безопасность», д-р техн. наук, УрГУПС

© Уральский государственный
университет путей сообщения
(УрГУПС), 2014

Оглавление

Теоретическая часть	4
Живая ткань как проводник электрического тока	4
Электрическое сопротивление тела человека	5
Зависимость сопротивления тела человека от состояния кожи.....	9
Зависимость сопротивления тела человека от параметров электрической цепи	10
Зависимость сопротивления тела человека от физиологических факторов, психологического состояния и окружающей среды	12
Влияние значения тока на исход поражения.....	13
Поражающий фактор.....	13
Характер воздействия на человека токов разного значения	13
Влияние продолжительности прохождения тока на исход поражения	15
Влияние пути тока на исход поражения	17
Влияние частоты и рода тока на исход поражения	18
Влияние индивидуальных свойств человека на исход поражения.....	19
Критерии безопасности электрического тока	20
Экспериментальная часть	24
Описание лабораторной установки	24
Порядок выполнения работы	25
Контрольные вопросы	27
Библиографический список	27

Цель работы — ознакомление с основными закономерностями изменения электрического сопротивления тела человека, проведение самостоятельного экспериментального исследования по измерению электрического сопротивления тела человека.

Теоретическая часть

Живая ткань как проводник электрического тока

Тело человека является проводником электрического тока. Однако проводимость живой ткани в отличие от обычных проводников обусловлена не только ее физическими свойствами, но и сложнейшими биохимическими и биофизическими процессами, присущими лишь живой материи.

Сопротивление тела человека является переменной величиной, имеющей нелинейную зависимость от множества факторов, в том числе от состояния кожи, параметров электрической цепи, физиологических факторов, психологического состояния человека и состояния окружающей среды.

Большинство тканей тела человека содержит значительное количество воды (до 65 % массы), при этом в ней растворено большое количество различных солей, поэтому живую ткань можно рассматривать как электролит. Переносчиком заряда в электролитах являются ионы, поэтому проводимость живой ткани носит ионный характер.

Современные исследователи рассматривают проводимость человека как некоторую специфическую клеточную проводимость. Клеточная проводимость не характеризуется законами для проводников или электролитов, а имеет свойственный только живой ткани характер протекания тока (см. Кузнецова К. Б. Электробезопасность в электроустановках железнодорожного транспорта).

Электрическое сопротивление тела человека

Электрическое сопротивление различных тканей тела человека неодинаково. Удельное объемное сопротивление различных тканей при токе 50 Гц представлено в таблице 1.

Таблица 1

Удельное сопротивление различных тканей

Наименование ткани	Удельное сопротивление, Ом·м
Кожа сухая	$3 \cdot 10^4 - 2 \cdot 10^5$
Кости (без надкостницы)	104–2·105
Жировая ткань	300–600
Мышечная ткань	15,0–30,0
Кровь	10,0–20,0
Спинномозговая жидкость	5,0–6,0

Из этих данных следует, что кожа обладает очень большим удельным сопротивлением. Поскольку практически все контакты происходят через кожу, кожа и определяет сопротивление тела человека в целом.

Строение кожи весьма сложно. Кожа состоит из двух основных слоев: наружного, называемого эпидермисом, и внутреннего, являющегося собственно кожей и носящего название дермы (рис. 1).

Наружный слой кожи — эпидермис в свою очередь состоит из пяти слоев, из которых самый верхний является, как правило, более толстым, чем все остальные слои вместе взятые, и называется роговым (рис. 2).

Роговой слой включает в себя несколько десятков рядов мертвых ороговевших клеток, имеющих вид чешуек, плотно прилегающих одна к другой. Каждая такая чешуйка представляет собой плотную роговую оболочку, как бы сплюснутую маленькую подушечку, содержащую небольшое количество воздуха.

Роговой слой лишен кровеносных сосудов и нервов и поэтому является слоем неживой ткани. Толщина его на разных участках тела различна и колеблется в пределах $0,05 \div 0,2$ мм. Наибольшей толщины он достигает в местах, подвергающихся постоянным

механическим воздействиям, в первую очередь на подошвах и ладонях, где, утолщаясь, он может образовывать мозоли.

Удельное сопротивление рогового слоя достигает $10^5 \div 10^6$ Ом·м, т. е. в сотни и тысячи раз превышает сопротивление других слоев кожи и внутренних тканей организма.

