ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р 70646.1— 2023

ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА НА ЛЮДЕЙ И ДОМАШНИХ ЖИВОТНЫХ

Часть 1

Общие аспекты

(IEC 60479-1:2018, NEQ)

Издание официальное

Москва
Российский институт стандартизации
2023

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 РАЗРАБОТАН Обществом с ограниченной ответственностью «НПФ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА: НАУКА И ПРАКТИКА» (ООО «НПФ ЭЛНАП») и Обществом с ограниченной ответственностью «Ресурсосберегающие Специальные Технологии и Системы» (ООО «РСТС»)

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 336 «Заземлители и заземляющие устройства различного назначения»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 16 июня 2023 г. № 403-ст

4 Настоящий стандарт разработан с учетом основных нормативных положений международного стандарта МЭК 60479-1:2018 «Воздействие электрического тока на людей и домашних животных. Часть 1. Общие аспекты» (IEC 60479-1:2018 «Effects of current on human beings and livestock — Part 1: General aspects», NEQ)

5 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

*Правила применения настоящего стандарта установлены в статье 26 Федерального закона от 29 июня 2015 г. № 162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации». Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодном (по состоянию на 1 января текущего года) информационном указателе «Национальные стандарты», а официальный текст изменений и поправок — в ежемесячном информационном указателе «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ближайшем выпуске ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты». Соответствующая информация, уведомление и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет (*gost.e-ecolog.ru

© Оформление. ФГБУ «Институт стандартизации», 2023

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

Содержание

1 Область применения 1
2 Нормативные ссылки 1
3 Термины и определения 2
4 Сокращения 3
5 Общие требования 4
5.1 Полное электрическое сопротивление тела человека и домашних животных 4
5.2 Внутреннее полное сопротивление тела человека Z_i 4
5.3 Полное сопротивление кожи Z_S 4
5.4 Общее полное сопротивление тела человека Z_T 5
5.5 Факторы, определяющие начальное активное сопротивление тела человека R_0 5
5.6 Значения общего полного сопротивления тела человека Z_T 5
5.7 Значение начального активного сопротивления тела человека R_0 12
5.8 Характеристики полного сопротивления тела домашних животных 12
6 Воздействие синусоидальных переменных токов в диапазоне частот от 15 до 100 Гц 12
6.1 Общие положения 12
6.2 Порог чувствительности 12
6.3 Порог реакции 12
6.4 Сковывание мышц 13
6.5 Порог отпускания 13
6.6 Порог фибрилляции желудочков 13
6.7 Прочие виды воздействий, связанные с поражением электрическим током 13
6.8 Воздействие электрического тока на кожу 14
6.9 Описание времятоковых областей 14
6.10 Применение коэффициента сердечного тока F 15
7 Воздействие постоянного тока 16
7.1 Общие положения 16
7.2 Порог чувствительности и порог реакции 16
7.3 Порог сковывания мышц и порог отпускания 16
7.4 Порог фибрилляции желудочков 16
7.5 Прочие виды воздействий, связанные с поражением электрическим током 17
7.6 Описание времятоковых областей 17
7.7 Коэффициент сердечного тока 17
7.8 Сравнение воздействия анодного и катодного постоянных токов 18
Приложение А (обязательное) Графический материал 19
Приложение Б (справочное) Методы моделирования и схемы замещения при расчетах поражения электрическим током 38
Приложение В (обязательное) Измерения общего полного сопротивления тела Z_T на живых людях и трупах и статистический анализ результатов 41
Приложение Г (обязательное) Зависимость общего полного сопротивления тела Z_T от частоты 44
Приложение Д (обязательное) Общее активное сопротивление тела R_T на постоянном токе 45
Приложение Е (обязательное) Воздействие тока при его протекании по телу домашних животных . . . 46
Приложение Ж (справочное) Численные значения верхней границы уязвимости и нижней границы уязвимости 52
Приложение И (справочное) Причины возникновения фибрилляции желудочков 53
Приложение К (справочное) Примеры расчетов Z_T 54
Библиография 57

Введение

Настоящий стандарт является первой частью серии стандартов под общим наименованием «Воздействие электрического тока на людей и домашних животных». В данной части стандарта рассмотрены основные вопросы влияния на тело человека и домашних животных протекающего по нему электрического тока.

При заданном пути протекания тока по телу человека опасность для него зависит, главным образом, от силы тока и длительности его протекания. Однако, времятоковые характеристики во многих случаях не могут быть применены для разработки мероприятий по защите от поражения электрическим током напрямую. Необходимым параметром для этой цели является зависимость допустимого уровня напряжения прикосновения (т. е. произведение тока через тело, называемого током прикосновения, и полного электрического сопротивления тела) от времени. Необходимо знать зависимость между током и напряжением, которая нелинейна, так как полное сопротивление тела человека зависит от приложенного напряжения прикосновения. Различные части человеческого тела (кожа, кровь, мышцы, другие ткани и суставы) составляют суммарное полное электрическое сопротивление, состоящее из активной и емкостной составляющих.

Значение полного сопротивления тела человека зависит от ряда факторов, в частности, от пути протекания тока, значения напряжения прикосновения, длительности протекания тока, частоты тока, степени увлажнения кожи, площади контакта с электрической цепью, силы прижатия к электроду и температуры.

Значения полного сопротивления, приведенные в настоящем стандарте, получены в результате экспериментальных измерений, главным образом, на трупах, а также на небольшом количестве живых людей.

Сведения о воздействии переменного тока базируются, главным образом, на исследованиях воздействия переменного тока частотой 50/60 Гц, наиболее распространенного в электроустановках. Приведенные в стандарте значения считают действительными для диапазона частот от 15 до 100 Гц, при этом пороговые значения на границах этого диапазона выше, чем на частоте 50—60 Гц. Основной причиной летального исхода при несчастных случаях в электроустановках считают фибрилляцию желудочков.

Несчастные случаи на постоянном токе случаются гораздо реже, чем этого можно было бы ожидать, исходя из количества установок с постоянным током, и несчастные случаи с летальным исходом происходят в них только при очень неблагоприятных условиях, например в шахтах. Частично это вызвано тем, что на постоянном токе усилие отпускания ниже и тем, что для времени воздействия более периода сердечного цикла порог фибрилляции желудочков существенно выше, чем на переменном токе.

В настоящем стандарте приведены пороговые значения токов, которые можно применять в отношении лиц, находящихся в нормальном физиологическом состоянии, включая детей независимо от их возраста и веса.

Следует принимать во внимание такие вопросы, как вероятность повреждения изоляции, вероятность прямого прикосновения к токоведущим частям или косвенного прикосновения к проводящим частям, соотношение между напряжением прикосновения и напряжением при повреждении изоляции, имеющийся опыт, техническая осуществимость и экономическая целесообразность. Эти параметры необходимо учитывать при разработке требований по безопасности, например при определении рабочих характеристик защитных устройств для электроустановок.

В настоящем стандарте приведены результаты исследований, которые использованы в качестве основы для разработки требований к защите от поражения электрическим током.

В настоящем стандарте определены пороги фибрилляции желудочков, которые являются основной причиной летального исхода от поражения электрическим током. Результаты последних исследований физиологии сердца и порогов фибрилляции сделали возможным выполнение уточненной оценки влияния основных физических параметров и, в особенности, длительности протекания тока.

Приведенные в стандарте сведения, главным образом, основаны на экспериментах с животными и на информации, полученной при клинических наблюдениях. Лишь единичные эксперименты с токами малой длительности были проведены на живых людях.

В настоящем стандарте также учтен опыт отечественных исследований в области воздействия электрического тока на человека при разрабке нормативных документов по охране труда [1], [2].

Целью разработки настоящего стандарта является обеспечение защиты людей и домашних животных от поражения электрическим током. Требования стандарта необходимо учитывать при определении предельно допустимых значений напряжения и тока прикосновения и шага, а также при выборе мер защиты людей и домашних животных от поражения электрическим током.

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА НА ЛЮДЕЙ И ДОМАШНИХ ЖИВОТНЫХ

Часть 1

Общие аспекты

Effects of current on human beings and livestock. Part 1. General aspects

Дата введения — 2023—08—01

1 Область применения

Настоящий стандарт устанавливает общие аспекты в области воздействия на человека и домашних животных протекающих по ним постоянного или переменного синусоидального токов в диапазоне частот от 15 до 100 Гц.

Настоящий стандарт может быть применен для определения пороговых значений напряжений прикосновения и шага на переменном и постоянном токах в зависимости от пути протекания тока через тело, площади контакта электрода с кожей, влажности места контакта.

Настоящий стандарт содержит характеристики электрического сопротивления тела человека и домашних животных и факторы, влияющие на его значение.

Требования стандарта необходимо учитывать при определении предельно допустимых значений напряжения и тока прикосновения и шага, а также при выборе мер защиты людей и животных от поражения электрическим током.

Настоящий стандарт предназначен для применения при разработке стандартов по безопасности в соответствии с положениями ГОСТ IEC Guide 104 (см. также [3]).

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ IEC Guide 104 Подготовка публикаций по безопасности и использование основополагающих и групповых публикаций по безопасности

ГОСТ Р 70646.2—2023 Воздействие электрического тока на людей и домашних животных. Часть 2. Специальные аспекты

ГОСТ Р МЭК 60601-1 Изделия медицинские электрические. Часть 1. Общие требования безопасности с учетом основных функциональных характеристик

ГОСТ Р МЭК 60990 Методы измерения тока прикосновения и тока защитного проводника

Примечание — При пользовании настоящим стандартом целесообразно проверить действие ссылочных стандартов в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет или по ежегодному информационному указателю «Национальные стандарты», который опубликован по состоянию на 1 января текущего года, и по выпускам ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты» за текущий год. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана недатированная ссылка, то рекомендуется использовать действующую версию этого стандарта с учетом всех внесенных в данную версию изменений. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, то рекомендуется использовать версию этого стандарта с указанным выше годом утверждения (принятия). Если после утверждения настоящего стандарта в ссылочный стандарт, на который дана

Издание официальное

датированная ссылка, внесено изменение, затрагивающее положение, на которое дана ссылка, то это положение рекомендуется применять без учета данного изменения. Если ссылочный стандарт отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, рекомендуется применять в части, не затрагивающей эту ссылку.

3 Термины и определения

В настоящем стандарте применены следующие термины с соответствующими определениями:

3.1 Общие термины

3.1.1 **продольный ток** (longitudinal current): Ток, протекающий вдоль туловища человека, например от руки к ноге.

3.1.2 **поперечный ток** (transverse current): Ток, протекающий поперек туловища человека, например от руки к руке.

3.1.3 **внутреннее полное сопротивление тела человека Z_i** (internal impedance of the human body, Z_i): Полное электрическое сопротивление между двумя электродами, находящимися в контакте с телом человека, за вычетом сопротивления кожи.

Примечание — При определении внутреннего сопротивления тела домашнего животного сопротивление копыт, при их наличии, также не учитывают.

3.1.4 **полное сопротивление кожи Z_S** (impedance of the skin, Z_S): Полное электрическое сопротивление между электродом на коже и проводящими тканями, расположенными под кожей.

3.1.5 **общее полное сопротивление тела человека Z_T** (total impedance of the human body, Z_T): Сумма внутреннего полного сопротивления тела человека и полного сопротивления кожи в комплексном виде.

Примечание — При определении внутреннего сопротивления тела домашнего животного сопротивление Z_T представляет собой векторную сумму внутреннего полного сопротивления и полных сопротивлений шкуры, кожи и копыт, при их наличии.

3.1.6 **полное сопротивление шкуры и кожи Z_P** (impedance of the hide and skin, Z_P): Полное электрическое сопротивление между электродом на шкуре и/или коже и проводящими тканями, расположенными под кожей.

3.1.7 **полное сопротивление копыта Z_h** (impedance of the hoof, Z_h): Полное электрическое сопротивление между электродом под копытом и проводящими тканями, расположенными над ним.

3.1.8 **начальное активное сопротивление тела человека R_0** (initial resistance of the human body, R_0): Активное электрическое сопротивление, определяющее амплитудное значение тока в момент начала воздействия напряжения прикосновения.

Примечание — Для тела домашнего животного активным сопротивлением шкуры, при ее наличии, пренебрегают, а активное сопротивление копыт, при их наличии, учитывают.

3.1.9 **сухие условия** (dry condition): Состояние влажности поверхности контактного участка кожи человека, находящегося в покое в помещении при нормальных условиях.

3.1.10 **влажные условия** (water-wet condition): Состояние поверхности контактного участка кожи человека, подвергнутого действию воды из источника коммунального водоснабжения (среднее удельное электрическое сопротивление ρ = 3500 Ом·см, pH = 7—9) в течение 1 мин.

3.1.11 **условия увлажнения соленой водой** (saltwater-wet condition): Состояние поверхности контактного участка кожи человека, подвергнутого действию 3 % водного раствора хлорида натрия (среднее удельное электрическое сопротивление ρ = 30 Ом·см, pH = 7—9) в течение 1 мин.

Примечание — Данные условия служат для моделирования кожи вспотевшего человека или человека, после погружения в морскую воду. Необходимы дополнительные исследования.

3.1.12 **коэффициент отклонения F_D** (deviation factor, F_D): Общее полное сопротивление тела человека Z_T для заданного значения процентильного ранга населения, деленное на общее полное сопротивление тела человека Z_T. Для процентильного ранга населения, равного 50 %, при заданном напряжении прикосновения

$$F_D(X\ \%, U_T) = \frac{Z_T(X\ \%,\ U_T)}{Z_T(50\ \%,\ U_T)}. \quad (1)$$

3.2 Воздействие синусоидальных переменных токов частотой от 15 до 100 Гц

3.2.1 **порог чувствительности** (threshold of perception): Минимальное значение тока прикосновения, вызывающее у человека, через тело которого он протекает, любое ощущение.

3.2.2 **порог реакции** (threshold of reaction): Минимальное значение тока прикосновения, вызывающее непроизвольные мышечные сокращения.

3.2.3 **порог отпускания** (threshold of let-go): Максимальное значение тока прикосновения, при протекании которого человек, держащийся за электроды, способен их отпустить.

3.2.4 **порог сковывания мышц** (threshold of immobilization): Минимальное значение тока прикосновения, протекающего через тело человека или домашнего животного (или его часть), при котором возникает мышечная реакция, не позволяющая человеку или животному совершать произвольные движения в течение всего времени протекания тока.

3.2.5 **порог фибрилляции желудочков** (threshold of ventricular fibrillation): Минимальное значение тока прикосновения, протекающего через тело человека или домашнего животного (или его часть), при котором возникает фибрилляция желудочков сердца.

Примечание — Фибрилляция желудочков — это ненормальный сердечный ритм, при котором происходит непоследовательное, хаотическое возбуждение и сокращение отдельных желудочковых волокон.

3.2.6 **коэффициент сердечного тока *F*** (heart-current factor, *F*): Отношение напряженности электрического поля (плотности тока) в сердце при заданном пути протекания тока по телу к напряженности электрического поля (плотности тока) в сердце для тока прикосновения того же значения, протекающего от кисти левой руки к ступням ног.

Примечание — В сердце плотность тока прямо пропорциональна напряженности электрического поля.

3.2.7 **период уязвимости** (vulnerable period): Сравнительно небольшая часть сердечного цикла, в течение которой сердечные мышечные волокна находятся в состоянии неоднородной возбудимости, и при воздействии на них электрического тока достаточной силы происходит фибрилляция желудочков.

Примечание — Период уязвимости соответствует первой части зубца *T* на электрокардиограмме, что составляет приблизительно 10 % длительности сердечного цикла.

3.3 Воздействие постоянного тока

3.3.1 **общее активное сопротивление тела человека R_T** (total body resistance, R_T): Сумма внутреннего активного сопротивления тела человека и активного сопротивления кожи.

3.3.2 **коэффициент эквивалентности постоянного и переменного тока *k*** (direct current/alternating current (DC/AC) equivalence factor, *k*)*:* Отношение значения постоянного тока к действующему значению переменного тока, при которых вероятность возникновения фибрилляции желудочков одинакова.

Примечание — Например, для времени воздействия больше, чем длительность одного сердечного цикла и 50 % вероятности возникновения фибрилляции желудочков коэффициент эквивалентности *k* для 10 с примерно равен:

$$k = \frac{I_{\mathrm{DC-}fibrillation}}{I_{\mathrm{AC-}fibrillation}} = \frac{300}{80} = 3{,}75. \qquad (2)$$

3.3.3 **восходящий ток** (upward current): Постоянный ток прикосновения, протекающий по телу человека в случаях, когда ступни ног находятся под положительным потенциалом.

3.3.4 **нисходящий ток** (downward current): Постоянный ток прикосновения, протекающий по телу человека в случаях, когда ступни ног находятся под отрицательным потенциалом.

4 Сокращения

В настоящем стандарте применены следующие сокращения:

ВГУ — верхняя граница уязвимости;

НГУ — нижняя граница уязвимости;

РВА — реакция на включение анодного тока;

РВК — реакция на включение катодного тока;

РОА — реакция на отключение анодного тока;

РОК — реакция на отключение катодного тока;

ФЖ — фибрилляция желудочков;

ЭКГ — электрокардиограмма;

АС — переменный ток;

DC — постоянный ток.

5 Общие требования

5.1 Полное электрическое сопротивление тела человека и домашних животных

5.1.1 Общие положения

Значение полного сопротивления тела зависит от ряда факторов, в частности, от пути протекания тока, значения напряжения прикосновения, длительности протекания тока, частоты тока, степени увлажнения кожи, площади контакта с электрической цепью, силы прижатия в месте контакта и температуры.

Принципиальная электрическая схема полного сопротивления тела человека приведена на рисунке А.1.

Примечание — Электрическая схема замещения тела человека приведена в приложении Б.

5.2 Внутреннее полное сопротивление тела человека Z_i

Внутреннее полное сопротивление тела человека имеет практически только резистивную составляющую. Его значение зависит, в первую очередь, от пути протекания тока по телу и, в меньшей степени, от площади контакта с электрической цепью.

Примечание — Измерения показывают, что имеется небольшая емкостная составляющая (см. пунктирную линию на рисунке А.1).

На рисунке А.2 приведены значения внутреннего полного сопротивления тела человека для различных частей тела, выраженные в процентах от сопротивления для пути протекания тока от кисти руки к ступне ноги.

Для путей протекания тока между кистями рук или от кисти руки до ступней ног основные составляющие полного сопротивления дают конечности (руки и ноги). Пренебрегая сопротивлением туловища, получают упрощенную принципиальную схему, которая показана на рисунке А.3.

Примечание — Для упрощения принципиальной схемы предполагают, что полные сопротивления рук и ног равны.

5.3 Полное сопротивление кожи Z_S

Внутреннее полное сопротивление кожи можно представить как сеть резисторов и конденсаторов. Она состоит из полупроводящего слоя и маленьких проводящих элементов (пор). Полное сопротивление кожи уменьшается с ростом силы тока. Иногда можно наблюдать отметки от тока (см. 5.7).

Значение полного сопротивления зависит от напряжения, частоты, длительности протекания тока, площади контакта с электрической цепью, силы прижатия в месте контакта, влажности кожи, температуры и типа кожи.

При небольших значениях напряжения прикосновения значения полного сопротивления кожи изменяется в широких пределах даже у одного человека в зависимости от площади контакта с электрической цепью, условий в месте контакта (сухо, влажно, имеется пот), температуры, частоты дыхания и т. п. При более высоких значениях напряжения прикосновения значение полного сопротивления кожи существенно уменьшается и становится пренебрежимо малым при ее электрическом пробое.

С увеличением частоты тока полное сопротивление кожи уменьшается.

5.4 Общее полное сопротивление тела человека Z_T

Общее полное сопротивление тела человека включает в себя активную и емкостную составляющие.

При небольших значениях напряжения прикосновения существенно меняется полное сопротивление кожи Z_S и, вследствие этого, значение общего полного сопротивления тела Z_T меняется в широких пределах. При более высоких значения напряжения прикосновения общее полное сопротивление все менее зависит от сопротивления кожи и его значение стремится к значению внутреннего полного сопротивления Z_i (см. рисунки А.4—А.9).

Учитывая зависимость полного сопротивления кожи от частоты, значение общего полного сопротивления тела человека на постоянном токе наибольшее и снижается с увеличением частоты.