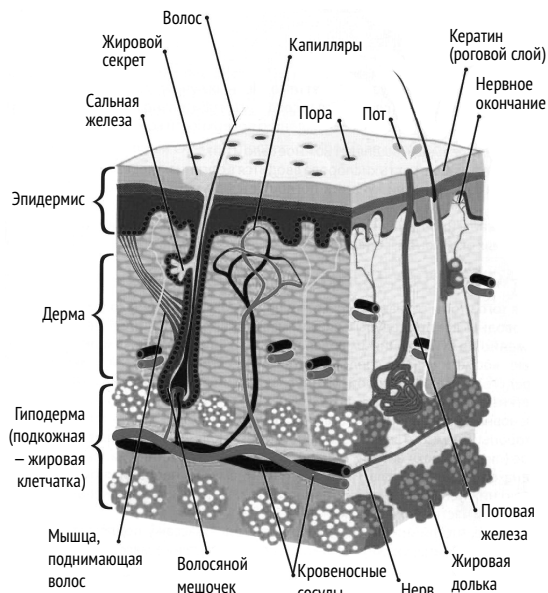


Рис. 1. Схема строения кожи человека

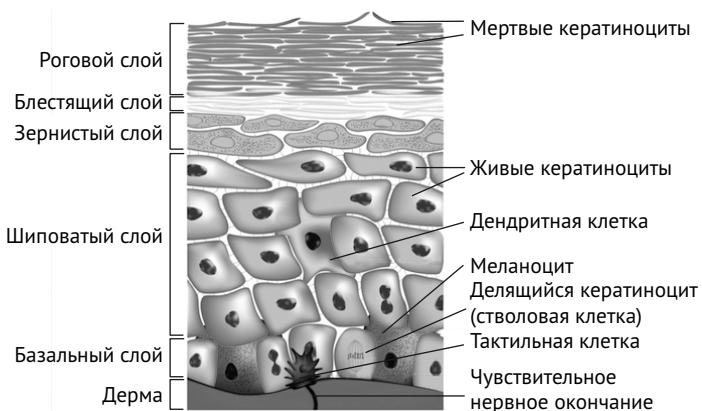


Рис. 2. Структура эпидермиса

Другие слои эпидермиса, лежащие под роговым слоем и образованные из живых клеток, можно объединить в один так называемый ростковый слой. Электрическое сопротивление росткового слоя, благодаря наличию в нем отмирающих и находящихся в стадии ороговения клеток, может в несколько раз превышать сопротивление внутреннего слоя кожи (дермы) и подкожных (внутренних) тканей организма, хотя по сравнению с сопротивлением рогового слоя оно невелико.

Внутренний слой кожи, дерма, состоит из прочных волокон соединительной и эластической ткани, переплетающихся между собой и образующих густую прочную сетку, которая и служит основой всей кожи. Между этими волокнами находятся кровеносные и лимфатические сосуды, нервные окончания и корни волос, потовые и сальные железы. Дерма является живой тканью, содержит значительное количество жидкости; электрическое сопротивление ее незначительно, во много раз меньше сопротивления эпидермиса.

Сопротивление тела человека можно условно считать состоящим из трех последовательно включенных сопротивлений (рис. 3): двух одинаковых сопротивлений наружного слоя кожи, т. е. эпидермиса, Z_n и одного сопротивления внутренних тканей тела R_b (которое включает в себя сопротивление внутренних слоев кожи и сопротивление внутренних тканей и жидкостей (мышечная, жировая ткань, кровь, лимфа и т. д.).

Сопротивление эпидермиса Z_n состоит из активного R_n и емкостного X_c сопротивлений, включенных параллельно. Емкостное сопротивление обусловлено тем, что в месте прикосновения электрода к телу человека образуется как бы конденсатор, обкладками которого являются электрод и хорошо проводящие ток ткани тела человека, лежащие под наружным слоем кожи, а диэлектриком, разделяющим обкладки, эпидермис (рис. 4).

Емкость C_n , колеблется от нескольких сотен пикофарад до нескольких микрофарад, зависит от площади контакта с электродом, места измерения.

Активное сопротивление эпидермиса R_n зависит от его удельного сопротивления ρ_s , значения

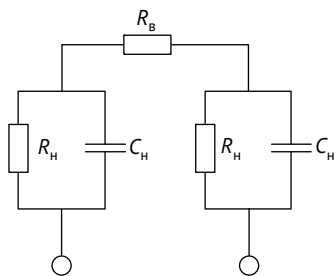


Рис. 3. Схема замещения тела человека

которого находятся в пределах $10^4 \div 10^5$ Ом·м, а также от площади контакта с электродом.

Сопротивление внутренних тканей тела R_b считается чисто активным. Значение R_b практически не зависит от площади электродов, частоты тока, а также от приложенного напряжения и равно примерно $500 \div 700$ Ом.

Эквивалентная схема сопротивления тела человека, показанная на рисунке 5, позволяет написать выражение полного сопротивления тела человека в комплексной форме, Ом:

$$\underline{Z}_h = 2\underline{Z}_n + R_b = \frac{2}{(1/R_n + j\omega C_n)} + R_b. \quad (1)$$

После соответствующих преобразований в действительной форме:

$$Z_h = \sqrt{\left(R_b + \frac{2 \cdot R_n}{1 + R_n^2 \cdot \omega^2 \cdot C_n^2}\right)^2 + \left(\frac{2 \cdot \omega \cdot R_n^2 \cdot C_n}{1 + R_n^2 \cdot \omega^2 \cdot C_n^2}\right)^2}, \quad (2)$$

где R_b — внутреннее сопротивление тела человека;

R_n — активное сопротивление рогового слоя кожи в месте контакта;

C_n — емкость рогового слоя кожи в месте контакта.