5.5 Факторы, определяющие начальное активное сопротивление тела человека R_0

В начальный момент приложения напряжения прикосновения емкостные составляющие сопротивления тела человека не заряжены. По этой причине полные сопротивления кожи Z_{S1} и Z_{S2} пренебрежимо малы и начальное активное сопротивление R_0 примерно равно внутреннему полному сопротивления тела человека Z_i (см. рисунок А.1). Начальное активное сопротивление R_0 зависит, в основном, от пути протекания тока и, в меньше степени, от площади контакта с электрической цепью.

Начальное активное сопротивление R_0 определяет амплитуду тока коротких импульсов (например, удар током от электроограждения).

5.6 Значения общего полного сопротивления тела человека Z_T

5.6.1 Значения общего полного сопротивления тела человека при большой, средней и маленькой площадях контакта с электрической цепью

На рисунках А.7—А.9 показана зависимость общего полного сопротивления тела Z_T на переменном токе при изменении напряжения прикосновения U_T в диапазоне от 25 до 200 В для процентильного ранга населения, равного 50 %, при большой, средней и маленькой площадях контакта с электрической цепью (значения площади составляют примерно 10 000, 1000, 100 мм^2 соответственно) в сухих, влажных условиях, условиях увлажнения соленой водой.

5.6.2 Синусоидальные переменные токи частотой 50/60 Гц при большой площади контакта с электрической цепью

В таблицах 1—3 приведены значения общего полного сопротивления тела человека для пути протекания тока от кисти одной руки до кисти другой руки при большой (приблизительно 10 000 мм^2) площади контакта с электрической цепью в сухих условиях (см. таблицу 1), во влажных условиях (см. таблицу 2) и в условиях увлажнения соленой водой (см. таблицу 3).

На рисунке А.4 приведены значения общего полного сопротивления тела для значений напряжения прикосновения от 25 до 700 В при большой площади контакта с электрической цепью в сухих, влажных условиях и условиях увлажнения соленой водой для процентильного ранга населения, равного 50 %.

В таблицах 1—3 приведены результаты последних исследований в отношении общего полного сопротивления Z_T тела взрослых. В настоящее время считают, что общее полное сопротивление Z_T тела детей несколько превосходит эти значения, но находится примерно на том же уровне.

Таблица 1 — Общее полное сопротивление тела человека Z_T для пути протекания переменного тока частотой 50/60 Гц между кистями рук при большой площади контакта с электрической цепью в сухих условиях

Напряжение прикосновения, В	Значения общего полного сопротивления тела Z_T, Ом, не превышаемые для		
	5 % населения	50 % населения	95 % населения
25	1750	3250	6100
50	1375	2500	4600
75	1125	2000	3600
100	990	1725	3125
125	900	1550	2675

Окончание таблицы 1

Напряжение прикосновения, В	Значения общего полного сопротивления тела Z_T, Ом, не превышаемые для		
	5 % населения	50 % населения	95 % населения
150	850	1400	2350
175	825	1325	2175
200	800	1275	2050
225	775	1225	1900
400	700	950	1275
500	625	850	1150
700	575	775	1050
1000	575	775	1050
Предельное значение, равное внутреннему полному сопротивлению	575	775	1050

Примечания

1 Некоторые измерения показывают, что общее полное сопротивление для пути протекания тока от кисти руки до стопы ноги несколько ниже, чем для пути между кистями рук (от 10 % до 30 %).

2 Для живых людей значения Z_T соответствуют длительности протекания тока приблизительно 0,1 с. Для бóльших длительностей протекания тока значения Z_T могут снижаться (от 10 % до 20 %), и после полного пробоя кожи значение Z_T приближается к значению внутреннего полного сопротивления тела Z_i.

3 Для стандартного значения напряжения 230 В (трехфазная система ~230/400 В с нейтралью) можно принять, что значения общего полного сопротивления тела аналогичны сопротивлению при напряжении прикосновения 225 В.

4 Значения Z_T округлены с точностью до 25 Ом.

Таблица 2 — Общее полное сопротивление тела человека Z_T для пути протекания переменного тока частотой 50/60 Гц между кистями рук при большой площади контакта с электрической цепью во влажных условиях

Напряжение прикосновения, В	Значения общего полного сопротивления тела Z_T, Ом, не превышаемые для		
	5 % населения	50 % населения	95 % населения
25	1175	2175	4100
50	1100	2000	3675
75	1025	1825	3275
100	975	1675	2950
125	900	1550	2675
150	850	1400	2350
175	825	1325	2175
200	800	1275	2050
225	775	1225	1900
400	700	950	1275
500	625	850	1150
700	575	775	1050
1000	575	775	1050
Предельное значение, равное внутреннему полному сопротивлению	575	775	1050

Окончание таблицы 2

Примечания

1 Некоторые измерения показывают, что общее полное сопротивление для пути протекания тока от кисти руки до стопы ноги несколько ниже, чем для пути между кистями рук (от 10 % до 30 %).

2 Для живых людей значения Z_T соответствуют длительности протекания тока приблизительно 0,1 с. Для бóльших длительностей протекания тока значения Z_T могут снижаться (от 10 % до 20 %), и после полного пробоя кожи значение Z_T приближается к значению внутреннего полного сопротивления тела Z_i.

3 Для стандартного значения напряжения 230 В (трехфазная система ~230/400 В с нейтралью) можно принять, что значения общего полного сопротивления тела аналогичны сопротивлению при напряжении прикосновения 225 В.

4 Значения Z_T округлены с точностью до 25 Ом.

Таблица 3 — Общее полное сопротивление тела человека Z_T для пути протекания переменного тока частотой 50/60 Гц между кистями рук при большой площади контакта с электрической цепью в условиях увлажнения соленой водой

Напряжение прикосновения, В	Значения общего полного сопротивления тела Z_T, Ом, не превышаемые для		
	5 % населения	50 % населения	95 % населения
25	960	1300	1755
50	940	1275	1720
75	920	1250	1685
100	880	1225	1655
125	850	1200	1620
150	830	1180	1590
175	810	1155	1560
200	790	1135	1530
225	770	1115	1505
400	700	950	1275
500	625	850	1150
700	575	775	1050
1000	575	775	1050
Предельное значение, равное внутреннему полному сопротивлению	575	775	1050

Примечания

1 Некоторые измерения показывают, что общее полное сопротивление для пути протекания тока от кисти руки до стопы ноги несколько ниже, чем для пути между кистями рук (от 10 % до 30 %).

2 Вследствие низкого сопротивления кожи в данном случае можно принять, что значение Z_T мало зависит от длительности протекания тока; значение Z_T близко к значению внутреннего полного сопротивления тела Z_i.

3 Для стандартного значения напряжения 230 В (трехфазная система ~230/400 В с нейтралью) можно принять, что значения общего полного сопротивления тела аналогичны сопротивлению при напряжении прикосновения 225 В.

4 Значения Z_T округлены с точностью до 25 Ом.

Значения в таблицах 1— 3 получены в результате измерений, выполненных на трупах и на живых людях (взрослые, мужчины и женщины), как указано в приложении В.

При напряжениях выше 125 В для влажных условий и выше 400 В для условий увлажнения соленой водой значения общего полного сопротивления тела такие же, как и для сухих условий (см. рисунок А.4).

5.6.3 Синусоидальные переменные токи частотой 50/60 Гц при средней и маленькой площадях контакта с электрической цепью

Значения внутреннего полного сопротивления Z_i и начального активного сопротивления тела R_0 (см. 5.5) очень слабо зависят от площади поверхности, контактирующей с электрической цепью.

Однако, если площадь контакта очень мала, порядка единиц квадратных миллиметров, эти значения возрастают.

После пробоя кожи (при напряжении прикосновения более 100 В и бóльших длительностях протекания тока) значение общего полного сопротивления тела Z_T становится близким к значению внутреннего полного сопротивления тела Z_i и, поэтому, мало зависит от площади и влажности места контакта с электрической цепью.

В приложении В описаны эксперименты по определению зависимостей общего полного сопротивления тела Z_T от площади контакта для переменного тока частотой 50 Гц в сухих, влажных условиях и условиях увлажнения соленой водой, проведенные на живых людях, для напряжений прикосновения от 25 до 200 В.

Примечание — Экспериментальные зависимости значений Z_T от площади контакта для напряжений прикосновения более 200 В отсутствуют для любых условий в месте контакта как для живых людей, так и для трупов.

На рисунке А.5 приведена зависимость общего полного сопротивления тела Z_T для пути протекания тока между кистями рук от площади контакта (от 1 мм^2 до примерно 8000 мм^2) в сухих условиях для напряжений прикосновения от 25 до 200 В на переменном токе частотой 50 Гц, полученная при измерениях на одном человеке. При напряжениях прикосновения менее 100 В и малых площадях контакта порядка единиц квадратных миллиметров отклонения в результатах измерений могут составлять до плюс 50 % среднего значения, в зависимости от температуры, давления, положения ладони и т. п.

На рисунке А.6 приведена зависимость общего полного сопротивления тела Z_T, измеренного между кончиками указательных пальцев левой и правой рук (площадь контакта составляет приблизительно 1250 мм^2), от напряжения прикосновения в диапазоне от 25 до 200 В на частоте 50/60 Гц.

По рисунку А.6 можно определить, что полное сопротивление указательного пальца (компонент общего полного сопротивления) при напряжении прикосновения 200 В составляет приблизительно 1000 Ом.

Измерения общего полного сопротивления тела Z_T, результаты которых представлены на рисунках А.5 и А.6, выполнены на одном живом человеке.

На основе имеющихся в настоящее время результатах исследований ниже приведены данные об общем полном сопротивлении тела Z_T для больших, средних и маленьких площадей контакта с электрической цепью (приблизительно 10 000, 1000 и 100 мм^2 соответственно) для сухих, влажных условий и условий увлажнения соленой водой для процентильных рангов населения равных 5 %, 50 % и 95 %.

Для большой площади контакта с электрической цепью значения представлены в таблицах 1— 3, при этом рассмотрены значения напряжений прикосновения от 25 до 1000 В на переменном токе частотой 50/60 Гц для сухих, влажных условий и условий увлажнения соленой водой.

Для средней площади контакта с электрической цепью значения представлены в таблицах 4—6, при этом рассмотрены значения напряжений прикосновения от 25 до 200 В на переменном токе частотой 50/60 Гц для сухих, влажных условий и условий увлажнения соленой водой.

Для маленькой площади контакта с электрической цепью значения представлены в таблицах 7—9, при этом рассмотрены значения напряжений прикосновения от 25 до 200 В на переменном токе частотой 50/60 Гц для сухих, влажных условий и условий увлажнения соленой водой.

Таблица 4 — Общее полное сопротивление тела человека Z_T для пути протекания переменного тока частотой 50/60 Гц между кистями рук при средней площади контакта с электрической цепью в сухих условиях в диапазоне напряжений прикосновения от 25 до 200 В (значения округлены с точностью до 25 Ом)

Напряжение прикосновения, В	Значения общего полного сопротивления тела Z_T, Ом, не превышаемые для		
	5 % населения	50 % населения	95 % населения
25	11 125	20 600	38 725
50	7150	13 000	23 925
75	4625	8200	14 750
100	3000	5200	9150
125	2350	4000	6875
150	1800	3000	5050
175	1550	2500	4125
200	1375	2200	3525

Таблица 5 — Общее полное сопротивление тела человека Z_T для пути протекания переменного тока частотой 50/60 Гц между кистями рук при средней площади контакта с электрической цепью во влажных условиях в диапазоне напряжений прикосновения от 25 до 200 В (значения округлены с точностью до 25 Ом)

Напряжение прикосновения, В	Значения общего полного сопротивления тела Z_T, Ом, не превышаемые для		
	5 % населения	50 % населения	95 % населения
25	5050	9350	17 575
50	4100	7450	13 700
75	3400	6000	10 800
100	2800	4850	8525
125	2350	4000	6875
150	1800	3000	5050
175	1550	2500	4125
200	1375	2200	3525

Таблица 6 — Общее полное сопротивление тела человека Z_T для пути протекания переменного тока частотой 50/60 Гц между кистями рук при средней площади контакта с электрической цепью в условиях увлажнения соленой водой в диапазоне напряжений прикосновения от 25 до 200 В (значения округлены с точностью до 5 Ом)

Напряжение прикосновения, В	Значения общего полного сопротивления тела Z_T, Ом, не превышаемые для		
	5 % населения	50 % населения	95 % населения
25	1795	2425	3275
50	1765	2390	3225
75	1740	2350	3175
100	1715	2315	3125
125	1685	2280	3075
150	1660	2245	3030
175	1525	2210	2985
200	1350	2175	2935

Таблица 7 — Общее полное сопротивление тела человека Z_T для пути протекания переменного тока частотой 50/60 Гц между кистями рук при маленькой площади контакта с электрической цепью в сухих условиях в диапазоне напряжений прикосновения от 25 до 200 В (значения округлены с точностью до 25 Ом)

Напряжение прикосновения, В	Значения общего полного сопротивления тела Z_T, Ом, не превышаемые для		
	5 % населения	50 % населения	95 % населения
25	91 250	169 000	317 725
50	74 800	136 000	250 250
75	42 550	74 000	133 200
100	23 000	40 000	70 400
125	12 875	22 000	37 850
150	7200	12 000	20 225
175	4000	6500	10 725
200	3500	5400	8650

Таблица 8 — Общее полное сопротивление тела человека Z_T для пути протекания переменного тока частотой 50/60 Гц между кистями рук при маленькой площади контакта с электрической цепью во влажных условиях в диапазоне напряжений прикосновения от 25 до 200 В (значения округлены с точностью до 25 Ом)

Напряжение прикосновения, В	Значения общего полного сопротивления тела Z_T, Ом, не превышаемые для		
	5 % населения	50 % населения	95 % населения
25	39 700	73 500	138 175
50	29 800	54 200	99 725
75	22 600	40 000	72 000
100	17 250	30 000	52 800
125	12 875	22 000	37 850
150	7200	12 000	20 225
175	4000	6500	10 725
200	3500	5400	8650

Таблица 9 — Общее полное сопротивление тела человека Z_T для пути протекания переменного тока частотой 50/60 Гц между кистями рук при маленькой площади контакта с электрической цепью в условиях увлажнения соленой водой в диапазоне напряжений прикосновения от 25 до 200 В (значения округлены с точностью до 5 Ом)

Напряжение прикосновения, В	Значения общего полного сопротивления тела Z_T, Ом, не превышаемые для		
	5 % населения	50 % населения	95 % населения
25	5400	7300	9855
50	5105	6900	9315
75	4845	6550	8840
100	4590	6200	8370
125	4330	5850	7900
150	4000	5550	7490
175	3700	5250	7085
200	3400	5000	6750

5.6.4 Синусоидальные переменные токи частотой до 20 кГц и выше

Значения общего полного сопротивления тела, измеренное на частоте 50/60 Гц, на более высоких частотах снижаются вследствие влияния емкостных составляющих сопротивления кожи и приближения, для частот выше 5 кГц, к внутреннему полному сопротивлению Z_i.

Измерения общего полного сопротивления тела на частотах от 25 Гц до 20 кГц для напряжений прикосновения от 10 до 25 В рассмотрены в приложении Г.

На рисунке А.10 показана зависимость общего полного сопротивления тела Z_T от частоты в диапазоне частот от 25 Гц до 20 кГц для пути протекания тока между кистями рук и большой площади контакта с электрической цепью при значении напряжения прикосновения 10 В.

На рисунке А.11 показана зависимость общего полного сопротивления тела Z_T от частоты в диапазоне частот от 25 Гц до 2 кГц для пути протекания тока между кистями рук и большой площади контакта с электрической цепью при значении напряжения прикосновения 25 В. На основе этих данных выведены кривые зависимости общего полного сопротивления тела Z_T населения для процентильного ранга, равного 50 % при значениях напряжения прикосновения от 10 до 1000 В, при изменении частоты от 50 до 150 кГц для путей протекания тока между кистями рук или от кисти руки до стопы ноги, при большой площади контакта с электрической цепью в сухих условиях (см. рисунок А.12).

Примечание — Во влажных условиях или условиях увлажнения соленой водой измерения не проводились.

5.6.5 Постоянный ток

На постоянном токе для значений напряжения прикосновения до 200 В общее полное сопротивление тела Z_T равно общему активному сопротивлению тела R_T и его значение выше, чем на переменном токе, так как емкостная составляющая сопротивления кожи на постоянном токе не учитывается.

В приложении Д указан метод проведения измерений общего полного сопротивления тела на постоянном токе при большой площади контакта с электрической цепью в сухих условиях.

Примечание — Во влажных условиях или условиях увлажнения соленой водой измерения не проводились.

В таблице 10 (см. рисунок А.13, сплошная линия) представлены значения общего активного сопротивления тела R_T на постоянном токе, определенные способом, описанным в приложении Д.

Для больших площадей контакта с электрической цепью во влажных условиях и условиях увлажнения соленой водой общее активное сопротивление тела R_T может быть с достаточной точностью определено по таблицам 2 и 3, пренебрегая при этом небольшими различиями между значениями Z_T на постоянном и переменном токах, которые могут иметь место при напряжениях менее 100 В. Во всех других случаях таблицы с данными на переменном токе могут быть использованы для консервативных оценок значений Z_T на постоянном токе.

Таблица 10 — Общее активное сопротивление тела человека R_T для пути протекания постоянного тока между кистями рук при большой площади контакта с электрической цепью в сухих условиях

Напряжение прикосновения, В	Значения общего полного сопротивления тела Z_T, Ом, не превышаемые для		
	5 % населения	50 % населения	95 % населения
25	2100	3875	7275
50	1600	2900	5325
75	1275	2275	4100
100	1100	1900	3350
125	975	1675	2875
150	875	1475	2475
175	825	1350	2225
200	800	1275	2050
225	775	1225	1900
400	700	950	1275
500	625	850	1150
700	575	775	1050
1000	575	775	1050
Предельное значение	575	775	1050

Окончание таблицы 10

Примечания

1 Некоторые измерения показывают, что общее активное сопротивление R_T для пути протекания тока от кисти руки до стопы ноги несколько ниже, чем для пути между кистями рук (от 10 % до 30 %).

2 Для живых людей значения R_T соответствуют длительности протекания тока приблизительно 0,1 с. Для бóльших длительностей протекания тока значения R_T могут снижаться (от 10 % до 20 %) и после полного пробоя кожи значение R_T приближается к значению начального активного сопротивления тела R_0.

3 Значения R_T округлены с точностью до 25 Ом.

5.7 Значение начального активного сопротивления тела человека R_0

Значение начального активного сопротивления тела человека R_0 для пути протекания тока между кистями рук или от кисти руки до стопы ноги и большой площади контакта с электрической цепью может быть принято равным 500 Ом для процентильного ранга, равного 5 % для переменного и для постоянного токов. Для 50 % и 95 % населения значения могут быть приняты равными 750 и 1000 Ом соответственно (аналогично таблице 1). Значения слабо зависят от площади контакта с электрической цепью и влажности кожи.

Примечание — Значения начального активного сопротивления R_0 несколько ниже, чем предельные значения для общего полного сопротивления тела Z_T на переменном токе частотой 50/60 Гц и общего активного сопротивления тела R_T на постоянном токе, потому что в момент контакта емкости кожи и внутренняя емкость тела не заряжены.

5.8 Характеристики полного сопротивления тела домашних животных

Характеристики полного сопротивления тела домашних животных приведены в приложении Е.

6 Воздействие синусоидальных переменных токов в диапазоне частот от 15 до 100 Гц

6.1 Общие положения

В данном разделе рассмотрено воздействие синусоидального переменного тока частотой от 15 до 100 Гц при его протекании по телу человека.

Примечание — Значения порогов ФЖ для рассматриваемых токов приведены в приложении Ж.

Воздействие синусоидальных переменных токов при их протекании по телу домашних животных рассмотрено в приложении Е.

Примечание — Если не указано иное, далее приведены действующие значения токов.

На рисунке А.15 показаны примеры осциллограмм напряжений и токов прикосновения и их воздействия.

6.2 Порог чувствительности

Порог чувствительности зависит от нескольких параметров, таких как площадь контакта тела с электродом (площадь контакта), условия осуществления контакта (сухой, влажный, давление, температура), а также физиологических характеристик человека.