Из (2) видно, что при малой емкости C_n (когда ее можно принять равной нулю) полное сопротивление тела человека оказывается равным сумме активных сопротивлений обоих слоев эпидермиса и сопротивления внутренних тканей тела:

$$Z_h = 2 \cdot R_n + R_b = R_h. \quad (3)$$

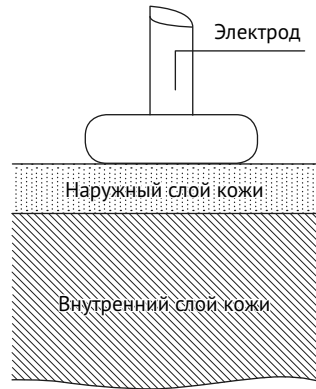


Рис. 4. Схема емкостной составляющей сопротивления кожи

Зависимость сопротивления тела человека от состояния кожи

Сопротивление кожи, а следовательно, и тела в целом, резко уменьшается при повреждении ее рогового слоя, наличии влаги на ее поверхности, интенсивном потовыделении и загрязнении.

Повреждения рогового слоя — порезы, царапины, ссадины и другие микротравмы, могут снизить сопротивление тела человека до значения, близкого к значению сопротивления его внутренних тканей, что увеличивает опасность поражения человека током.

Увлажнение кожи понижает ее сопротивление даже в том случае, если влага обладает большим удельным сопротивлением. Объясняется это тем, что влага, попавшая на кожу, растворяет находящиеся на ее поверхности минеральные вещества и жирные кислоты, выведенные из организма вместе с потом и кожным салом, и становится более электропроводной.

Таким образом, работа сырыми руками или в условиях, вызывающих увлажнение каких-либо участков кожи, создает предпосылки для тяжелого исхода в случае попадания человека под напряжение.

Потовыделение обусловлено деятельностью потовых желез, находящихся в нижнем (внутреннем) слое кожи (см. рис. 1). Пот хорошо проводит электрический ток, поскольку в его состав входят вода и растворенные в ней минеральные соли, а также некоторые продукты обмена веществ. Он выделяется на поверхность кожи по выводным протокам.

В коже всегда имеются токопроводящие каналы, содержащие то или иное количество пота. В обычных условиях проводимость их незначительна, но при интенсивном потовыделении сопротивление кожи резко падает.

Следовательно, работа в условиях, вызывающих усиленное потовыделение, повышает опасность поражения человека током.

Загрязнение кожи различными веществами, в особенности хорошо проводящими ток (металлическая или угольная пыль, окалина и т. п.), сопровождается снижением ее сопротивления, подобно тому, как это наблюдается при поверхностном увлажнении кожи, а также за счет увеличения площади контакта.

Таким образом, токарь по металлу, шахтер и лица других специальностей, у которых руки загрязняются токопроводящими веществами, подвержены большей опасности поражения током, чем лица, работающие чистыми сухими руками.

Зависимость сопротивления тела человека от параметров электрической цепи

Электрическое сопротивление зависит также от места приложения электродов к телу человека, значений тока и приложенного напряжения, рода и частоты тока, площади электродов, длительности прохождения тока и некоторых других факторов.

Место приложения электродов оказывает влияние потому, что сопротивление кожи у одного и того же человека на разных участках тела неодинаковое.

Разница в значениях сопротивления кожи на разных участках тела объясняется рядом факторов, в том числе:

- различной толщиной рогового слоя кожи;

- неравномерным распределением потовых желез на поверхности тела;

- неодинаковой степенью наполнения кровью сосудов кожи.

Наименьшим сопротивлением обладает кожа лица, шеи, рук на участке выше ладоней, в особенности на стороне, обращенной к туловищу, подмышечных впадин, тыльной стороны кистей рук.

Увеличение тока, проходящего через тело человека, сопровождается усилением местного нагрева кожи и раздражающего действия на ткани. Это в свою очередь вызывает усиление снабжения ее кровью и повышение потоотделения, что и приводит к снижению электрического сопротивления кожи в этом месте.

Повышение напряжения, приложенного к телу человека, вызывает уменьшение в десятки раз его полного сопротивления Z_h , которое в пределе приближается к наименьшему значению сопротивления подкожных тканей тела (примерно 300 Ом).

На рисунке 5 кривая 1 показывает зависимость Z_h от $U_{пр}$ при токе 50 Гц, а кривая 3 — при постоянном токе.

Уменьшение Z_h с ростом приложенного напряжения происходит в основном за счет уменьшения сопротивления кожи и объясняется влиянием ряда факторов, в том числе увеличением тока, проходящего через кожу, и пробоем рогового слоя кожи под влиянием приложенного напряжения.

Пробой рогового слоя кожи возможен, если напряженность возникшего в нем электрического поля превысит его пробивную напряженность, равную 500÷2000 В/мм. Пробой рогового слоя кожи возможен при напряжении около 50 В и выше.