6.3 Порог реакции

Порог реакции зависит от нескольких параметров, таких как площадь контакта тела с электродом (площадь контакта), условия осуществления контакта (сухой, влажный, давление, температура), а также физиологических характеристик человека.

В настоящем стандарте в качестве порога реакции при прикосновении к проводящей поверхности принято значение 0,5 мА, не зависящее от времени воздействия.

6.4 Сковывание мышц

В настоящем стандарте сковывание означает такую реакцию на протекание электрического тока, при которой тело (или часть тела) человека не может совершать произвольные движения.

Подобная мышечная реакция может быть результатом протекания тока по поражаемым мышцам или относящимся к ним нервам, или относящейся к ним части мозга.

Значения тока, вызывающего сковывание мышц, зависят от размера мышц, типа нерва или части мозга, подверженных воздействию тока.

6.5 Порог отпускания

Порог отпускания зависит от нескольких параметров, таких как площадь контакта тела с электродом, формы и размера электродов, а также физиологических характеристик человека.

В настоящем стандарте для взрослых мужчин принято значение порога отпускания 10 мА.

Также в данном стандарте принято, что значение порога отпускания 5 мА отражает свойства всего населения полностью (дополнительная информация приведена на рисунке А.22).

6.6 Порог фибрилляции желудочков

Порог ФЖ зависит от физиологических характеристик (строение тела, состояние сердца и т. п.), а также от электрических параметров (длительность и путь протекания тока, характеристики тока и т. п.). Описание сердечной деятельности показано на рисунках А.16 и А.17 и в приложении И.

Для синусоидального переменного тока частотой 50/60 Гц происходит заметное снижение порога ФЖ при времени протекании тока более длительности одного сердечного цикла. Причина этого явления состоит в том, что неоднородность возбужденного состояния сердца увеличивается вследствие вызванных током экстрасистол.

Если время воздействия менее 0,1 с, то ФЖ может возникать при токах более 500 мА, а при токах порядка несколько ампер ее возникновение вероятно, только если ток снизится в течение периода уязвимости. При ударах током подобной силы и длительностью более одного периода сердечного цикла может произойти обратимая остановка сердца.

На рисунке А.18 приведены результаты сравнения порогов ФЖ, полученные в результате экспериментов на животных и расчетов на основе статистики несчастных случаев с электричеством для людей в тех случаях, когда длительность протекания тока превышает длительность одного сердечного цикла.

В результате приведения результатов экспериментов на животных к живым людям для пути протекания тока от кисти левой руки до ступней обеих ног была разработана условная эмпирическая кривая c_1 (см. рисунок А.19). Если параметры на графике ниже этой кривой, то ФЖ маловероятна. Высокий уровень для малых длительностей воздействия от 10 до 100 мс был принят в виде снижающейся линии от 500 до 400 мА. На основе сведений по несчастным случаям с электричеством низкий уровень для длительностей воздействия более 1 с был принят в виде снижающейся линии от 50 мА при 1 с до 40 мА при длительностях воздействия более 3 с. Оба эти уровня соединены гладкими кривыми.

На основе статистического анализа результатов экспериментов с животными были разработаны кривые c_2 и c_3 (см. рисунок А.19), которые определяют вероятность фибрилляции примерно 5 % и 50 % соответственно. Кривые c_1, c_2 и c_3 относятся к пути протекания тока от кисти левой руки до ступней обеих ног.

6.7 Прочие виды воздействий, связанные с поражением электрическим током

При протекании электрического тока могут иметь место другие виды реакции, такие как сокращения мышц, повышение кровяного давления, нарушения в формировании и прохождении сердечных импульсов (включая ФЖ предсердий и временные нарушения сердечного ритма). В общем случае, эти реакции не приводят к летальному исходу.

Протекание токов силой несколько ампер в течение более 1 с может вызывать внутренние ожоги и другие внутренние повреждения. Также могут быть видны поверхностные ожоги.

При несчастных случаях на высоких напряжениях ФЖ может не наступать, при этом возникают иные причины остановки сердца. Это подтверждается статистикой несчастных случаев и экспериментами на животных. Однако, в настоящее время данных для определения вероятности этих причин недостаточно.

ФЖ вызывает летальный исход вследствие прекращения циркуляции крови и доставки кислорода с ее помощью. Несчастные случаи с электричеством, при которых ФЖ не происходит, также могут

приводить к летальному исходу. Другие виды воздействий могут влиять на дыхание и вызвать неспособность позвать на помощь. Такие механизмы включают в себя нарушения контроля за дыханием, паралич дыхательной мускулатуры, повреждения нервных проводящих путей дыхательных мышц, повреждение элементов дыхательного центра в мозговом стволе. Если эти воздействия не прекращаются, они неизбежно приводят к летальному исходу. Для избавления человека от обратимых воздействий на дыхательную систему необходимо проведение искусственного дыхания. Тем не менее, летальный исход по-прежнему возможен. Если ток протекает по критически важным частям тела, таким как спинной мозг или дыхательный центр, это может привести к летальному исходу. Эти воздействия исследуются и пороги для них не определены.

Трансмембранные электрические поля большой напряженности могут вызывать повреждение клеток, особенно имеющих узкую вытянутую форму как у мышечных клеток скелетных мышц, но не вследствие термического воздействия. Данное воздействие наблюдалось, например, при протекании по телу кратковременных токов большой силы (как при мгновенном контакте с высоковольтными распределительными линиями электропередач). Большие электрические поля, приложенные к клеточной мембране, могут вызывать образование в ней пор. Данный эффект называют электропорация. Поры могут быть стабильными и в конце концов закрываться или могут расширяться, становиться нестабильными и в дальнейшем приводить к разрыву клеточных мембран. Это наносит непоправимый вред тканям организма. В результате возможно наступление некроза тканей, что часто заканчивается ампутацией поврежденных конечностей. Электропорация не ограничивается каким-либо значением тока или длительностью протекания тока, или конкретным путем протекания тока.

Следует также учитывать неэлектрические повреждения, связанные с поражением электрическим током, например травмы.

6.8 Воздействие электрического тока на кожу

На рисунке А.14 показаны зависимости изменения внешнего вида человеческой кожи от плотности тока i_T в мА/мм^2 и длительности его протекания.

Могут быть приведены следующие основные граничные значения:

- для плотностей тока менее 10 мА/мм^2, как правило, изменений не наблюдают. При значительном времени протекания тока (несколько секунд) кожа под электродом может становиться сероватобелой с шероховатой поверхностью;
- при плотностях тока от 10 до 20 мА/мм^2 появляется покраснение кожи с побелением и набуханием ее у краев электрода (зона 1);
- при плотностях тока от 20 до 50 мА/мм^2 кожа под электродом и около него становится коричневатой. При длительности протекания тока в несколько десятков секунд наблюдают волдыри вокруг электродов (зона 2);
- при плотностях тока более 50 мА/мм^2 может возникать обугливание (зона 3);
- если площадь контакта с электродом большая, плотности тока могут не достигать значений, при которых возникают изменения на коже, несмотря на смертельно опасный уровень силы тока.

6.9 Описание времятоковых областей

В таблице 11 даны границы времятоковых областей для различных физиологических реакций при протекании тока от кисти руки до ступней ног.

Таблица 11 — Границы времятоковых областей для переменного тока частотой от 15 до 100 Гц, протекающего от кисти руки до ступней ног

Область	Границы	Физиологические реакции
АС-1	До 0,5 мА на кривой *a*	Возможны какие-либо ощущения, но без реакции «испуг»
АС-2	От 0,5 мА до кривой *b*	Вероятны ощущения и непроизвольные сокращения мышц, но, как правило, без вредных физиологических воздействий
АС-3	Кривая *b* и выше	Сильные непроизвольные мышечные сокращения. Сложности с дыханием. Обратимые нарушения функции сердца. Может иметь место сковывание мышц. Влияние растет с увеличением силы тока. Как правило, не происходит внутренних повреждений

Окончание таблицы 11

Область	Границы	Физиологические реакции
АС-4*	Выше кривой c_1	Могут иметь место патофизиологические воздействия, такие как остановка сердца, остановка дыхания, ожоги и другие повреждения клеток. Вероятность возникновения ФЖ растет с увеличением силы тока и его длительности
	$c_1 - c_2$	АС-4.1 — вероятность ФЖ увеличена до 5 %
	$c_2 - c_3$	АС-4.2 — вероятность ФЖ составляет до 50 %
	За кривой c_3	АС-4.3 — вероятность ФЖ выше 50 %
* При длительности протекания тока менее 200 мс ФЖ наступает только при воздействии в пределах периода уязвимости, если превышены соответствующие пороги. Рисунок А.19 в части ФЖ относится к пути протекания тока от кисти левой руки до ступней ног. Для других путей протекания тока необходимо применять коэффициент сердечного тока.		

6.10 Применение коэффициента сердечного тока *F*

Коэффициент сердечного тока *F* позволяет выполнить расчет тока I_h (см. таблицу 12), протекающего по пути, отличном от пути «кисть левой руки — ступни обеих ног» и вызывающего ФЖ с той же вероятностью, что и ток от кисти левой руки к ступням обеих ног I_{ref}, приведенный на рисунке А.19. Ток I_h протекающий по пути, приведенном в таблице 12, вычисляют по формуле

$$I_h = \frac{I_{ref}}{F}. \quad (3)$$

Этот коэффициент следует применять только для грубой оценки при сравнении опасностей в отношении ФЖ, создаваемой токами, протекающими по различным путям по телу человека.

В таблице 12 приведены коэффициенты сердечного тока для различных путей протекания тока по телу.

Таблица 12 — Коэффициент сердечного тока *F* для различных путей протекания тока по телу

Путь протекания тока	Коэффициент сердечного тока *F*
Кисть левой руки — левая ступня, правая ступня, ступни обеих ног	1,0
Кисти обеих рук — ступни обеих ног	1,0
Кисть левой руки — кисть правой руки	0,4
Кисть правой руки — левая ступня, правая ступня, ступни обеих ног	0,8
Спина — кисть правой руки	0,3
Спина — кисть левой руки	0,7
Грудь — кисть правой руки	1,3
Грудь — кисть левой руки	1,5
Ягодицы — кисть левой или правой руки, кисти обеих рук	0,7
Левая ступня — правая ступня	0,04

Пример — Ток 225 мА, протекающий между кистями рук, вызывает появление ФЖ с такой же вероятностью, что и ток 90 мА, протекающий от кисти левой руки к ступням обеих ног.

7 Воздействие постоянного тока

7.1 Общие положения

В настоящем разделе рассмотрено воздействие постоянного тока при его протекании по телу человека.

Примечания

1 В отношении влияния на ФЖ, данные настоящего раздела относятся к постоянному току при наличии синусоидальных пульсаций с действующим значением не более 10 % значения постоянного тока.

2 Влияние пульсаций рассмотрено в ГОСТ Р 70646.2—2023, раздел 7.

3 При времени воздействия менее 10 мс применяют положения ГОСТ Р 70646.2—2023, раздел 7.

Пример тока прикосновения и его воздействия показан на рисунке А.20.

7.2 Порог чувствительности и порог реакции

Порог чувствительности и порог реакции зависят от нескольких параметров:

- площади контакта тела с электрической цепью,
- условий осуществления контакта (сухой, влажный, давление, температура), длительности протекания тока,
- физиологических характеристик человека.

В отличие от переменного тока, на уровне порога чувствительности ощущаются только моменты начала и окончания протекания тока, а в течение всего времени протекания тока ощущения отсутствуют. При условиях, сравнимых с условиями при рассмотрении переменных токов, порог реакции составляет примерно 2 мА.

7.3 Порог сковывания мышц и порог отпускания

В отличие от переменного тока на постоянном токе не существует фиксируемого порога сковывания мышц и порога отпускания. Только в моменты включения и отключения тока появляются болезненные или судорожные сокращения мышц.

7.4 Порог фибрилляции желудочков

Как и для переменного тока (см. 6.5), порог ФЖ, вызванной постоянным током, зависит от физиологических особенностей человека, а также от электрических параметров (см. приложение И).

Из данных по несчастным случаям с электричеством следует, что опасность ФЖ существует, главным образом, при продольных токах. Однако, эксперименты на животных показали, что ФЖ может возникать и при поперечных токах более высокой интенсивности.

Опыты на животных и данные несчастных случаев показывают, что порог ФЖ для нисходящих токов примерно в два раза выше, чем для восходящих.

Для времени воздействия более длительности сердечного цикла порог ФЖ на постоянном токе в несколько раз выше, чем для переменного тока. При времени воздействия менее 200 мс порог ФЖ примерно равен порогу на переменном токе того же действующего значения.

Кривые, полученные из опытов с животными, соответствуют продольному восходящему току (конечности находятся под положительным потенциалом). На рисунке А.21 зависимости c_2 и c_3 соответствуют расчетной комбинации значений тока и длительности, при которых вероятность ФЖ у животных составляет 5 % и 50 % соответственно при протекании тока вдоль тела (например, от левой передней конечности) к обеим задним конечностям. Полученная из экспериментов на животных кривая c_1 соответствует комбинации тока и длительности протекания, ниже которых, при протекании тока также вдоль тела, вероятность возникновения ФЖ оценивается как очень низкая. Более поздние исследования показывают, что порог ФЖ для людей выше чем для животных при любой длительности протекания тока. Например, порог ФЖ для пути протекания тока от кисти левой руки до ступней обеих ног для здорового человека составляет примерно 200 мА при большой длительности протекания тока. Однако, не все люди обладают здоровым сердцем, а некоторые болезни способны влиять на порог ФЖ. У некоторых людей с болезнями сердца порог ФЖ ниже обычного, но процент снижения точно не известен. По этой причине, рекомендуют использовать кривую c_1 на рисунке А.21, полученную из опытов с животными, для определения порога ФЖ для людей в качестве консервативной оценки. Несчастные случаи с летальным исходом при параметрах тока ниже кривой c_1 не зафиксированы. Это указывает, что кривая c_1,

скорее всего, подходит для консервативной оценки порога ФЖ для всех людей. Для продольных нисходящих токов (ноги находятся под отрицательным потенциалом) кривые следует сдвинуть в область бóльших значений тока с коэффициентом по силе тока примерно 2.

7.5 Прочие виды воздействий, связанные с поражением электрическим током

При протекании токов более 100 мА в конечностях может возникать ощущение тепла. В месте контакта ощущают боль.

Поперечные токи до 300 мА при протекании по телу человека в течение нескольких минут могут вызывать обратимую сердечную аритмию, появление отметок на коже, ожоги, головокружение и, иногда, потерю сознания, при этом вероятность событий возрастает с увеличением силы тока и длительности его протекания. При токах более 300 мА потеря сознания происходит часто.

При протекании токов силой несколько ампер дольше единиц секунд, вероятно появление глубоких ожогов и других повреждений, а также летальный исход.

Такие эффекты, как электропорация (см. 6.6) могут возникать от контакта с цепями как переменного, так и постоянного токов.

Следует принимать во внимание неэлектрические повреждения, связанные с протеканием тока, например травмы.

7.6 Описание времятоковых областей

На рисунке А.21 приведены времятоковые области, определяющие воздействия постоянного тока на человека.

В таблице 13 приведены границы времятоковых областей для различных физиологических реакций при протекании тока от кисти руки до ступней ног.

Таблица 13 — Времятоковые области для постоянного тока, протекающего от кисти руки до ступней ног

Область	Границы	Физиологические реакции
DC-1	До 2 мА на кривой *a*	Возможно покалывание при возникновении, пропадании тока или резком изменении силы тока
DC-2	От 2 мА до кривой *b*	Вероятны непроизвольные сокращения мышц, особенно при возникновении, пропадании тока или резком изменении силы тока, но как правило, без вредных физиологических воздействий
DC-3	Кривая *b* и выше	Сильные непроизвольные мышечные сокращения и обратимые нарушения формирования и распространения импульсов возбуждения в сердце. Влияние растет с увеличением силы тока и длительности протекания. Обычно, не происходит внутренних повреждений
DC-4*	Выше кривой c_1	Могут иметь место патофизиологические воздействия, такие как остановка сердца, остановка дыхания, ожоги и другие повреждения клеток. Вероятность возникновения ФЖ растет с увеличением силы тока и его длительности
	$c_1 - c_2$	DC-4.1— вероятность ФЖ увеличена до 5 %
	$c_2 - c_3$	DC-4.2— вероятность ФЖ составляет до 50 %
	За кривой c_3	DC-4.3— вероятность ФЖ выше 50 %
* При длительности протекания тока менее 200 мс ФЖ наступает только при воздействии в пределах периода уязвимости, если превышены соответствующие пороги. Рисунок А.21 в части ФЖ относится к пути протекания тока от кисти левой руки до ступней ног. Для других путей протекания тока необходимо применять коэффициент сердечного тока.		

7.7 Коэффициент сердечного тока

Коэффициент сердечного тока *F* на постоянном токе применяют аналогично переменному току (см. 6.10).

7.8 Сравнение воздействия анодного и катодного постоянных токов

Электрод является местом обмена заряженными частицами со средой вокруг него.

Следует различать следующие заряженные частицы: анионы, которые несут отрицательный заряд, катионы, которые несут положительный заряд.

Анод — это электрод, имеющий положительный потенциал по отношению к более низкому потенциалу сравнения, например положительный вывод источника. Анодный ток — это ток, который стекает с анода.

Катод — это электрод, имеющий отрицательный потенциал по отношению к более высокому потенциалу сравнения, например отрицательный вывод источника. Катодный ток — это ток, который подтекает к катоду.

На рисунке А.23 показана простая модель для облегчения понимания того факта, что при рассмотрении импульсов постоянного тока направление тока имеет значение.

Ток в данном примере — это обычный ток, направленный противоположно направлению движения электронов. Ток приложен к части тела с расположенным в нем элементом, подверженным возбуждению (например, нервом), посредством одного маленького электрода 1 (называемого дифферентным электродом) и электрода с большой площадью прилегания 2 (называемого индифферентным электродом).

Распределение тока асимметрично, вблизи области А плотность тока высокая, вблизи области В плотность тока низкая, как показано на рисунке А.23.

Различные импульсы постоянного тока определяют различную реакцию. Реакции возбудимой ткани возникают в следующем порядке по отношению к увеличивающемуся возбуждающему току в зависимости от полярности и от того, происходит включение тока или его отключение:

- РВК;
- РВА;
- РОА;
- РОК.

Все вышеприведенное называют полярным законом раздражения.

Данное поведение тканей можно объяснить следующим образом.

Внешняя часть мембраны возбудимой ткани в области А становится более отрицательной, если электрод 1 является катодом. Это приводит к деполяризации мембраны, так как внутренний потенциал клетки также отрицательный: клетка испускает электрический сигнал, так как возбуждается от области А при замыкании цепи, происходит РВК.

Если электрод 1 является анодом, то происходит аналогичный процесс, но уже в области В, где плотность тока низка. Данный процесс называют РВА, так как название процессу всегда дают по состоянию малого «дифферентного» электрода. Порог в этом случае выше, чем для РВК. Эта последовательность может быть обращена (так называемый анодный провал) из-за переходного тока ионов Ca^{2+} при коротких импульсах длительностью примерно 180 мс.

Если протекающий после включения цепи ток отключают, то может возникнуть реакция на отключение.

Более низкий порог при данном виде реакции возникает снова в области А при расположении в ней анода. Причиной такой реакции на отключение (РОА) является тот факт, что соответствующие каналы (в мембране) снова деполяризуются, так как до этого они были инактивированы во время непрерывного протекания тока.

РОК, при которой пороги наибольшие среди всех видов реакций, происходит в области В.

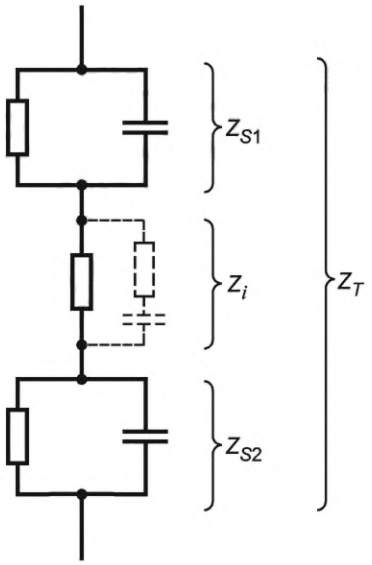
Описанная реакция клеток возбудимых тканей на протекание импульсов постоянного тока всегда происходит при асимметричном распределении тока и зависит от разности в размерах электродов и тока между электродами. По крайне мере для импульсов, прикладываемых не далее 1 см от поверхности сердца, серии импульсов катодного постоянного тока немного безопаснее, так как для создания ФЖ в этом случае требуется на 25 % большая сила тока, чем при приложении серии импульсов анодного тока.

Эта реакция свойственна различным, не только нервным, видам клеток. Для клеток сердца она также характерна. Полярность тока влияет на реакцию чувствительности так же, как и на ФЖ (см. рисунок А.24).

Имеют место два вида возбуждения импульсами постоянного тока вследствие изменения мембранного потенциала клетки при включении катодного тока и отключении анодного тока. Потенциал действия возникает при достижении потенциалом мембраны соответствующего порогового значения.

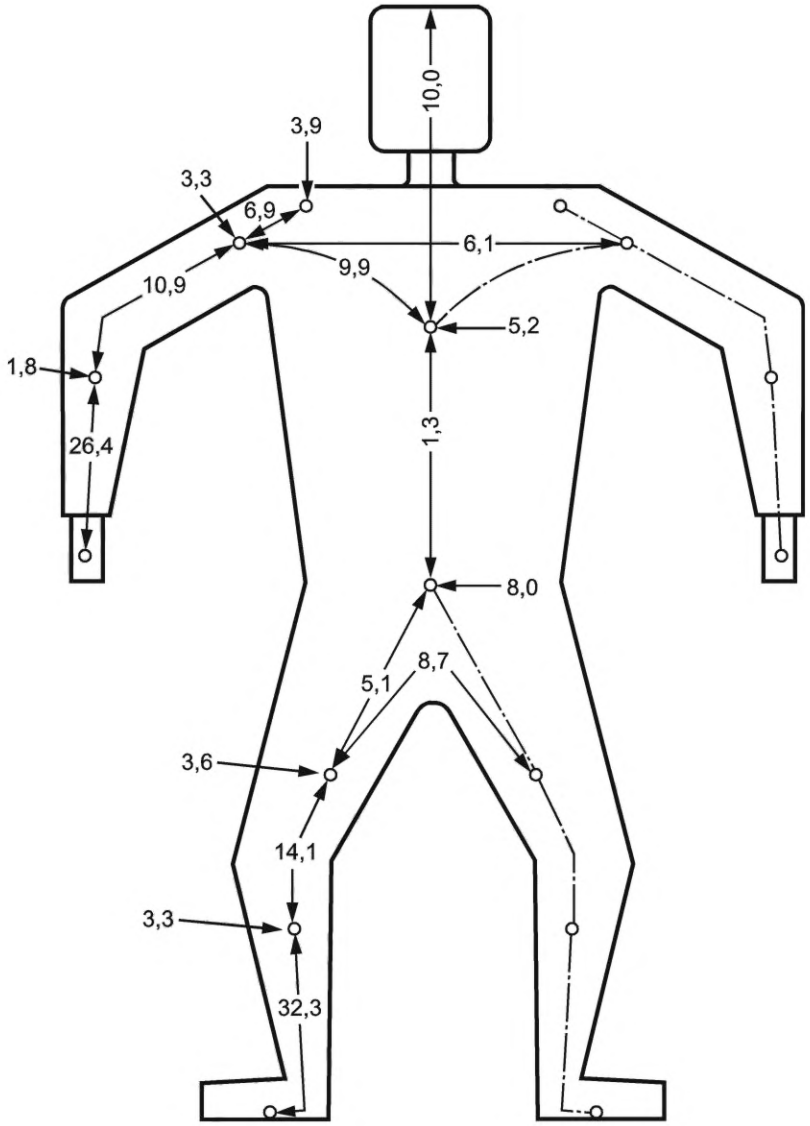
Приложение А
(обязательное)

Графический материал



Z_i — внутреннее полное сопротивление;
Z_{S1}, Z_{S2} — полное сопротивление кожи;
Z_T — общее полное сопротивление

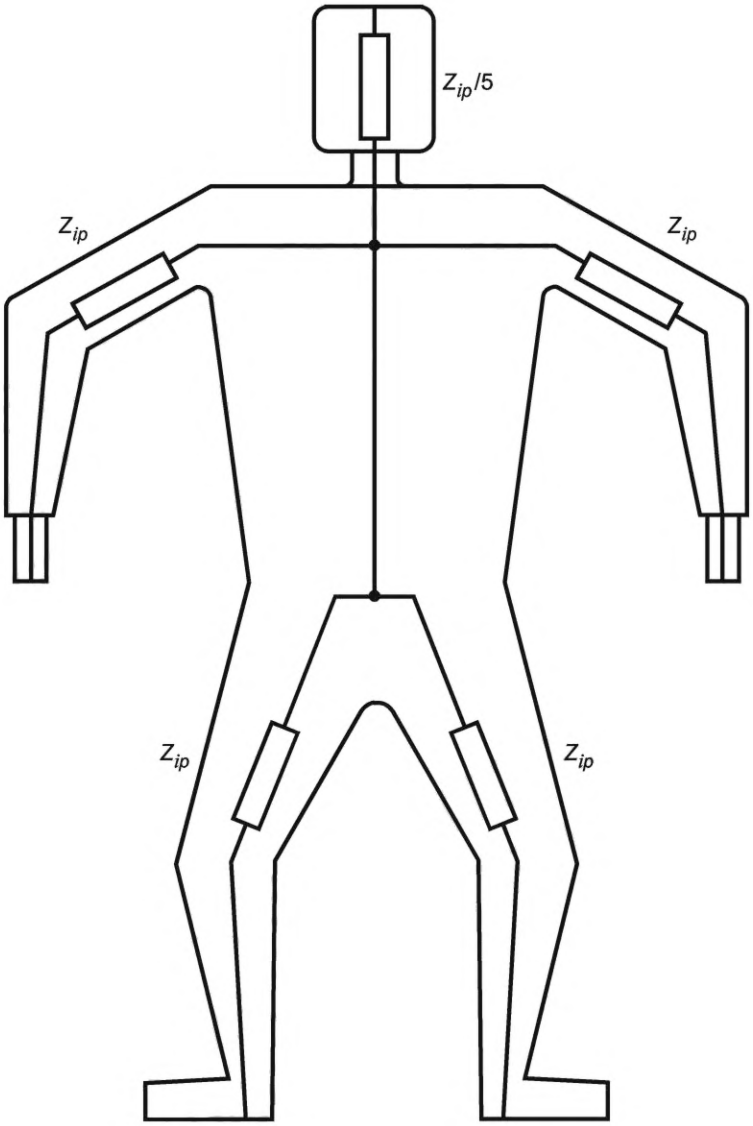
Рисунок А.1 — Полные сопротивления тела человека



Примечание — Числа на рисунке соответствуют сопротивлению рассматриваемой части тела, указанному в процентах от общего сопротивления тела для пути протекания тока от кисти руки до ступней обеих ног.

Для того, чтобы рассчитать общее полное сопротивление тела Z_T для заданного пути протекания тока, следует сложить значения частичных внутренних полных сопротивлений Z_{ip} для всех частей тела, расположенных на рассматриваемом пути, и добавить к ним полные сопротивления кожи в местах контакта. Числа вне границ тела показывают внутреннюю долю полного сопротивления, которое должно быть добавлено к сумме при расположении места контакта с электрической цепью в этой точке.

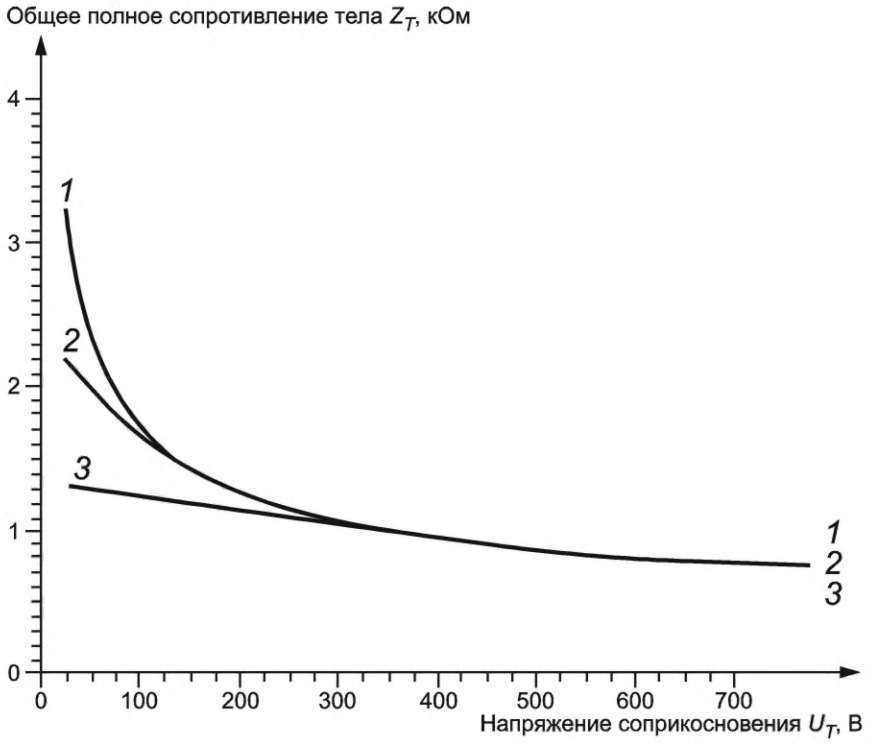
Рисунок А.2 — Частичные внутренние полные сопротивления Z_{ip} тела человека



Примечание — В долях от значения внутреннего полного сопротивления для пути протекания тока от кисти руки до ступни ноги или между кистями рук значение внутреннего полного сопротивления для пути протекания тока от кисти одной руки до ступней обеих ног составляет 75 %, для пути от кистей обеих рук до ступней обеих ног — 50 %, для пути от кистей обеих рук до туловища — 25 %.

Z_{ip} — частичное внутреннее полное сопротивление конечности (руки или ноги)

Рисунок А.3 — Упрощенная диаграмма внутренних полных сопротивлений тела человека

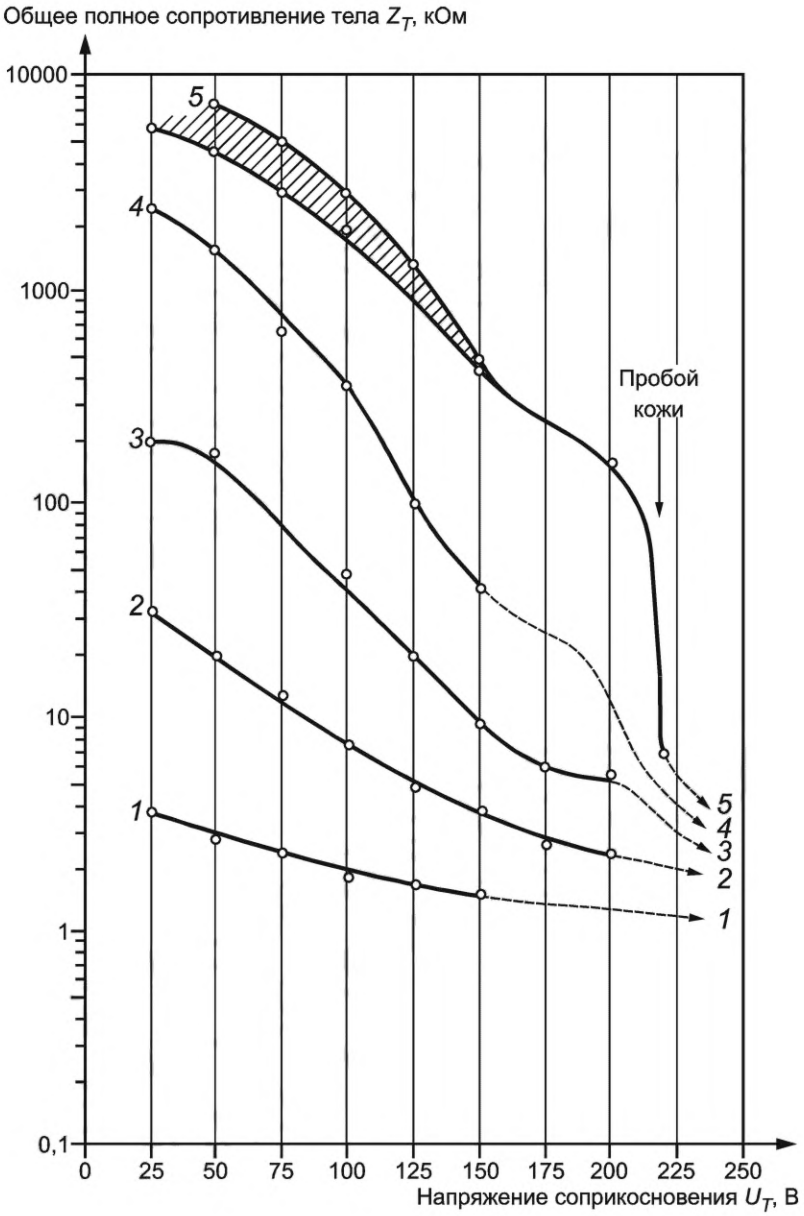


1 — сухие условия (см. таблицу 1);

2 — влажные условия (см. таблицу 2);

3 — условия увлажнения соленой водой (см. таблицу 3)

Рисунок А.4 — Общее полное сопротивление Z_T (50 %) для пути протекания тока между кистями рук при большой площади контакта с электрической цепью для сухих, влажных условий, условий увлажнения соленой водой для процентильного ранга населения, равного 50 %, в зависимости от напряжения прикосновения в диапазоне от 25 до 700 В на переменном токе частотой 50/60 Гц



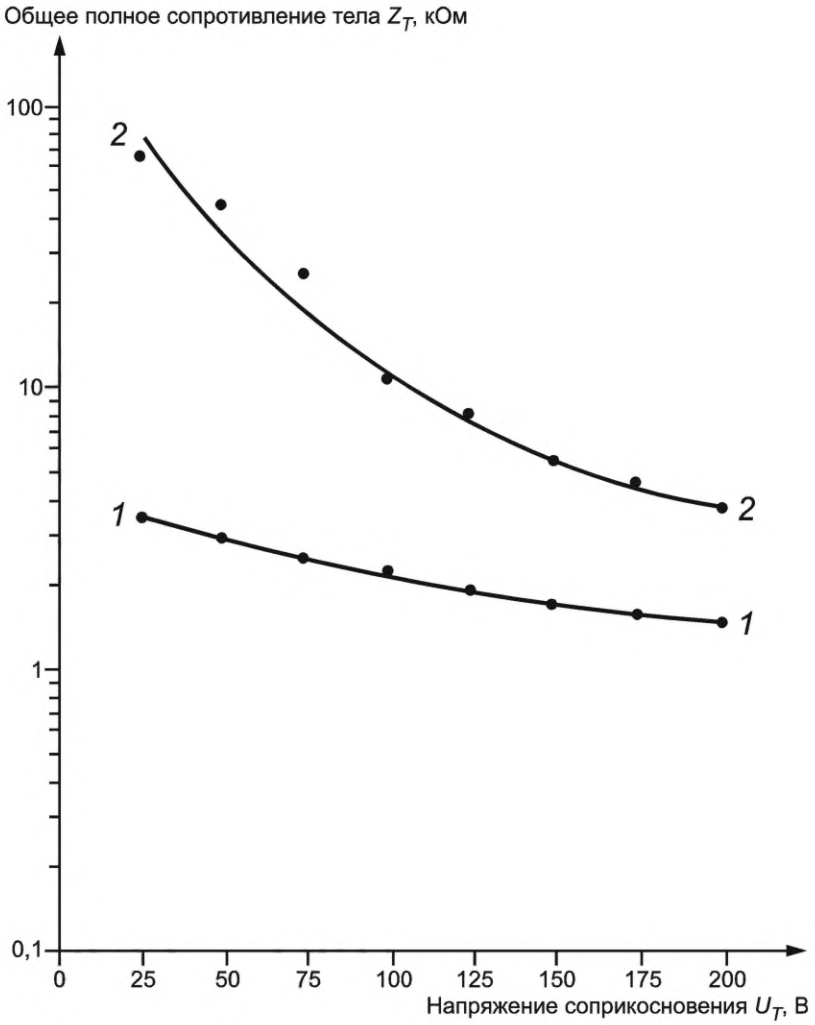
Примечания

1 Пробой кожи происходит при напряжении 220 В.

2 Дополнительная информация приведена в приложении К.

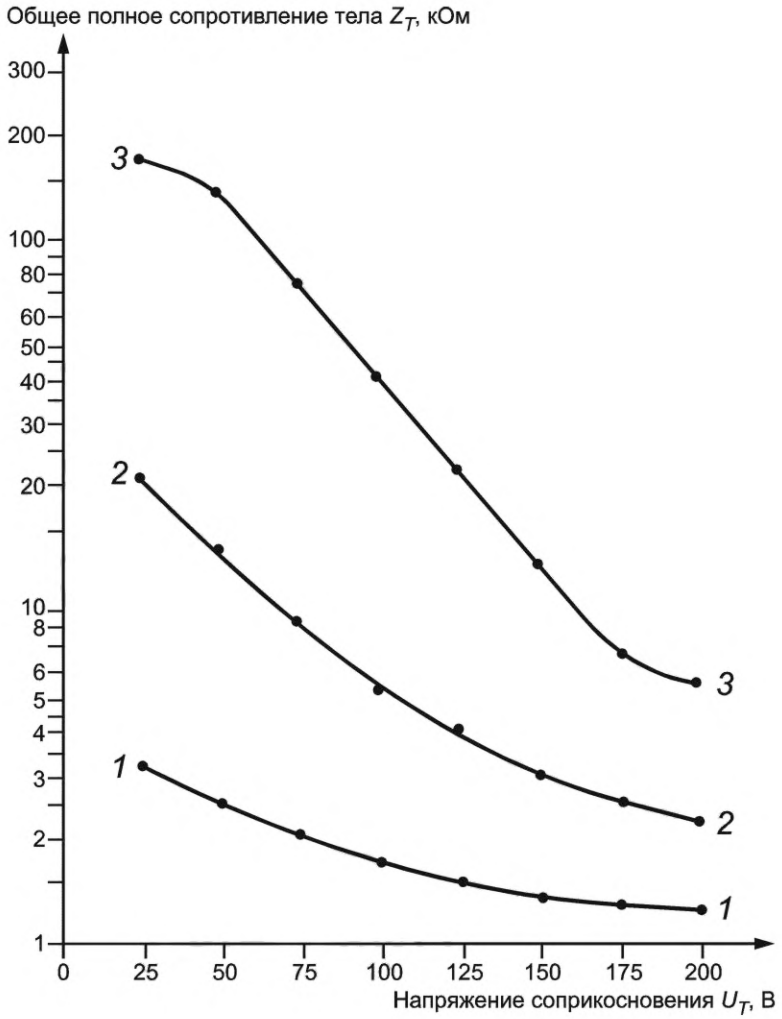
1 — площадь контакта 8200 мм^2; *2* — площадь контакта 1250 мм^2; *3* — площадь контакта 100 мм^2; *4* — площадь контакта 10 мм^2; *5* — площадь контакта 1 мм^2

Рисунок А.5 — Зависимость общего полного сопротивления Z_T от напряжения прикосновения (50 Гц) и площади контакта с электрической цепью в сухих условиях (измерения проведены на одном живом человеке)