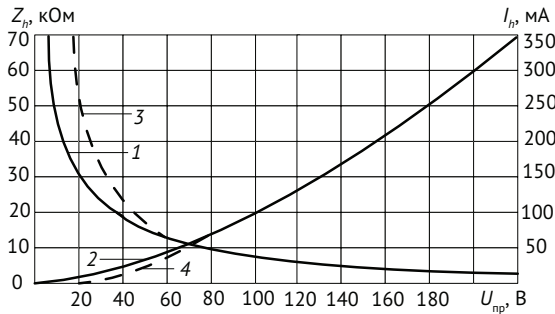


Рис. 5. Зависимость сопротивления тела человека и тока, протекающего через него, от приложенного напряжения: 1 и 2 — для переменного тока (50 Гц), 3 и 4 — для постоянного тока

Сопротивление тела человека постоянному току больше, чем переменному любой частоты. Это подтверждается также (2): при $f=0$, что соответствует постоянному току, сопротивление имеет наибольшее значение ($Z_h = 2 \cdot R_{\text{H}} + R_{\text{B}}$); с ростом частоты тока Z_h уменьшается (в результате уменьшения емкостного сопротивления) и в пределе 1000÷1500 Гц становится, согласно (2), равным внутреннему сопротивлению тела R_{B} .

Разница в значениях сопротивлений постоянному и переменному (50 Гц) токам особенно велика при малых напряжениях до 10 В. С ростом приложенного напряжения эта разница уменьшается, и, начиная с 40÷50 В, сопротивление тела человека как постоянному, так и переменному току промышленной частоты становится практически одинаковым (кривые 1 и 3 на рис. 5).

На рисунке 6 приведена кривая зависимости полного сопротивления тела человека Z_h и тока, проходящего через него, от частоты приложенного напряжения.

Площадь электродов S оказывает непосредственное влияние на полное сопротивление тела человека — чем больше площадь, тем меньше Z_h . Графики на рисунке 7 подтверждают эту зависимость. Вместе с тем они показывают, что с ростом частоты зависимость Z_h от S уменьшается, и при 10–20 кГц влияние площади электродов прекращается полностью.

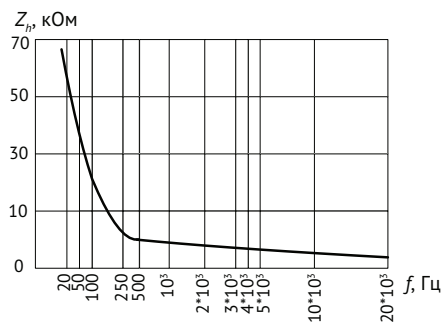


Рис. 6. Зависимость сопротивления тела человека от частоты приложенного напряжения

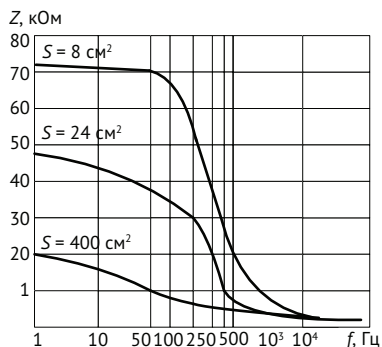


Рис. 7. Зависимость сопротивления тела человека от площади контактов и частоты приложенного напряжения

Зависимость сопротивления тела человека от физиологических факторов, психологического состояния и окружающей среды

На значение Z_h , кроме рассмотренных, влияют и другие факторы, хотя и в значительно меньшей степени.

Пол и возраст. У женщин, как правило, сопротивление тела меньше, чем у мужчин, а у детей меньше, чем у взрослых, у молодых людей меньше, чем у пожилых. Объясняется это, очевидно, тем, что у одних людей кожа тоньше и нежнее, у других — толще и грубее.

Изменения психологического состояния вызывает изменение химического состава крови и других жидкостей, тем самым изменяя их сопротивление.

Влияние значения тока на исход поражения

Поражающий фактор

Степень отрицательного воздействия тока на организм человека увеличивается с ростом тока. Вместе с тем исход поражения определяется длительностью прохождения тока, его частотой, а также некоторыми другими факторами.

Характер воздействия на человека токов разного значения

В теории электробезопасности различают несколько уровней тока, протекающего через человека, по тем ощущениям и воздействию на организм человека, которые этот ток оказывает.

Ощутимый ток. Человек начинает ощущать воздействие проходящего через него малого тока в среднем около 1,1 мА при переменном токе частотой 50 Гц и около 6 мА при постоянном токе. Это воздействие ограничивается при переменном токе слабым зудом и легким пощипыванием (покалыванием), а при постоянном токе ощущением нагрева кожи на участке, касающемся токоведущей части.

Электрический ток, вызывающий при прохождении через организм ощутимые раздражения, называется ощутимым током, а наименьшее значение этого тока называется пороговым ощутимым током.

Пороговый ощутимый ток не может вызвать поражения человека, и в этом смысле он не опасен. Однако длительное (в течение нескольких минут) прохождение этого тока через человека может отрицательно сказаться на состоянии его здоровья и поэтому недопустимо. Кроме того, ощутимый ток может стать косвенной причиной несчастного случая, поскольку человек, почувствовав воздействие тока, теряет уверенность в своей безопасности и может произвести неправильные действия. Особенно опасно неожиданное воздействие ощутимого тока при

работах вблизи токоведущих частей, на высоте и в других аналогичных условиях.

Безопасный ток, который длительно (в течение несколько часов) может проходить через человека, не нанося ему вреда и не вызывая никаких ощущений, во много раз меньше порогового ощутимого тока. Точные значения безопасного тока не установлены, однако для практических целей его наибольшие значения можно, по-видимому, принимать равными $50 \div 75$ мкА при 50 Гц и $100 \div 12$ мкА при постоянном токе.

Неотпускающий ток. Увеличение тока сверх порогового ощутимого вызывает у человека судороги мышц и болезненные ощущения, которые с ростом тока усиливаются и распространяются на все большие участки тела.

Электрический ток, вызывающий при прохождении через человека непреодолимые судорожные сокращения мышц руки, которой зажат проводник, называется неотпускающим током, а наименьшее его значение — пороговым неотпускающим током. Пороговый неотпускающий ток условно можно считать безопасным для человека, поскольку он не вызывает немедленного его поражения. Однако при длительном прохождении ток растет вследствие уменьшения сопротивления тела, в результате чего усиливаются боли и могут возникнуть серьезные нарушения работы легких и сердца, а в некоторых случаях наступает смерть.

При постоянном токе неотпускающих токов нет, человек при любых значениях тока может самостоятельно разжать руку, в которой зажат проводник, и таким образом оторваться от токоведущей части. Однако в момент отрыва возникают болезненные сокращения мышц, аналогичные по характеру и болевым ощущениям тем, которые наблюдаются примерно при таком же значении переменного (50 Гц) тока.

Пороговые неотпускающие токи различны также у мужчин, женщин и детей. Приближенные средние значения их составляют: для мужчин — 16 мА при 50 Гц и 80 мА при постоянном токе, для женщин — соответственно 11 и 50 мА, для детей — 8 и 40 мА.

Ток, превышающий пороговый неотпускающий, усиливает судорожные сокращения мышц и болевые ощущения, которые распространяются на более обширную область тела человека, чем при пороговом неотпускающем токе.

Фибрилляционный ток. Ток 50 мА и более при частоте 50 Гц, проходя через тело человека по пути (рука-рука или рука-ноги), распространяет свое раздражающее действие на мышцу сердца,

расположенную глубоко в груди. Это обстоятельство опасно для жизни, поскольку через малый промежуток времени, обычно через $1 \div 3$ с с момента замыкания цепи тока через человека, может наступить фибрилляция или остановка сердца. При этом прекращается кровообращение, и, следовательно, в организме возникает недостаток кислорода, это, в свою очередь, быстро приводит к прекращению дыхания, наступает смерть.

Электрический ток, вызывающий при прохождении через организм фибрилляцию сердца, называется фибрилляционным током, а наименьшее его значение — пороговым фибрилляционным током.

При частоте 50 Гц фибрилляционными являются токи в пределах от 50 мА до 5 А, а среднее значение порогового фибрилляционного тока примерно 100 мА. При постоянном токе средним значением порогового фибрилляционного тока можно считать 300 мА, а верхним пределом 5 А.

Значение порогового фибрилляционного тока колеблется в широких пределах, поскольку оно зависит от ряда факторов и в первую очередь от массы тела человека, рода и частоты тока, а также от длительности его воздействия.

Ток больше 5 А как переменный при 50 Гц, так и постоянный, вызывает немедленную остановку сердца, минуя состояние фибрилляции.

Длительное (несколько секунд) действие большого тока сопровождается не только остановкой сердца и прекращением дыхания, но и обширными и глубокими ожогами тела, разрушением внутренней структуры тканей организма и другими тяжелыми повреждениями отдельных органов, в том числе сердца, которые, как правило, приводят к гибели организма.

Влияние продолжительности прохождения тока на исход поражения

Длительность прохождения тока через организм существенно влияет на исход поражения: чем продолжительнее действие тока, тем больше вероятность тяжелого или смертельного исхода. Такая зависимость объясняется тем, что с увеличением времени воздействия тока на живую ткань повышается его значение, растут (накапливаются) последствия воздействия тока на организм и, наконец, повышается вероятность совпадения момента

прохождения тока через сердце с уязвимой фазой Т сердечного цикла (кардиоцикла).

Рост тока с увеличением времени его действия объясняется уменьшением сопротивления тела человека, что подробно рассмотрено ранее.

Последствия воздействия тока на организм выражаются в нарушении функций центральной нервной системы, изменении состава крови, местном разрушении тканей организма под влиянием выделяющейся теплоты, нарушении работы сердца и легких и т. п.

С увеличением времени воздействия тока эти отрицательные факторы накапливаются, а губительное влияние их на состояние организма усиливается.

Опасность совпадения момента прохождения тока через сердце с фазой Т кардиоцикла заключается в следующем.