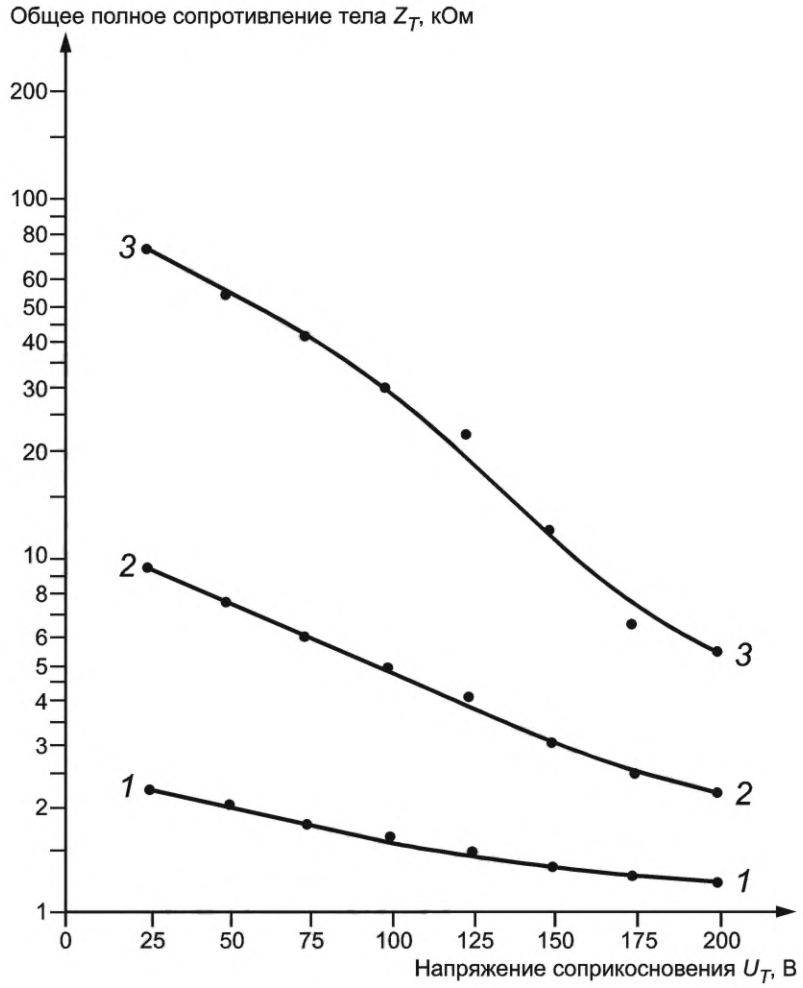
1 — большая площадь контакта (примерно 8200 мм^2), путь протекания тока между кистями рук;
2 — площадь контакта кончиков пальцев (примерно 1250 мм^2),
путь протекания тока между кончиками указательных пальцев рук

Рисунок А.6 — Зависимость общего полного сопротивления ZT от напряжения прикосновения U_T в диапазоне от 25 до 200 В переменного напряжения частотой 50 Гц для пути протекания тока между кончиками указательных пальцев рук в сравнении с путем протекания тока между кистями рук при большой площади контакта с электрической цепью в сухих условиях при длительности протекания тока не более 25 мс (измерения проведены на одном живом человеке)



1 — большая площадь контакта, электрод типа A (примерно 10 000 мм^2), согласно таблице 1;
2 — средняя площадь контакта, электрод типа B (примерно 1000 мм^2), согласно таблице 5;
3 — малая площадь контакта, электрод типа C (примерно 100 мм^2), согласно таблице 8

Рисунок А.7 — Зависимость общего полного сопротивления Z_T от напряжения прикосновения U_T в диапазоне от 25 до 200 В переменного напряжения частотой 50/60 Гц при большой, средней и малой площадях контакта с электрической цепью (значения площади примерно 10 000, 1000, 100 мм^2 соответственно) в сухих условиях для процентильного ранга населения, равного 50 %

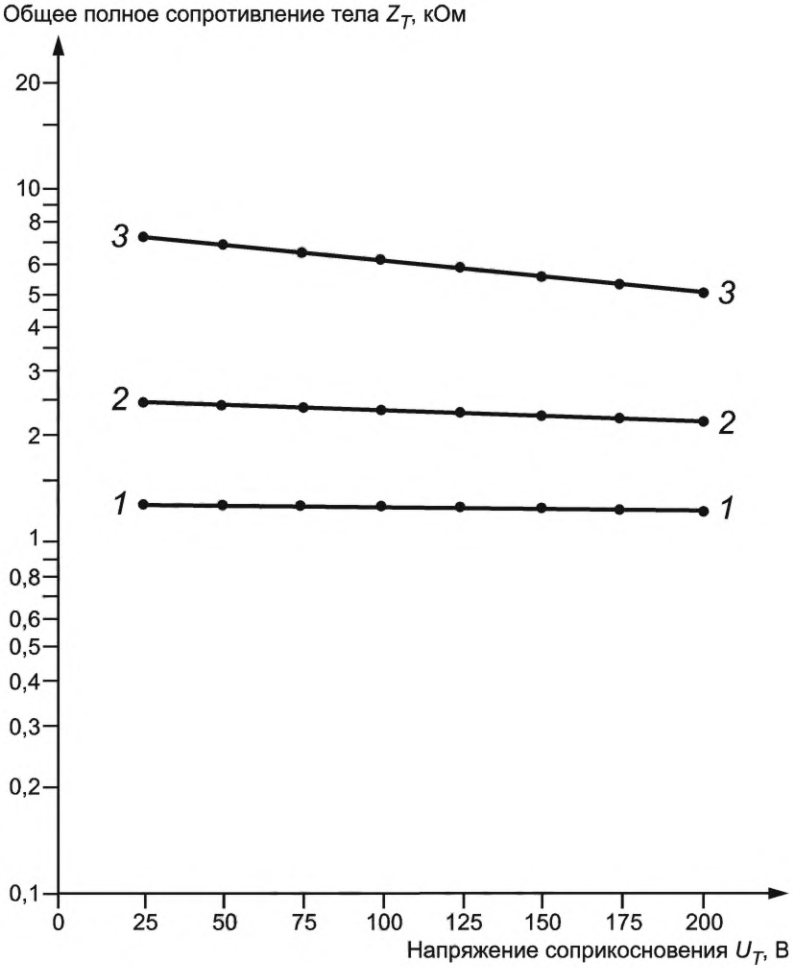


1 — большая площадь контакта, электрод типа А (примерно 10 000 мм^2), согласно таблице 2;

2 — средняя площадь контакта, электрод типа В (примерно 1000 мм^2), согласно таблице 6;

3 — малая площадь контакта, электрод типа С (примерно 100 мм^2), согласно таблице 9

Рисунок А.8 — Зависимость общего полного сопротивления Z_T от напряжения прикосновения U_T в диапазоне от 25 до 200 В переменного напряжения частотой 50/60 Гц при большой, средней и малой площадях контакта с электрической цепью (значения площади примерно 10 000, 1000, 100 мм^2 соответственно) во влажных условиях для процентильного ранга населения, равного 50 %



1 — большая площадь контакта, электрод типа А (примерно 10 000 мм^2), согласно таблице 3;

2 — средняя площадь контакта, электрод типа В (примерно 1000 мм^2), согласно таблице 7;

3 — малая площадь контакта, электрод типа С (примерно 100 мм^2), согласно таблице 10

Рисунок А.9 — Зависимость общего полного сопротивления Z_T от напряжения прикосновения U_T в диапазоне от 25 до 200 В переменного напряжения частотой 50/60 Гц при большой, средней и малой площадях контакта с электрической цепью (значения площади примерно 10 000, 1000, 100 мм^2 соответственно) в условиях увлажнения соленой водой для процентильного ранга населения, равного 50 %

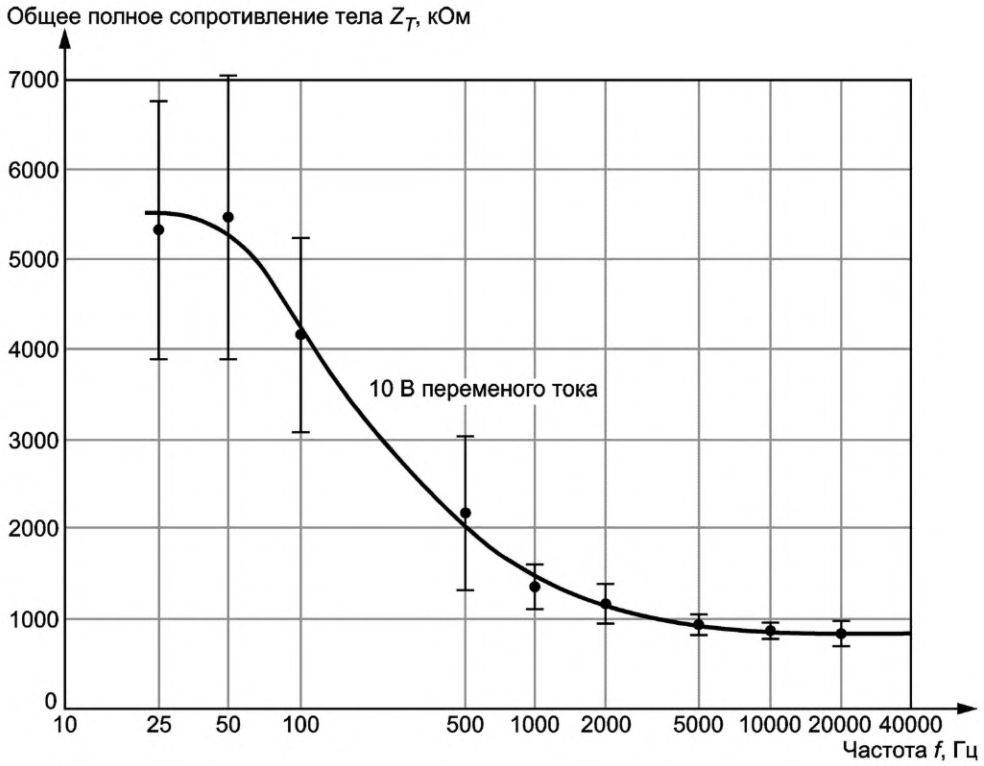


Рисунок А.10 — Значения общего полного сопротивления Z_T, измеренные у 10 живых людей, при протекании тока между кистями рук при большой площади контакта с электрической цепью в сухих условиях при напряжении прикосновения 10 В переменного напряжения частотой от 25 Гц до 20 кГц

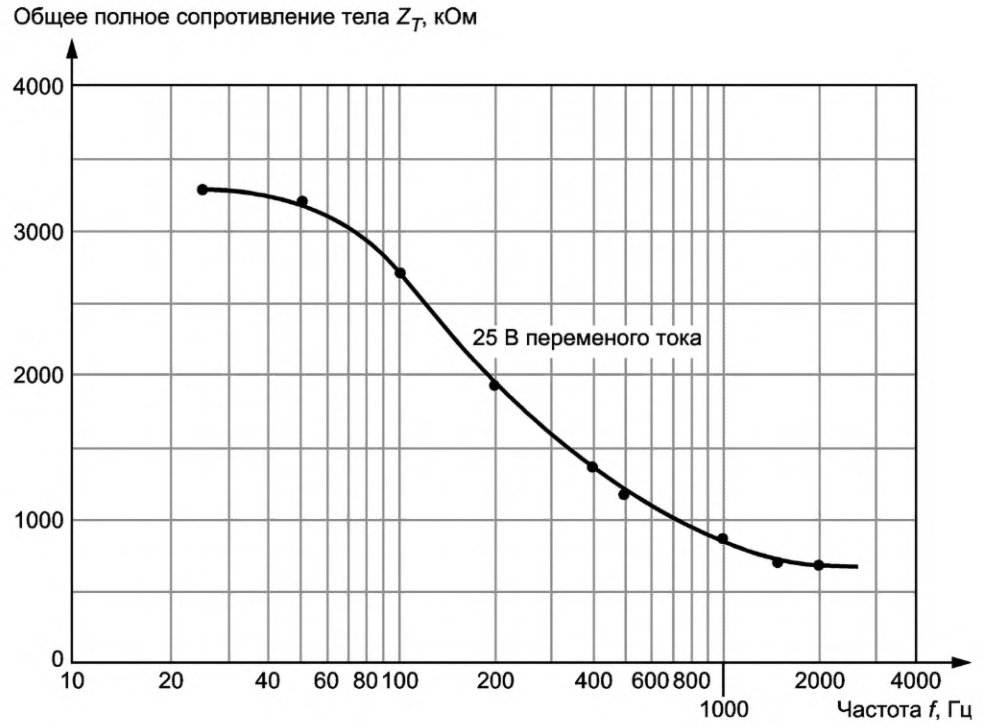


Рисунок А.11 — Значения общего полного сопротивления Z_T при протекании тока между кистями рук при большой площади контакта с электрической цепью в сухих условиях при напряжении прикосновения 25 В переменного напряжения частотой от 25 Гц до 2 кГц (измерения проведены на одном живом человеке)

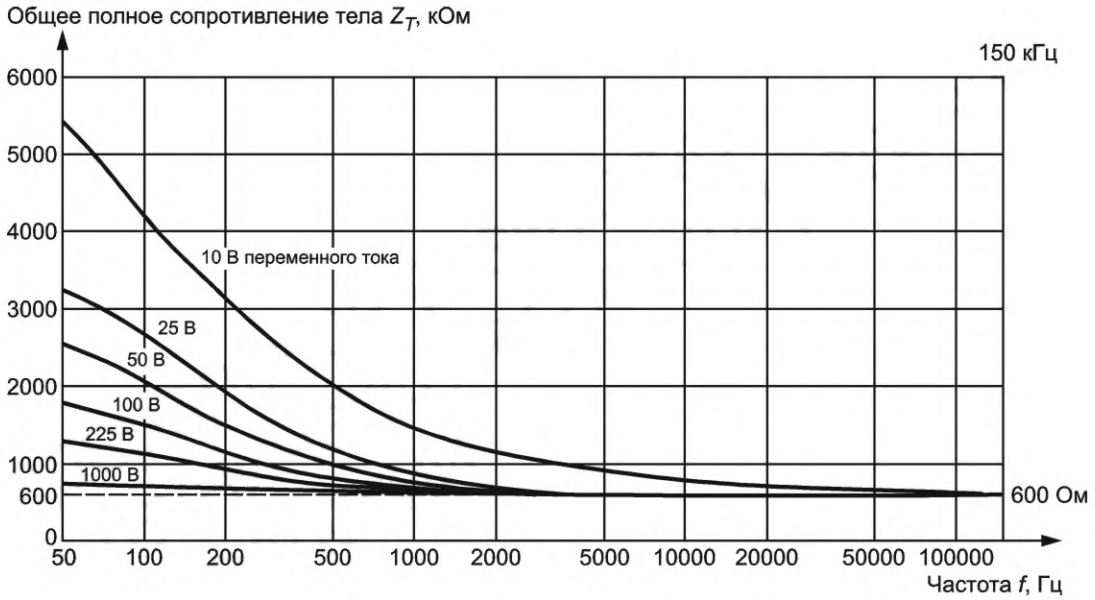
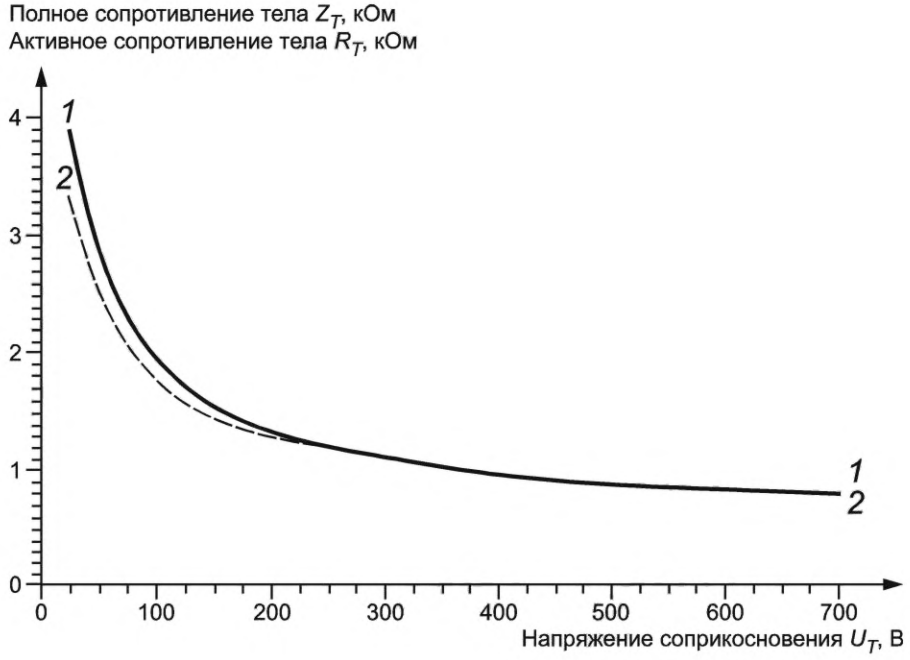


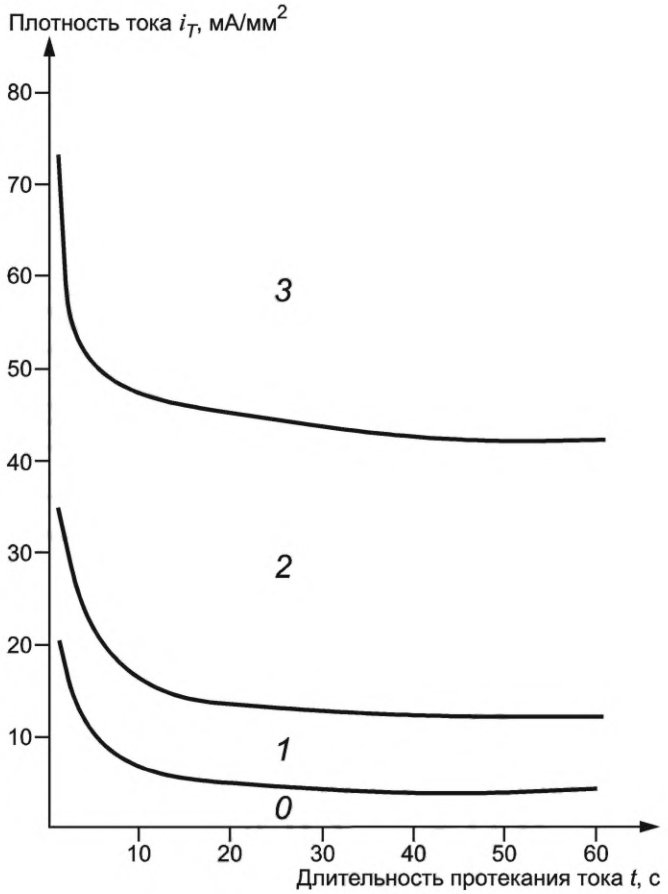
Рисунок А.12 — Зависимость от частоты для общего полного сопротивления Z_T при протекании тока между кистями рук или от кисти руки до ступни ноги при большой площади контакта с электрической цепью в сухих условиях при напряжениях прикосновения в диапазоне от 10 до 1000 В переменного напряжения частотой от 50 Гц до 150 кГц для процентильного ранга населения, равного 50 %



1 — активное сопротивление тела R_T для постоянного тока;

2 — полное сопротивление тела Z_T для частоты 50 Гц

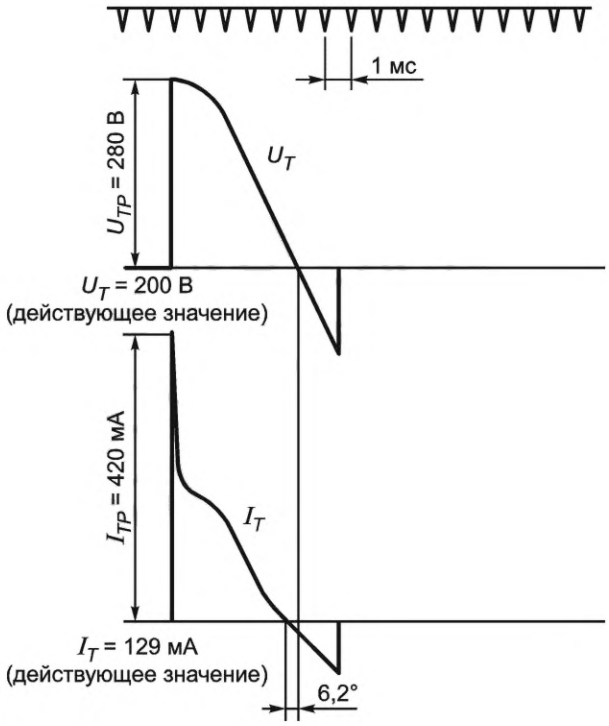
Рисунок А.13 — Определенные статистически значения общего полного сопротивления Z_T и активного сопротивления тела R_T для процентильного ранга населения, равного 50 %, при воздействии переменного напряжения прикосновения до 700 В и частотой 50/60 Гц и постоянного тока при большой площади контакта с электрической цепью в сухих условиях



Примечание — Подробное описание зон, указанных на рисунке, приведено в 6.8.