На кардиограмме выделяются отдельные участки, соответствующие различным фазам работы сердца (рис. 8). Зубец Р возникает при сокращении предсердий (что обеспечивает заполнение расслабленных желудочков кровью), пик QRS — при сокращении желудочков сердца, благодаря чему кровь выталкивается в аорты, зубец Т — период, когда заканчивается сокращение желудочков, и они переходят в расслабленное состояние.

Наиболее уязвимым сердце оказывается в фазе Т, продолжительность которой около 0,2 с. Поэтому, если во время фазы Т через сердце проходит ток, при некотором его значении возникает фибрилляция сердца, если же время прохождения этого тока не совпадает с фазой Т, то вероятность возникновения фибрилляции резко уменьшается.

Следовательно, вероятность возникновения фибрилляции сердца, т. е. опасность смертельного поражения, зависит не только от значения тока, но и от того, с какой фазой сердечного цикла совпадает период прохождения тока через область сердца.

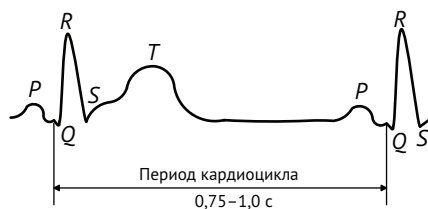


Рис. 8. Кардиоцикл человека

При длительности прохождения тока, равной времени кардиоцикла ($0,75 \div 1$ с) или превышающей его, ток «встречается» со всеми фазами работы сердца, в том числе с наиболее уязвимой фазой Т, это весьма опасно для организма. Если же время воздействия тока меньше продолжительности кардиоцикла на 0,2 с или более, то вероятность того, что время прохождения тока совпадет с фазой Т, уменьшается.

Влияние пути тока на исход поражения

Путь прохождения тока в теле человека играет существенную роль в исходе поражения. Так, если на пути тока оказываются жизненно важные органы — сердце, легкие, головной мозг, то опасность поражения весьма велика, поскольку ток воздействует непосредственно на эти органы.

Возможных путей тока в теле человека, которые именуется также петлями тока, очень много. Однако характерными, обычно встречающимися в практике, являются не более 15 петель. Наиболее часто цепь тока через человека возникает по пути правая рука-ноги, также довольно часто встречаются случаи пути рука-рука (рис. 9).

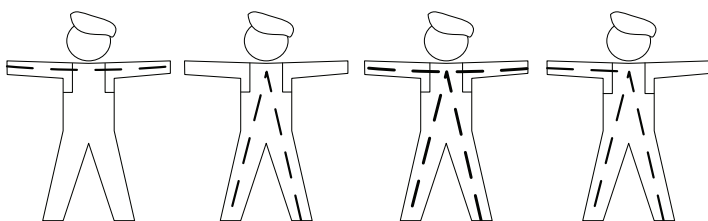


Рис. 9. Типичные пути протекания тока

Наиболее опасными являются петли голова-руки и голова-ноги, когда ток может проходить через головной и спинной мозг.

Наименее опасен путь нога-нога, который именуется нижней петлей и возникает при воздействии на человека так называемого напряжения шага. В этом случае через сердце проходит небольшой ток.

Влияние частоты и рода тока на исход поражения

Переменный ток. Из-за наличия в сопротивлении тела человека емкостной составляющей увеличение частоты приложенного напряжения сопровождается уменьшением полного сопротивления тела и ростом тока, проходящего через человека. Надо ожидать, что увеличение частоты приведет к повышению этой опасности. В действительности оказывается, что это справедливо лишь в диапазоне частот $0 \div 50$ Гц; дальнейшее же повышение частоты, несмотря на рост тока, проходящего через человека, сопровождается снижением опасности поражения, которая полностью исчезает при частоте $450 \div 500$ кГц. Ток частотой $450 \div 500$ кГц и более не может вызвать смертельного поражения вследствие прекращения работы сердца или легких, а также других жизненно важных органов.

Эти токи сохраняют опасность ожогов, как при возникновении электрической дуги, так и при прохождении их непосредственно через человека.

Постоянный ток примерно в $4 \div 5$ раз безопаснее переменного частотой 50 Гц. Постоянный ток, проходя через тело человека, вызывает более слабые сокращения мышц и менее неприятные ощущения, по сравнению с переменным током того же значения. Лишь в момент замыкания и размыкания цепи тока человек испытывает кратковременное болезненное ощущение вследствие внезапного судорожного сокращения мышц, подобное тому, которое возникает при переменном токе примерно того же значения.

Причины различной степени опасности токов с разными частотами кроются в характере раздражающего действия этих токов на клетки живой ткани. Упрощенно изменение опасности тока с изменением частоты объясняется следующим образом.

Если к клетке живой ткани приложить постоянное напряжение, то во внутриклеточном веществе, которое можно рассматривать как электролит, возникнет электролитическая диссоциация, т. е. распад молекул на положительные и отрицательные ионы. Эти ионы начнут перемещаться к оболочке клетки, причем положительные ионы будут сосредотачиваться у отрицательного электрода, а отрицательные у положительного. Ясно, что это явление вызовет нарушение нормального состояния клетки и протекающих в ней естественных биохимических процессов.