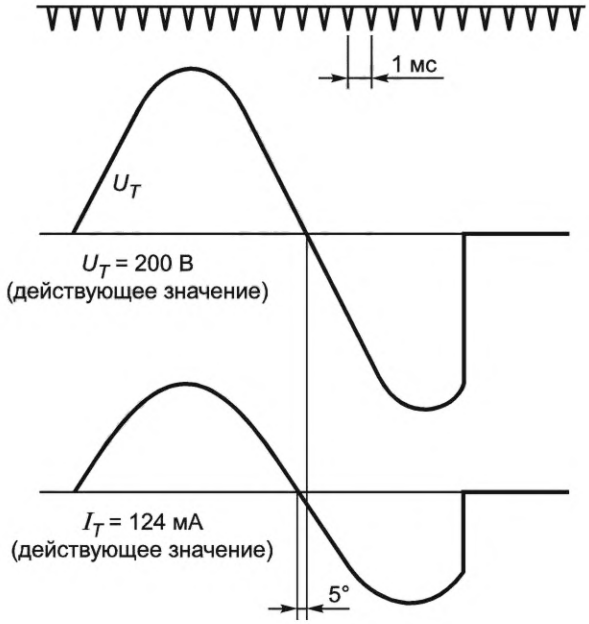
зона *3* — обугливание кожи; зона *2* — отметки на коже; зона *1* — покраснение кожи; зона *0* — воздействие отсутствует

Рисунок А.14 — Зависимость изменения внешнего вида человеческой кожи от плотности тока i_T и длительности его протекания



Примечание — При U_T = 200 В переменного тока (действующее значение), длительности протекания тока 6,5 мс, I_T = 129 мА (действующее значение), амплитудном значении тока прикосновения I_T = 420 мА, общем полном сопротивлении тела Z_T = 1550 Ом, начальном активном сопротивлении тела R_0 = 666 Ом возникают сильные и болезненные ощущения и непроизвольные мускульные реакции в руках, плечах и ногах. Несмотря на то, что ток протекал между кистями рук, человек приподнялся, что означает, что мышцы ног были возбуждены.

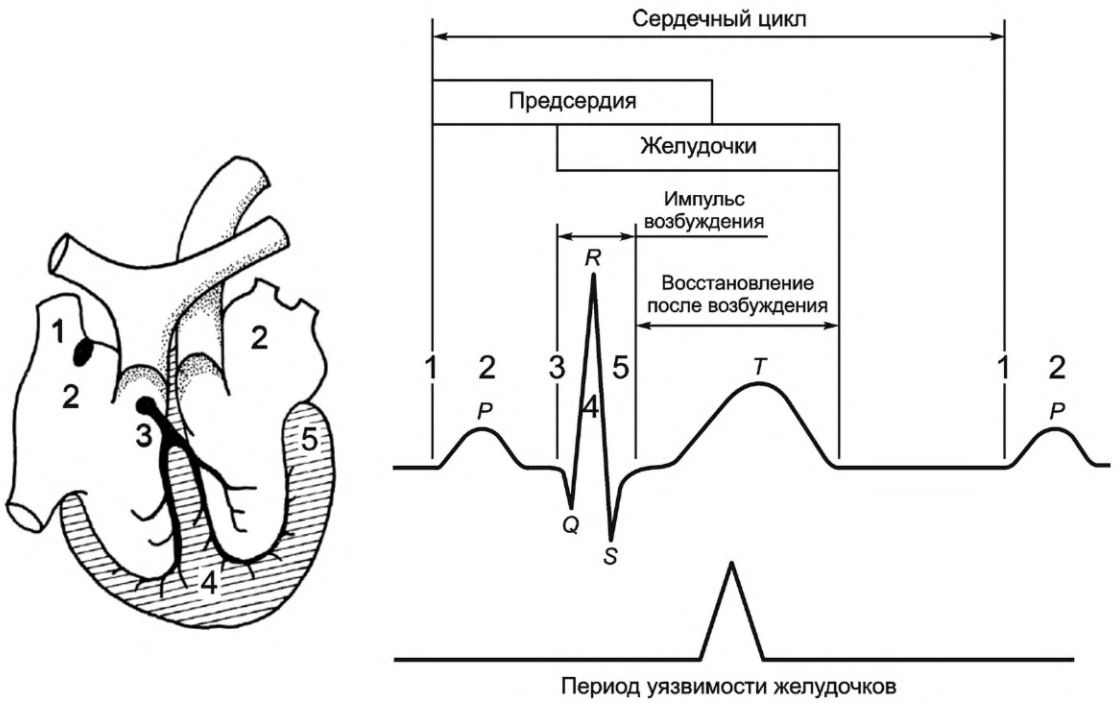
а) Контакт, произошедший в момент амплитудного значения напряжения прикосновения



Примечание — При U_T = 200 В переменного тока (действующее значение), длительности протекания тока 16,5 мс, I_T = 124 мА (действующее значение) на осциллограмме тока отсутствуют импульсы, общее полное сопротивление тела Z_T = 1613 Ом, физиологические реакции аналогичны описанным на рисунке а).

б) Контакт, произошедший в момент изменения знака напряжения прикосновения (нулевого значения)

Рисунок А.15 — Экспериментально полученные осциллограммы напряжения прикосновения U_T и токи прикосновения I_T для переменного тока при пути протекания тока между кистями рук, большой площади контакта с электрической цепью в сухих условиях



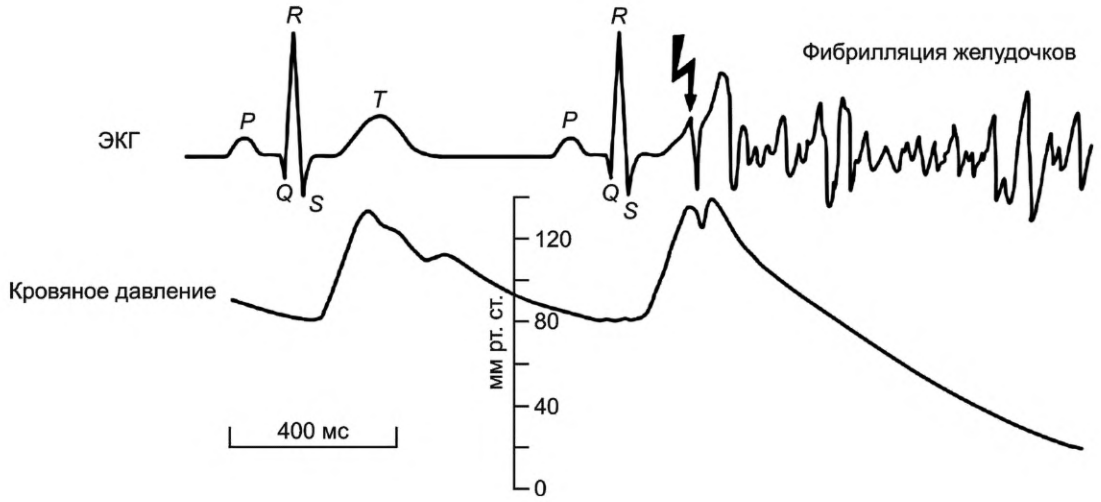
Примечание — Цифры на рисунке соответствуют последовательным стадиям распространения возбуждения.

P — интервал деполяризации предсердий;

QRS — интервал деполяризации желудочков;

T — интервал реполяризации желудочков

Рисунок А.16 — Период уязвимости желудочков в течение сердечного цикла

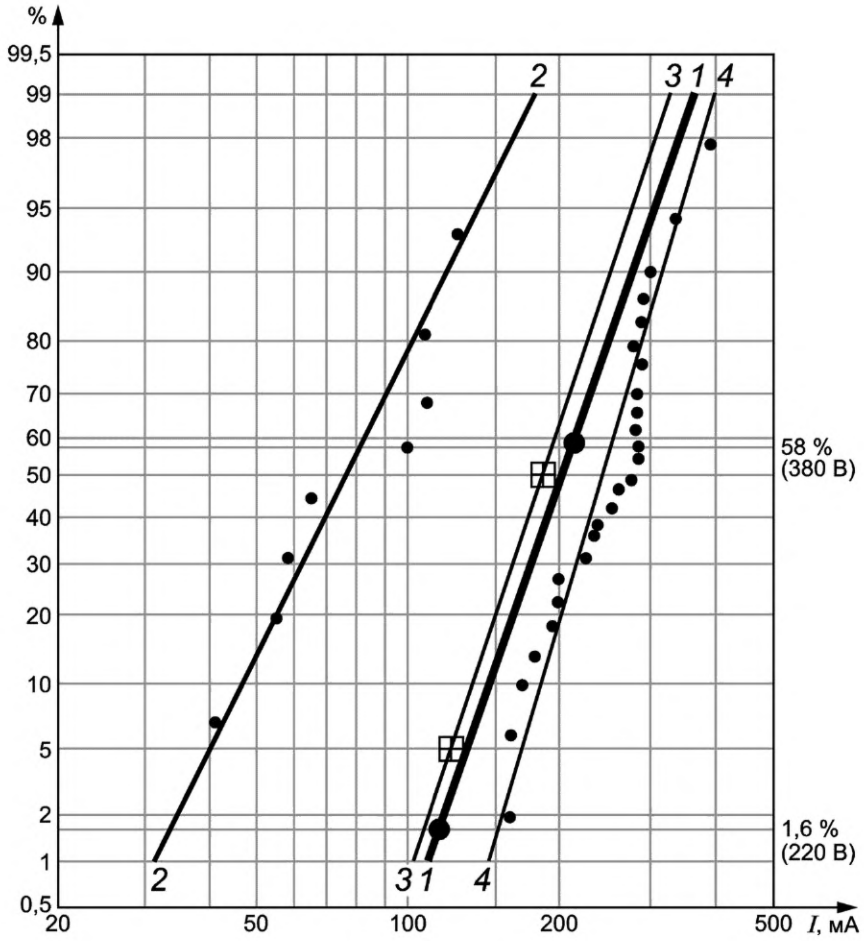


P — интервал деполяризации предсердий;

QRS — интервал деполяризации желудочков;

T — интервал реполяризации желудочков

Рисунок А.17 — Инициирование ФЖ в течение периода уязвимости. Изменения электрокардиограммы (ЭКГ) и кровяного давления



1 — данные по ФЖ для людей, полученные на основе анализа статистики несчастных случаев (U_T = 220 В, 1,6 %, U_T = 380 В, 58 %);

2 — данные по ФЖ для собак при длительности протекания тока 5 с;

3 — данные по ФЖ для свиней при длительности протекания тока более 1,5 длительности сердечного цикла;

4 — данные по ФЖ для овец при длительности протекания тока 3 с;

● — расчетные данные, полученные на основе анализа статистики несчастных случаев (U_T = 220 В, 1,6 %, U_T = 380 В, 58 %, I_T = 110 и 220 мА соответственно. Применен коэффициент сердечного тока F = 0,4);

⊞ — значения после статистической обработки результатов измерений на свиньях [I (5 %) = 120 мА, I (50 %) = 180 мА]

Рисунок А.18 — Экспериментальные данные по ФЖ для собак, свиней и овец и расчетные данные для людей, полученные на основе статистики несчастных случаев при поперечном протекании тока между кистями рук для напряжений прикосновения 220 и 380 В переменного тока для значений полного сопротивления тела Z_T (5 %)

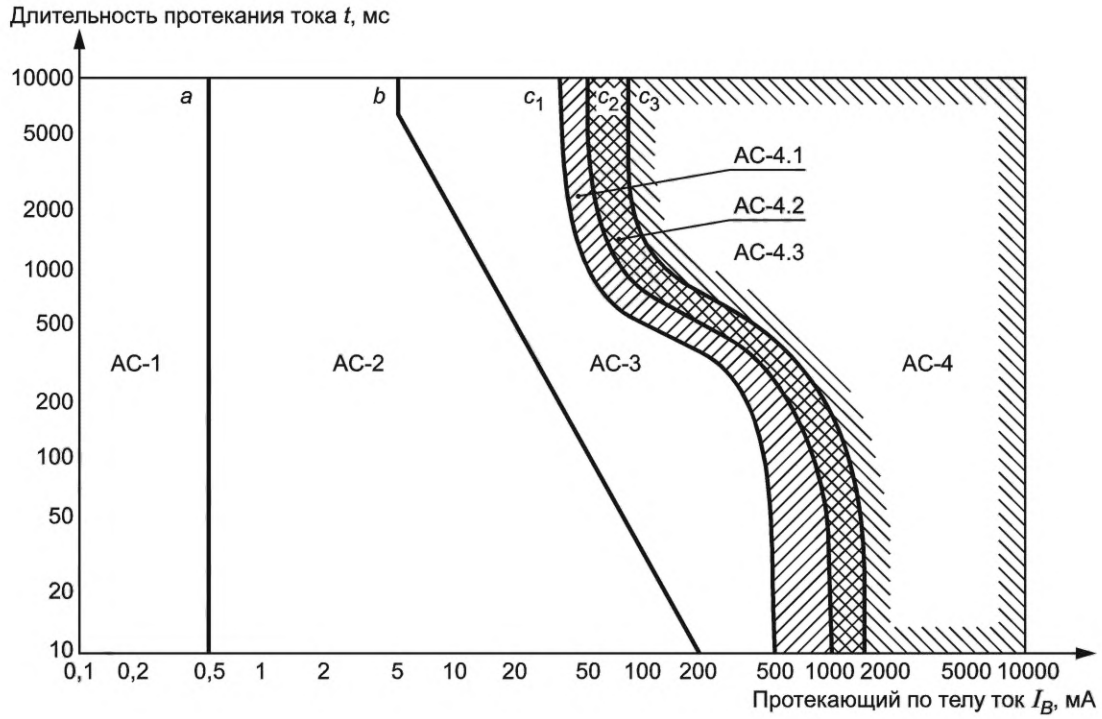
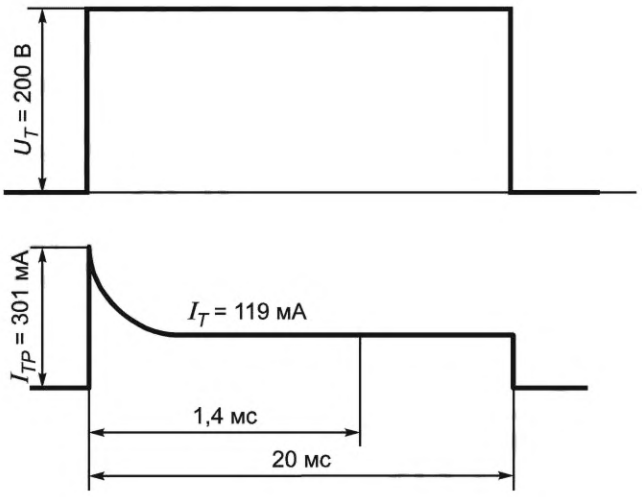


Рисунок А.19 — Общепринятые времятоковые области,
определяющие воздействия переменного тока (частотой от 15 до 100 Гц)
на человека для пути протекания тока от кисти левой руки до ступней обеих ног (см. таблицу 11)



Примечание — При U_T = 200 В постоянного тока, длительности протекания тока 20 мс, токе прикосновения I_T = 129 мА (действующее значение), амплитудном значении тока прикосновения I_T = 301 мА, общем полном сопротивлении тела Z_T = 1681 Ом, начальном активном сопротивлении тела R_0 = 664 Ом возникает сильное ощущение жжения и непроизвольные мускульные реакции подергивания в руках и плечах.

Рисунок А.20 — Осциллограммы напряжения прикосновения U_T и тока прикосновения I_T
для постоянного тока при пути протекания тока между кистями рук,
большой площади контакта с электрической цепью в сухих условиях

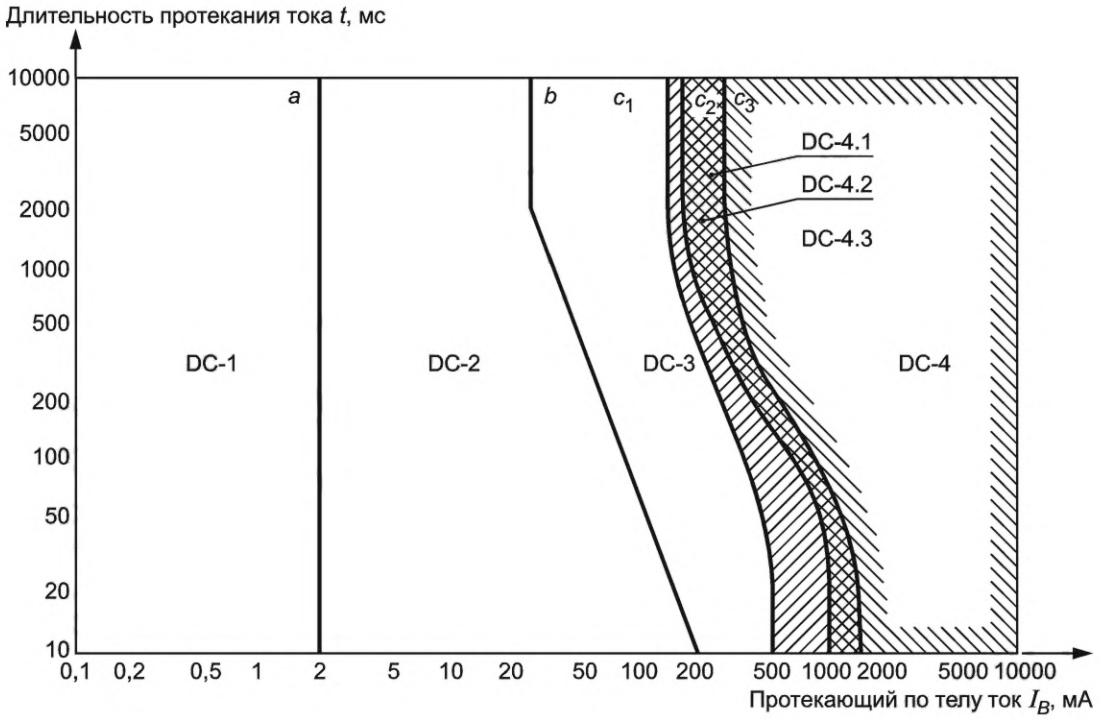


Рисунок А.21 — Общепринятые времятоковые области, определяющие воздействия постоянного тока на человека для продольного восходящего тока (см. таблицу 13)

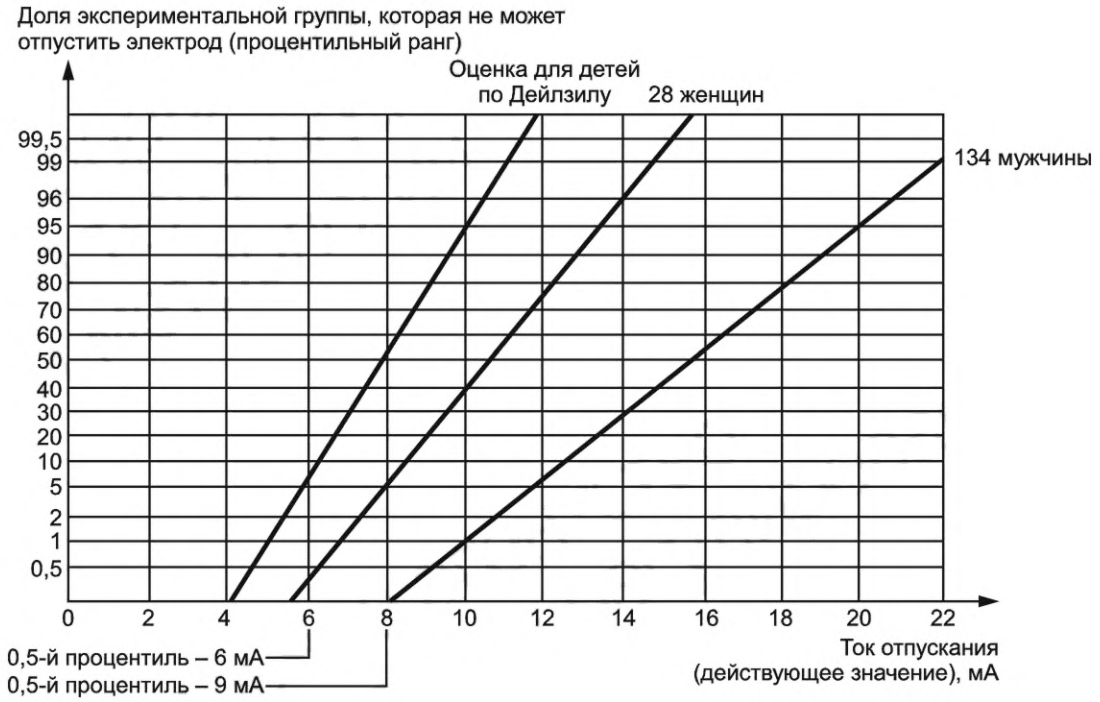


Рисунок А.22 — Токи отпускания для переменного тока частотой 60 Гц

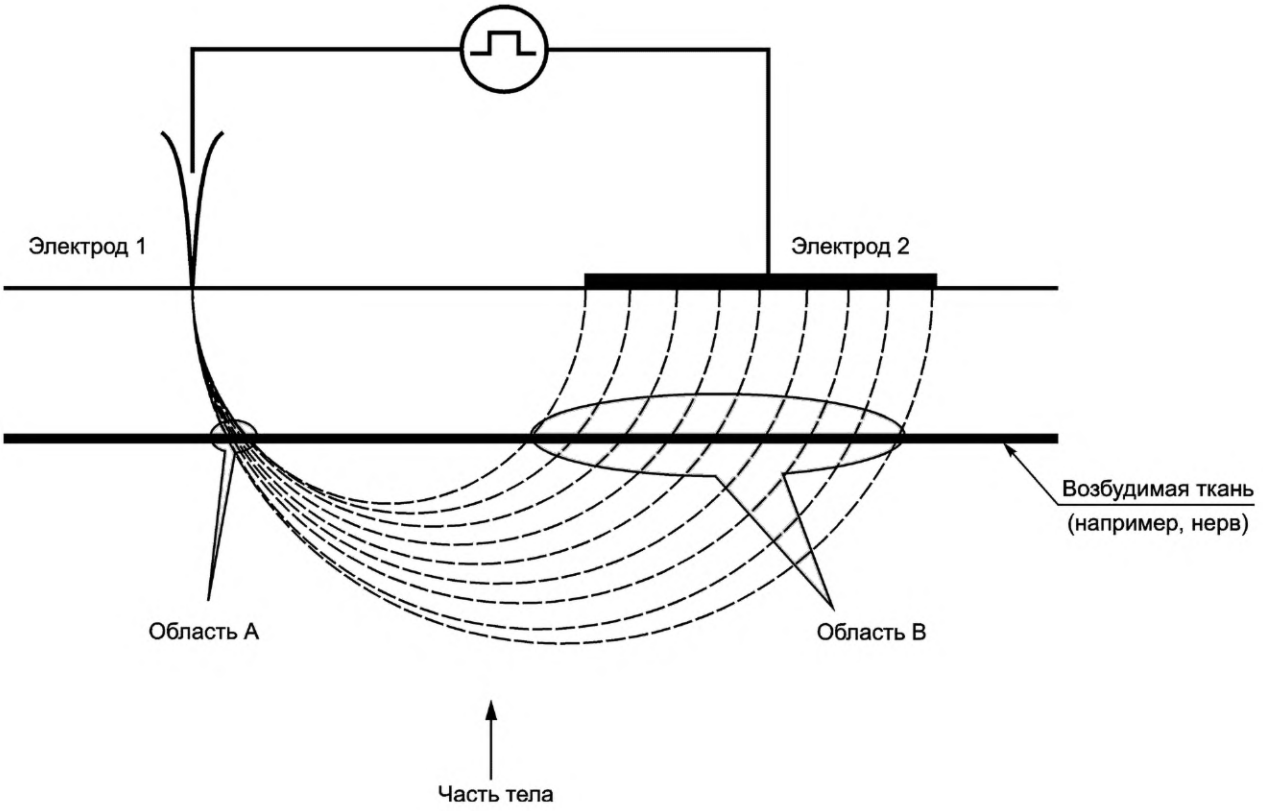


Рисунок А.23 — Сравнение воздействия анодного и катодного постоянных токов

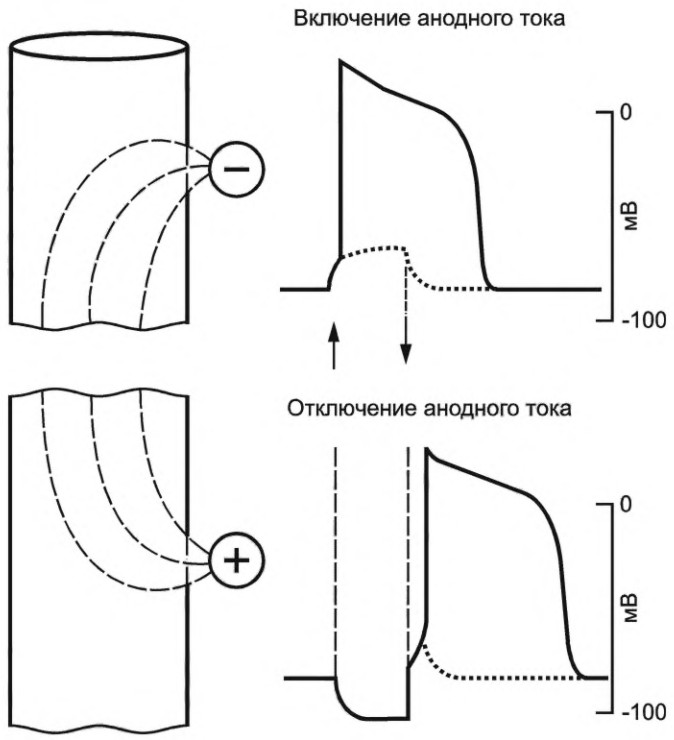


Рисунок А.24 — Воздействие импульсами постоянного тока на одиночную клетку сердца

Приложение Б
(справочное)

Методы моделирования и схемы замещения при расчетах поражения электрическим током

Моделирование заменяет собой прямые измерения при приложении воздействий, которые могут нанести вред телу. Непосредственные эксперименты с воздействием электрического тока, как на людей, так и на животных весьма ограничены, поэтому целесообразно в качестве замены экспериментов применять моделирование.

Для оценки токов прикосновения в соответствии с эффектом фильтрации по частоте применяют моделирование.

Новые границы моделирования, основанные на прямых измерениях на сердце животных (с учетом необходимой адаптации к человеческому сердцу), являются входными данными при анализе тела в целом (например, моделей для путей протекания тока между кистями рук, от кисти руки до ступни ноги). Новые модели на базе управляемых электрических цепей позволяют определить напряжение, которое надо приложить к человеку, чтобы достичь заданной плотности тока (или другого необходимого параметра).

Процесс определения опасных уровней тока включает в себя определение токов в частях тела, включая миокард сердца. Этот процесс можно смоделировать методами теории цепей, что требует разработки схемы замещения тела.

В настоящем стандарте приведена широко используемая модель тела, состоящая из активных сопротивлений и емкостей, представляющих полное сопротивление кожи. Последовательно с ними включен резистор, представляющий внутреннее активное сопротивление тела.

Напряжение прикладывают между выводами, предусмотренными на модели, и получившийся в результате ток во внутреннем активном сопротивлении тела можно рассматривать в качестве тока через сердце.

Таким образом, измеряя этот ток при приложенном напряжении, получим ток через тело в качестве первого приближения. Дальнейший анализ может быть проведен при добавлении цепи, которая более точно моделирует частотные характеристики тела. Например, были разработаны несколько фильтров, позволяющие скорректировать эффекты частотных фильтров, приведенные в ГОСТ Р 70646.2.

Для моделирования частотного коэффициента для реакции испуга и приведения входного сигнала к кривой *а* на рисунке А.19 предложена схема, изображенная на рисунке Б.1.

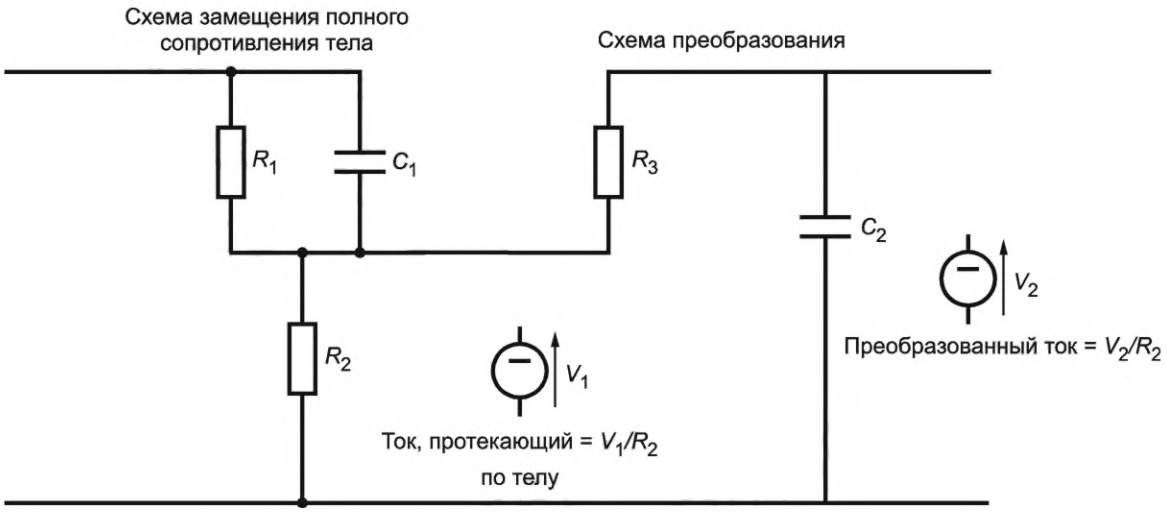


Схема замещения, с помощью которой можно преобразовать наблюдаемый ток и оценить ток через тело (значения выбраны для конкретных наблюдаемых токов)

Рисунок Б.1 — Поражение электрическим током в схеме замещения, включающей эффект реакции испуга

Параметры определены эмпирическим путем, причем R_1 и C_1 представляют полное сопротивление кожи, а R_2 — внутреннее активное сопротивление тела. Напряжение V_1 используют для получения действительного тока через тело, равного V_1/R_2. Вторая часть схемы, а именно сопротивление R_3 и емкость C_2, добавлены для учета частотного коэффициента для реакции испуга. Для второй части схемы входными данными является ток через тело,

а на выходе получают данные, откорректированные в частотном отношении для рассматриваемого вида реакции, которые и используют для определения реакции тела.

Примечание — Сопротивление R_1 обозначают также, как R_S, емкость C_1 — как C_S, сопротивление R_2 — как R_b.

Некоторые значения элементов схемы, которые могут быть использованы в частных случаях, приведены в таблице Б.1 (при моделировании тока в сердце, типичное значение которого может составлять от 5 % до 10 % значения общего внутреннего тока, значения R_3 и C_2 могут быть выбраны такими, для которых постоянная времени составляет 3 мс, что характерно для клетки сердца).

Таблица Б.1 — Примеры значений полного сопротивления тела (нескомпенсированного)

Путь протекания тока	Условия	R_1, Ом	C_1, нФ	R_2, Ом
Большая площадь контакта (~ 10 000 мм^2)				
Между кистями рук (или от кисти одной руки до ступни одной ноги)	Испытательное значение для наихудшего случая	1,5	220	500
Средняя площадь контакта (~ 1000 мм^2)				
Между кистями рук (или от кисти одной руки до ступни одной ноги)	Плоская ладонь, сухие условия	77	24	500
Между кистями рук (или от кисти одной руки до ступни одной ноги)	Ладонь охватывает электрод, сухие условия	25	50	400
От кисти руки до противоположного плеча	Ладонь охватывает электрод, сухие условия	9,5	200	250
От кисти руки до противоположного плеча	Ладонь охватывает электрод, влажные условия	1,5	220	250
От кисти руки до плеча/предплечья, плотное сжатие электрода	Ладонь охватывает электрод, влажные условия	1,5	500	200
Маленькая площадь контакта (~ 100 мм^2)				
От пальца руки до плеча/предплечья	Касание пальцем, сухие условия	60	7	800
От пальца руки до плеча/предплечья, сильное прижатие	Касание пальцем, влажные условия	12	20	250
Площадь контакта, близкая к наихудшему случаю	Площадь контакта с зондом 100 мм^2	15	20	250
См. ГОСТ Р МЭК 60601-1	Стандартное испытательное значение	0	0	1000

В ГОСТ Р МЭК 60990 представлены две схемы для коррекции частотного коэффициента: двухэлементная схема для коррекции частотного коэффициента порога чувствительности, приведенная выше, и трехэлементная схема коррекции частотного коэффициента порога отпускания и сковывания мышц. Эти схемы были тщательно проанализированы. С помощью этих схем моделируют инверсию кривой частотного коэффициента, в соответствии с ГОСТ Р МЭК 60990, что позволяет оценить предельное значение на низкой частоте, приведенное в стандарте на продукцию, вне зависимости от частоты измеряемого тока.

Моделирование любых условий поражения электрическим током, таких как порог чувствительности, порог отпускания или ток через сердце, вызывающий ФЖ, требует выбора правильных элементов для модели, применяемой при анализе. Если ток проникает в тело через кожу, то необходимо выбрать корректную модель кожи для заданных условий. При необходимости следует использовать нелинейные модели кожи.

В стандартах на продукцию, как правило, рассматривают наихудшие условия, чтобы получить максимальные значения тока и минимизировать риски поражения электрическим током. Для выбранных условий, с учетом поправки на частоту и других важных параметров, при расчетной оценке протекания тока через тела могут быть использованы обычные методы теории цепей.

Могут быть использованы другие методы моделирования. Например, используют модель всего тела, в которой для каждого объемного элемента тела, полученного при сканировании с помощью магниторезонансной или компьютерной томографии, задаются электрические параметры, характерные для условий поражения электрическим током. Размер элемента модели 1 мм считают достаточным для расчета распределения тока при относи-

тельно больших масштабах, но не достаточным для определения различий в протекании тока по тонким слоям, например оболочкам нервов. При таком моделировании обрабатывают большой объем данных с помощью компьютерных программ. Компьютерное моделирование позволяет выполнять расчеты при поражении электрическим током с существенно большей детализацией.

Эксперименты с животными, и адаптация полученных в них результатов к телу человека, позволят обосновать параметры воздействия токов более высоких частот.

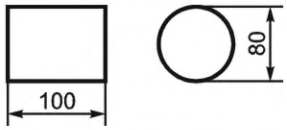
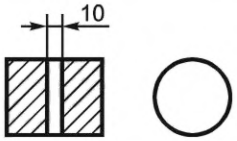
Приложение В
(обязательное)

Измерения общего полного сопротивления тела Z_T на живых людях и трупах и статистический анализ результатов

Для получения достоверных значений общего полного сопротивления тела Z_T живых людей применена следующая методика:

а) на живых людях проведены измерения с помощью электродов, показанных в таблице В.1, при протекании тока между кистями рук;

Таблица В.1 — Электроды, применяемые для измерений зависимости полного сопротивления тела человека Z_T от площади контакта с электрической цепью

Тип электрода	Форма контактной поверхности	Эффективная площадь контакта, мм^2 Порядок значений, мм^2	Форма электродов, вид спереди и сбоку, размеры в мм
A	Латунный цилиндр	Большая 8200 10 000	
B	Кольцо, ограниченное изоляционным покрытием (штриховка)	Средняя 1250 1000	
C	Квадрат, ограниченный изоляционным покрытием (штриховка)	Маленькая 100 100	
D	Цилиндр из изолирующего материала (штриховка) с электродом круглой формы	10	
E	Цилиндр из изолирующего материала (штриховка) с электродами круглой формы*, **	1	

* Были использованы четыре круглых электрода площадью 1 мм^2, расположенные в форме креста на расстоянии 30 мм от электрода в центре поверхности цилиндра в целях определения различий для разных мест расположения точек в пределах ладони.

** Результаты измерений с электродами данного типа показали низкую повторяемость.

б) выполнены измерения общего полного сопротивления тела Z_T для 100 человек при переменном напряжении 25 В частотой 50 Гц при большой площади контакта с электродом (тип А в таблице В.1) в сухих условиях. Значения фиксируют через 0,1 с после приложения напряжения. Полученные в результате анализа значения общего полного сопротивления тела для процентильного ранга, равного 5 %, 50 % и 95 % приведены в таблице В.2.

Таблица В.2 — Общие полные сопротивления Z_T, электроды типа А в сухих условиях, а также коэффициенты отклонения F_D для 5 % и 95 %

Условия	Z_T, Ом/F_D		
	5 %	50 %	95 %
Сухие	1750/0,54	3250	6100/1,88

в) проведены измерения общего полного сопротивления тела для 10 живых людей при средней и малой площади контакта с электродом (типов B и C соответственно, в таблице B.1) в сухих и влажных условиях, условиях увлажнения соленой водой при максимальной длительности протекания тока 25 мс. Результаты приведены в таблицах B.3 и B.4.

1) электрод типа B (площадь контакта приблизительно 1000 мм^2)

Таблица B.3 — Общие полные сопротивления Z_T, электроды типа B в сухих, влажных условиях, условиях увлажнения соленой водой, а также коэффициенты отклонения F_D для 5 % и 95 %

Условия	Z_T, Ом/F_D		
	5 %	50 %	95 %
Сухие	12 900/0,63	20 600	32 800/1,59
Влажные	5500/0,59	9350	15 900/1,70
Увлажнение соленой водой	1850/0,76	2425	3175/1,31

2) электрод типа C (площадь контакта приблизительно 100 мм^2)

Таблица B.4 — Общие полные сопротивления Z_T, в сухих, влажных условиях, условиях увлажнения соленой водой, а также коэффициенты отклонения F_D для 5 % и 95 %

Условия	Z_T, Ом/F_D		
	5 %	50 %	95 %
Сухие	80 400/0,48	169 000	355 500/2,10
Влажные	39 700/0,54	73 400	135 600/1,85
Увлажнение соленой водой	5400/0,74	7300	9875/1,35

Для приблизительных расчетов значения Z_T (5 % и 95 %) на основе значения Z_T (50 %) при U_T = 25 В приняты следующие значения коэффициента отклонения:

для сухих и влажных условий F_D (5 %) = 0,54 и F_D (95 %) = 1,88,

для условий увлажнения соленой водой F_D (5 %) = 0,74 и F_D (95 %) = 1,35.

Принято, что эти коэффициенты не зависят от площади контакта с электродом;

г) проведены измерения общего полного сопротивления тела Z_T одного живого человека при условиях, указанных в перечислениях а)— в), при воздействии напряжений прикосновения до 150 В включительно, а также при воздействии напряжений прикосновения до 200 В включительно в течение 0,03 с.

В экспериментах были выдержены следующие условия в отношении пути и длительности протекания тока:

серия испытаний А: эффективная площадь контакта с электродом 8250 мм^2, электроды удерживают двумя руками, длительность протекания тока 0,1 с (см. таблицу B.1, электроды типа A);

серия испытаний Б: эффективная площадь контакта с электродом 1250 мм^2, электроды удерживают двумя руками, длительность протекания тока при напряжении до 75 В включительно составляет несколько секунд, при напряжении выше 75 В — 0,1 с (см. таблицу B.1, электроды типа B);

серия испытаний В: эффективная площадь контакта с электродом 100 мм^2, электроды касаются середины ладоней, длительность протекания тока при напряжении до 75 В включительно составляет несколько секунд, при напряжении выше 75 В — 0,1 с (см. таблицу B.1, электроды типа C);

серия испытаний Г: эффективная площадь контакта с электродом 10 мм^2, электроды касаются середины ладоней, длительность протекания тока при напряжении до 100 В включительно составляет несколько секунд при напряжении выше 100 В — от 0,1 до 0,3 с (см. таблицу B.1, электроды типа D);

серия испытаний Д: эффективная площадь контакта с электродом 1 мм^2, электроды касаются середины ладоней, длительность протекания тока при напряжении до 150 В включительно составляет несколько секунд при напряжении выше 150 В — от 0,1 до 0,2 с, при этом на напряжении 220 В наблюдается пробой кожи (см. таблицу B.1, электроды типа E);

д) проведено измерение общего полного сопротивления тела при приложении переменного напряжения прикосновения от 25 до 200 В на частоте 50 Гц между кончиками правого и левого указательных пальцев (площадь контакта приблизительно 250 мм^2). Значения фиксировались через 20 мс после приложения напряжения. Напряжение прикладывалось в момент его прохождения через ноль.