При переменном токе ионы будут перемещаться то в одну, то в другую сторону, следуя за изменением полярности. При небольшой частоте (до 50 Гц) ионы, достигнув оболочки клетки, будут некоторое время, пока не изменится полярность, находиться без движения. Очевидно, что этот процесс приведет к более тяжелым нарушениям в клетке, чем при постоянном токе.

Если частота тока такова, что за полупериод ион успевает пройти все внутриклеточное расстояние, а в течение следующего полупериода — то же расстояние, но в обратном направлении, то этот более сложный процесс, вероятно, способствует более тяжелым нарушениям естественного состояния клетки. Такое положение возникает при частотах до 50 Гц. В интервале этих частот, т. е. от 0 до 50 Гц, большее нарушение вызывает ток, при котором ион делает большее число «полных» пробегов в единицу времени, т. е. ионы находятся в непрерывном движении и пробегают наибольшее расстояние в клетке, а именно ток частотой около 50 Гц.

Поскольку ионы, являясь материальными частицами, обладают некоторой предельной скоростью перемещения в данном электролите, можно полагать, что при частоте тока выше некоторого предела (очевидно, выше 50 Гц) ион не успеет достигнуть оболочки клетки, как произойдет изменение полярности, тогда он будет вынужден двигаться в обратном направлении. Такое явление будет способствовать, вероятно, меньшему нарушению нормального состояния клетки.

При дальнейшем повышении частоты длина пути пробега ионов будет сокращаться и может наступить такой момент, когда движение ионов будет практически отсутствовать, а следовательно, не возникнет опасного нарушения состояния клетки. Это возможно, очевидно, при частотах 450–500 кГц.

Влияние индивидуальных свойств человека на исход поражения

Установлено, что здоровые и физически крепкие люди легче переносят электрические удары, чем больные и слабые. Повышенной восприимчивостью к электрическому току обладают лица, страдающие рядом заболеваний, в первую очередь болезнями кожи, сердечно-сосудистой системы, органов внутренней секреции, легких, нервными болезнями и др.

Психическое состояние человека в момент поражения имеет если не большее, то, по крайней мере, такое же значение для исхода поражения, как сопротивление тела человека и другие его физические данные. Алкоголики, неврастеники, истерические больные, эпилептики, а также меланхолики могут погибнуть от токов, которые совершенно безопасны для здоровых людей. Немалое значение имеет психическая подготовленность человека к возможной опасности поражения током. Дело в том, что неожиданный электрический удар, даже при относительно небольшом напряжении, нередко приводит к тяжелым последствиям; если же человек подготовлен к удару, т. е. ожидает его, то степень опасности резко уменьшается. Имеют значение также моральное состояние, степень внимания и сосредоточенности человека на процессе выполняемой им работы, утомление и т. п. Квалификация человека также отражается на результатах воздействия тока: человек, далекий от электротехники, в случае попадания под напряжение оказывается, как правило, в более тяжелых условиях, чем опытный электротехник. Дело здесь в опыте, умении правильно оценить степень возникшей опасности и применить рациональные приемы освобождения себя от воздействия тока.

Критерии безопасности электрического тока

Защитные меры и средства защиты от поражения электрическим током должны создаваться с учетом допустимых для человека значений тока при данной длительности и пути его прохождения через тело или соответствующих этим токам напряжений прикосновения.

В настоящее время в России действует ГОСТ 12.1.000–82* «ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов», который распространяется на производственные и бытовые электроустановки постоянного и переменных токов частотой 50 и 400 Гц и устанавливает нормы предельно допустимых для человека значений напряжений прикосновения и токов, протекающих через его тело. Эти нормы предназначены для проектирования способов и средств защиты от поражения током людей при их взаимодействии с электро-

установками. Они соответствуют прохождению тока через тело человека по пути рука-рука или рука-ноги. Стандарт предусматривает нормы для электроустановок при нормальном рабочем режиме их работы (табл. 2), а также при аварийных режимах производственных (табл. 3 и 4) и бытовых (табл. 5) электроустановок.

Таблица 2

Напряжения прикосновения и токи, протекающие через тело человека при нормальном (неаварийном) режиме электроустановки

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

Таблица 3

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

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

Таблица 5

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

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

Экспериментальная часть

Описание лабораторной установки

Устройство для исследования сопротивления тела человека предназначено для определения сопротивления тела человека методом амперметра и вольтметра при различных значениях приложенного напряжения и частоты последнего, а также различной площади контактной поверхности. Внешний вид установки представлен на рисунке 10, эквивалентная электрическая схема — на рисунке 11.

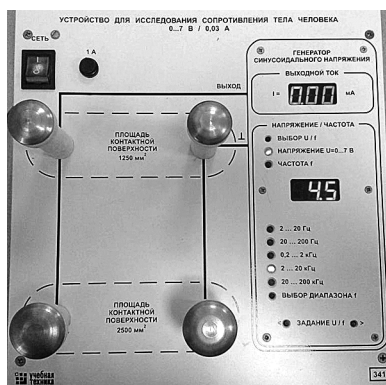


Рис. 10. Внешний вид установки

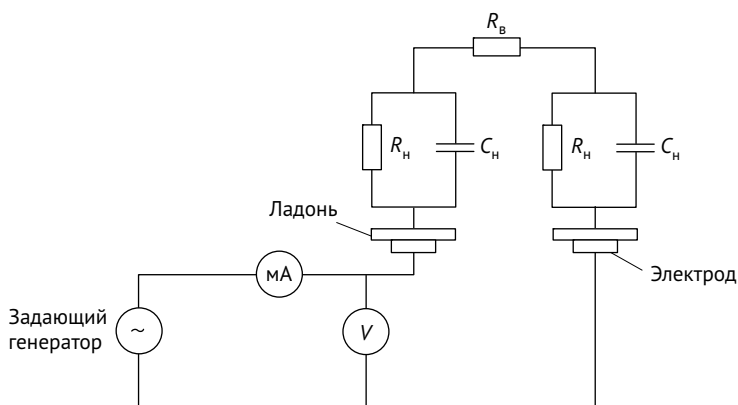


Рис. 11. Эквивалентная электрическая схема испытаний

Порядок выполнения работы

Работа осуществляется в следующей последовательности:

1. Подключите с помощью сетевого шнура устройство для исследования сопротивления тела человека к электрической сети 220 В и включите на его лицевой панели выключатель «Сеть».

2. Оперируя кнопками на поле «Генератор синусоидального напряжения» по индикатору, выставьте требуемые напряжение U и его частоту f и снимите зависимость $I_h = F(f)$:

2.1. Приложите ладони рук порознь к двум электродам с площадью контактной поверхности $S_1 = 1250 \text{ мм}^2$ и с индикатора считайте величину тока I_h , протекающего через тело человека;

2.2. Приложите ладони рук порознь к двум электродам с площадью контактной поверхности $S_2 = 2500 \text{ мм}^2$ и с индикатора считайте величину тока I_h , протекающего через тело человека;

2.3. Изменяя частоту f , повторите измерения (2.1–2.2);

2.4. Результаты измерений запишите в таблицу 6.

3. Рассчитайте электрическое сопротивление тела человека $Z_h = U/I_h$ и сделайте вывод о влиянии на него площади контактной поверхности.

4. По завершении эксперимента отключите питание устройства для исследования сопротивления тела человека.

5. По результатам измерений постройте график зависимости сопротивления тела человека от логарифма частоты.

6. Сделайте вывод.

Таблица 6

Результаты измерения
электрического сопротивления тела человека

Возраст:		Пол:		Вес:		
Частота		$U, В$	$S_1 = 1250 \text{ мм}^2$		$S_2 = 2500 \text{ мм}^2$	
$f, Гц$	$\lg f$		$I, \text{мА}$	$Z_h, \text{кОм}$	$I, \text{мА}$	$Z_h, \text{кОм}$
2	0,3					
10	1					
20	1,30					
30	1,48					
40	1,60					
50	1,70					
70	1,85					
100	2,00					
300	2,48					
500	2,70					
700	2,84					
1000	3,00					
2000	3,48					
5000	3,70					
7000	3,85					
10000	4,00					
20000	4,30					

Контрольные вопросы

1. Основные виды поражений электрическим током.
2. Особенности действия тока на живую ткань.
3. Живая ткань как проводник электрического тока.
4. Пороговые значения ощутимого, неотпускающего, фибрилляционного токов.
5. Путь протекания электрического тока через тело человека.
6. Зависимость сопротивления тела человека от состояния кожи.
7. Зависимость сопротивления тела человека от параметров электрической цепи.
8. Влияние индивидуальных свойств человека на исход поражения электрическим током.
9. Основные критерии безопасности электрического тока.

Библиографический список

1. ГОСТ 12.1.038–82. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов. Система стандартов безопасности труда. — М. : ИПК Издательство стандартов, 2001.
2. Долин П. А. Основы техники безопасности в электроустановках / П. А. Долин. — М. : Энергоавтомиздат, 1984.
3. Иванов Е. А. Безопасность электроустановок и систем автоматики : учеб. пособие для вузов / Е. А. Иванов, В. Л. Галка, К. Р. Малаян. — СПб. : Элмор, 2003.
4. Кузнецов К. Б. Электробезопасность в электроустановках железнодорожного транспорта / К. Б. Кузнецов, А. С. Мишарин; под ред. К. Б. Кузнецова. — М. : Маршрут, 2005.

Учебное издание

Гимаев Сергей Рафаилович
Гаврилин Игорь Игоревич

**Исследование
электрического
сопротивления
тела человека**

Методические указания
к выполнению лабораторных работ
по дисциплине «Безопасность жизнедеятельности»
для студентов всех специальностей
всех форм обучения

Редактор Н. А. Попова
Верстка – А. В. Трубин

Подписано в печать 25.11.2014. Формат 60x84/16.
Усл. печ. л. 1,6. Тираж 50 экз. Заказ 208.

Издательство УрГУПС
620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66