Результаты приведены на рисунке A.6;

е) выполнены измерения на большом количестве трупов для пути протекания тока между кистями рук и от кисти руки до ступни ноги с применением больших электродов (площадь контакта приблизительно 9000 мм^2) при

воздействии напряжений прикосновения от 25 до 5 000 В в сухих условиях. Затем определены значения общего полного сопротивления для процентильных рангов, равных 5 %, 50 % и 95 %.

Значения фиксировались через 3 с после приложения напряжения;

ж) значения общего полного сопротивления для большой площади контакта с электродом, полученные при измерениях на трупах [см. перечисление е)], которые при напряжениях до 220 В включительно показывают избыточно высокое полное сопротивление кожи, модифицированы и согласованы с результатами, полученными при измерениях на живых людях.

При этом согласовании значения общего полного сопротивления тела трупов приведены к температуре тела живых людей 37 °С с помощью коэффициента снижения температуры $F_T = 0,7$;

и) общее полное сопротивление тела Z_T (50 %) для процентильного ранга населения равного 50 % может быть определено на основе данных, полученных при измерениях по перечислениям а) — г) при средней и малой площадях контакта с электродом для сухих и влажных условий, условий увлажнения соленой водой при напряжениях прикосновения U_T от 25 до 200 В;

к) все значения для процентильных рангов населения равных 5 % и 95 % могут быть рассчитаны с помощью значений Z_T (50 %) и коэффициентов отклонения F_D (5 %) и F_D (95 %) при большой, средней и малой площадях контакта в сухих, влажных условиях и условиях увлажнения соленой водой.

Указанные значения коэффициента отклонения F_D приведены в таблице В.5. Значения рассчитаны для напряжений прикосновения до 400 В включительно. От значений F_D (5 %) = 0,54 и F_D (95 %) = 1,88 для сухих и влажных условий при U_T = 25 В значения коэффициентов изменяются вслед за изменением полного сопротивления кожи до значений F_D (5 %) = 0,74 и F_D (95 %) = 1,35 для условий увлажнения соленой водой при U_T = 400 В, из-за того, что в условиях увлажнения соленой водой полное сопротивление кожи считают пренебрежимо малым.

Таблица В.5 — Коэффициенты отклонения F_D (5 %) и F_D (95 %) в диапазоне напряжений прикосновения U_T от 25 до 400 В включительно для сухих и влажных условий при большой, средней и малой площадях контакта с электродом

U_T, В	25	50	75	100	125	150	175	200	300	400
F_D (5 %)	0,54	0,55	0,565	0,575	0,585	0,6	0,615	0,625	0,68	0,74
F_D (95 %)	1,88	1,84	1,8	1,76	1,72	1,685	1,65	1,6	1,48	1,35

Для условий увлажнения соленой водой значения коэффициентов отклонения не зависят от напряжения прикосновения и составляют F_D (5 %) = 0,74 и F_D (95 %) = 1,35.

С помощью описанного метода рассчитаны значения общего полного сопротивления тела Z_T, приведенные в таблицах 1—9, для сухих, влажных условий и условий увлажнения соленой водой при большой, средней и малой площадях контакта с электродом для процентильных рангов населения, равных 5 %, 50 %, 95 %.

Приложение Г
(обязательное)

Зависимость общего полного сопротивления тела Z_T от частоты

Для получения реалистичных зависимостей общего полного сопротивления тела Z_T живых людей от частоты применена следующая методика:

а) проведены измерения на 10 живых людях при напряжении прикосновения 10 В на частотах от 25 до 20 кГц при протекании тока между кистями рук с использованием больших цилиндрических электродов (площадь контакта приблизительно 8000 мм^2) в сухих условиях.

Статистическими методами были определены значения общего полного сопротивления тела для процентильных рангов, равных 5 %, 50 %, 95 %;

б) из-за сильной мышечной реакции на протекание тока, измерения на напряжении 25 В и частотах от 25 Гц до 2 кГц проведены на одном живом человеке в условиях, аналогично перечислению а).

Значения фиксировались через 0,05 с после приложения напряжения.

Результаты этих измерений приведены на рисунках А.10 и А.11;

в) для формирования рисунка А.12 использованы данные рисунка А.10 для напряжения прикосновения 10 В и значения для напряжений прикосновения от 25 до 1000 В на частоте 50 Гц по таблице 1. На рисунке А.12 приведена зависимость общего полного сопротивления от частоты в диапазоне от 50 Гц до 2 кГц при напряжениях прикосновения в диапазоне от 10 до 1000 В для процентильного ранга населения, равного 50 %, а также прямая линия от 750 Ом на частоте 50 Гц до 600 Ом на частоте 2 кГц, являющихся предельными значениями на этих частотах;

г) значения общего полного сопротивления тела при частотах более 2000 Гц на рисунке А.12 получены в результате экстраполяции существующих данных.

Кривые для напряжений прикосновения от 50 до 1000 В (пунктирные линии на рисунке А.12) были изображены по аналогии с кривыми для напряжений 10 и 25 В, которые, в свою очередь, основаны на результатах измерений, описанных в перечислениях а) и б) настоящего приложения.

Приложение Д
(обязательное)

Общее активное сопротивление тела R_T на постоянном токе

Для получения реалистичных зависимостей общего активного сопротивления тела R_T живых людей применена следующая методика:

а) выполнены измерения на 50 живых людях при напряжении прикосновения 25 В постоянного тока без пульсаций для пути протекания тока между кистями рук с применением больших цилиндрических электродов (площадь контакта приблизительно 8000 мм^2) в сухих условиях.

Статистическими методами определены значения общего активного сопротивления тела R_T для процентильных рангов, равных 5 %, 50 %, 95 %;

б) в качестве значений общего активного сопротивления тела R_T на постоянном токе для напряжений прикосновения в диапазоне от 200 до 1000 В и предельных (асимптотических) значений взяты значения общего полного сопротивления тела на частоте 50 Гц при напряжении прикосновения более 200 В по таблице 1.

Значения общего активного сопротивления R_T для напряжений прикосновения от 25 до 200 В получены по кривой на рисунке А.13, повторяющей форму кривой Z_T на частоте 50 Гц.

Значения общего активного сопротивления тела R_T на постоянном токе, полученные по методу, описанному выше, приведены в таблице 10.

Примечание — Считают, что при напряжениях более 200 В различие между полным сопротивлением кожи на частоте 50 Гц и активным сопротивлением кожи на постоянном токе практически отсутствует.

Приложение Е
(обязательное)

Воздействие тока при его протекании по телу домашних животных

Е.1 Общие положения

В данном приложении приведены базовые сведения по воздействию электрического тока на домашних животных, которые предназначены для разработки требований по электробезопасности.

Следует принимать во внимание такие вопросы, как вероятность повреждения изоляции, вероятность прямого прикосновения к токоведущим частям или косвенного прикосновения к проводящим частям, напряжение прикосновения, напряжение сети, имеющийся опыт, техническую осуществимость и экономическую целесообразность. Эти параметры необходимо учитывать при разработке требований по безопасности, например, определении рабочих характеристик защитных устройств для электроустановок.

При защите от косвенного прикосновения для домашних животных критерием, на основании которого необходимо устанавливать требования по безопасности, является порог ФЖ. В настоящем приложении представлена информация по полному сопротивлению тела домашних животных и по пороговым значениям силы тока при ФЖ. Так как данных о полном сопротивлении животных существует мало, то в качестве основы для расчетов взяты минимальные значения полных сопротивлений крупного рогатого скота, измеренные между передними и задними конечностями (см. таблицу Е.2).

В настоящем приложении рассматриваются следующие виды животных, которые могут пострадать от воздействия электрического тока в сельских условиях: крупный рогатый скот, овцы, свиньи и лошади.

В приложении приведены значения полного электрического сопротивления тела домашнего животного в функции напряжения прикосновения, степени увлажнения шкуры или кожи и пути протекания тока.

В настоящее время значения сопротивлений определены только для крупного рогатого скота.

В настоящем приложении рассмотрены воздействия синусоидального переменного тока частотой от 15 до 100 Гц при протекании его по телу домашнего животного.

Е.2 Общий анализ риска возникновения ФЖ домашних животных

При заданном пути протекания тока по телу опасность, главным образом, зависит от силы и длительности протекания тока. Соотношения между силой тока и временем воздействия, рассмотренные в разделе 6, во многих случаях не применимы напрямую для проектирования защиты от поражения электрическим током. Необходимым критерием является допустимое значение напряжения прикосновения (т. е. произведение тока, протекающего по телу, и полного сопротивления тела) в функции времени воздействия. Соотношение между током и напряжением нелинейное, так как полное сопротивление тела животного меняется с изменением напряжения прикосновения и, таким образом, необходимо знать эту зависимость.

Различные части тела животного (такие как шкура, кожа, кровь, мышцы, другие ткани и суставы) имеют полное электрическое сопротивление, включающее в себя активную и емкостную составляющие. В частности, сухая шкура в диапазоне до нескольких сотен вольт часто имеет высокое активное сопротивление.

Значение этого сопротивления зависит от ряда факторов, в частности, вида животного, пути протекания тока, напряжения прикосновения, длительности протекания тока, его частоты, степени увлажнения шкуры и/или кожи, площади контакта с электрической цепью, давления в месте контакта и температуры.

Значения полных сопротивлений, приведенные в данном приложении, являются результатом тщательного анализа экспериментальных данных, полученных при измерениях, главным образом, на живых животных.

Данные о воздействиях в Е.5, в основном, получены на частоте 50/60 Гц, наиболее распространенных в электроустановках. Принято, что приведенные значения действительны в диапазоне частот от 15 до 100 Гц, при этом пороговые значения на границах этого диапазона частот выше, чем на частоте 50/60 Гц.

В данном приложении, в основном, рассмотрен риск возникновения ФЖ, которая является основной причиной летального исхода при несчастных случаях в этом диапазоне частот.

Е.3 Полное электрическое сопротивление тела домашних животных

Схема для определения полного сопротивления тела приведена на рисунке Е.1.

Также даны схемы для путей протекания тока, представляющих наибольший практический интерес, а именно, от носа до четырех конечностей и от передних до задних конечностей.

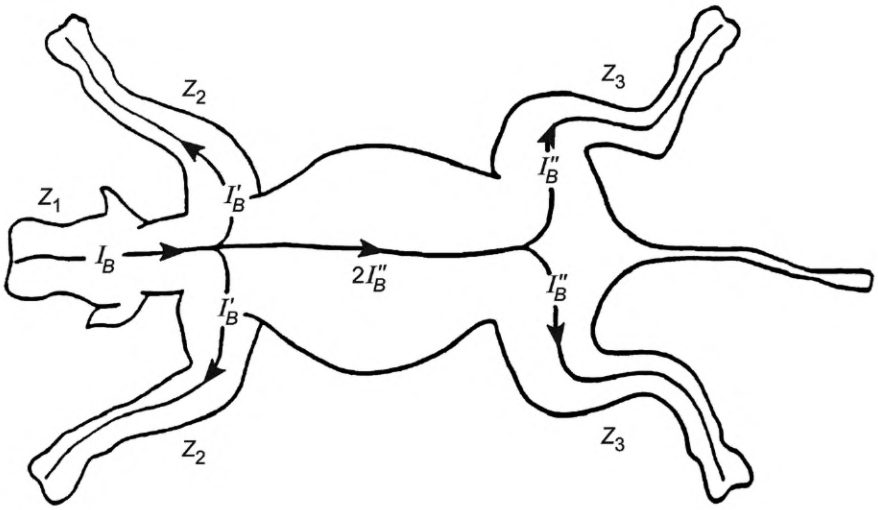


Рисунок Е.1 — Путь протекания тока и полное сопротивление соответствующих частей тела коровы при пути протекания тока от носа к четырем конечностям

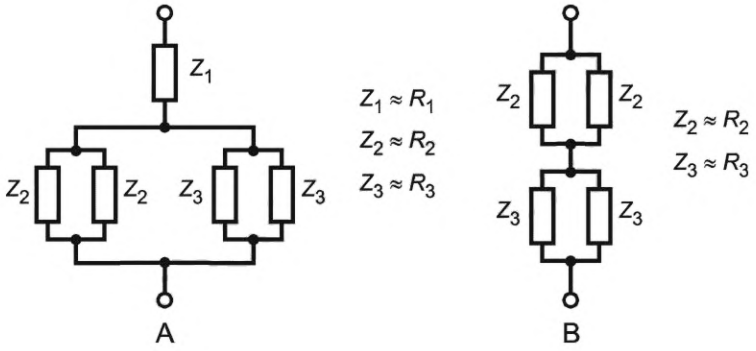


Рисунок Е.2 — Схемы замещения для животного при протекании тока от носа до четырех конечностей (путь А) и от передних конечностей к задним (путь В)

Примечание — Полное сопротивление копыт учтено в полном сопротивлении конечностей.

Е.4 Внутреннее полное сопротивление тела домашних животных Z_i

Внутреннее полное сопротивление тела может рассматриваться, главным образом, как резистивное. Его значение зависит, в основном, от пути протекания тока и, в меньшей степени, от площади контакта с электрической цепью. Для пути протекания тока от носа до всех четырех конечностей и от передних конечностей до задних, основное сопротивление имеют конечности (передние и задние). Упрощенные схемы, приведенные на рисунках Е.1 и Е.2, могут быть применены если сопротивлением туловища пренебрегают.

Результаты измерений показывают, что полное сопротивление задних конечностей меньше сопротивления передних конечностей (для коровы примерно наполовину).

Е.5 Полное сопротивление шкуры и кожи Z_p

Полное сопротивление шкуры сильно зависит от влажности. В сухих условиях шкура может считаться практически изолятором при напряжениях до 100 В включительно, имея значение Z_p в диапазоне от нескольких десятков до нескольких сотен килоом.

Полное сопротивление кожи может быть смоделировано схемой из активных сопротивлений и емкостей. Она состоит из полупроводящего слоя и, для животных с потовыми каналами (потовыми железами), из маленьких проводящих элементов. Полное сопротивление кожи снижается при возрастании тока.

Значение полного сопротивления кожи зависит от напряжения, его частоты, длительности протекания тока, площади контакта с электрической цепью, давления в месте контакта, степени увлажнения кожи и температуры.

Е.6 Полное (активное) сопротивление копыта Z_h, R_h

Полное сопротивление копыта, в основном, имеет резистивный характер. Для коровы при напряжениях до 230 В могут быть использованы значения, указанные ниже. Некоторые измерения, выполненные для копыта лошади (вместе с подковой) и для копыта овцы, показывают, что полное сопротивление лошадиных копыт несколько выше, а сопротивление овечьих копыт заметно выше полного сопротивления коровьих копыт.

Значения в таблице Е.1 получены при измерениях во влажных условиях (3 %-ный раствор хлорида натрия), на 10 копытах крупного рогатого скота разных размеров и массы. Результаты измерений обработаны статистически в предположении об их логарифмическом распределении и получены значения для процентильных рангов, равных 5 %, 50 %, 95 %. Значения фиксируют через 20 мс после начала протекания тока для напряжений в диапазоне частот от 10 до 200 В. От напряжения результаты практически не зависят.

Таблица Е.1 — Полное (активное) сопротивление копыт крупного рогатого скота (Z_h, R_h) для переменного напряжения до 230 В включительно частотой 50/60 Гц

Заданный процент поголовья	5 %	50 %	95 %
Значения сопротивления, Ом, не более	250	350	500

Е.7 Общее полное сопротивление тела Z_T

Общее полное сопротивление тела имеет резистивную и емкостную составляющие.

В сухих условиях благодаря изоляционным свойствам шкуры, Z_T может достигать значений от нескольких десятков до нескольких сотен килоом.

Для животного, стоящего на проводящей поверхности, сопротивление Z_T включает в себя полное сопротивление копыт, при их наличии.

Е.8 Начальное активное сопротивление тела R_0

В момент приложения напряжения прикосновения емкости тела не заряжены. По этой причине, сопротивлением кожи Z_p можно пренебречь. Вследствие этого, начальное активное сопротивление R_0 примерно равно сумме внутреннего полного сопротивления тела Z_i и сопротивления копыт, при их наличии. R_0 зависит, в основном, от пути протекания тока и, в меньше степени, от площади контакта с электрической цепью.

Начальное активное сопротивление R_0 ограничивает амплитуду тока коротких импульсов, например разряды от электроограждения.

Е.9 Значения общего полного сопротивления тела Z_T

В таблице Е.2 приведены значения общего полного сопротивления тела крупного рогатого скота на синусоидальном переменном токе частотой 50/60 Гц при пути протекания тока от носа до всех четырех конечностей и от передних до задних конечностей в сухих условиях для случая, когда животные стоят на проводящем полу.

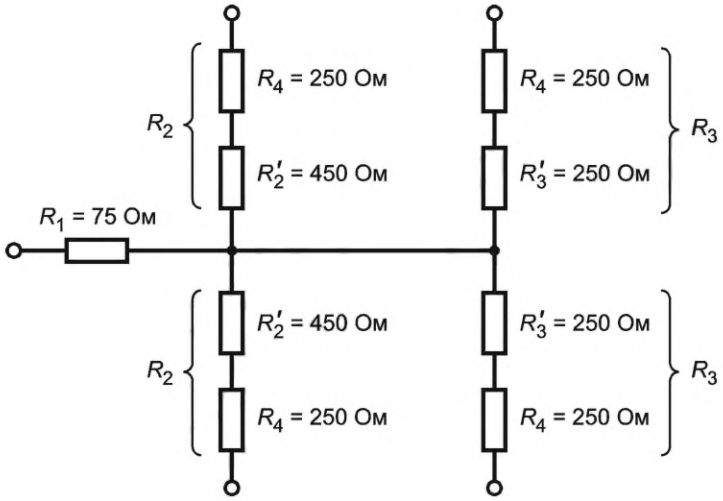
Примечание — Для других животных значения общего полного сопротивления тела неизвестны.

Измерения проведены при различных напряжениях и их результаты считают действительными для напряжений прикосновения до 230 В включительно. При напряжениях менее 100 В они могут рассматриваться в качестве консервативной оценки, обеспечивающей дополнительный уровень безопасности.

Таблица Е.2 — Полное сопротивление тела крупного рогатого скота Z_T для переменного напряжения до 230 В включительно частотой 50/60 Гц

Путь протекания тока	Значения сопротивления, которые не превышены для заданного процента поголовья, Ом		
	5 %	50 %	95 %
От носа к четырем конечностям	220	300	425
От передних конечностей к задним	600	850	1250
Примечание — Значения округлены при статистической обработке данных измерений для 80 голов крупного рогатого скота.			

На рисунке Е.3 приведена схема для общего полного сопротивления для 5 % поголовья крупного рогатого скота, полученная на основе данных таблиц Е.1 и Е.2.



Активное сопротивление R_1 — для пути протекания тока от носа до четырех конечностей

Активное сопротивление R_1=R'_2 + R_4 — для пути протекания тока от туловища до передних конечностей с копытами

Активное сопротивление R_3=R'_3 + R_4 — для пути протекания тока от туловища до задних конечностей с копытами

Активное сопротивление R'_2 — для пути протекания тока от туловища до передних конечностей без учета копыт

Активное сопротивление R'_3 — для пути протекания тока от туловища до задних конечностей без учета копыт

Рисунок Е.3 — Схема полного сопротивления тела крупного рогатого скота 5 % поголовья

Е.10 Значения начального активного сопротивления тела R_0

Измерения данного сопротивления не проводились.

Приняв, что для животных соотношение между значениями общего полного сопротивления тела Z_T и начального активного сопротивления R_0, такое же как для человека (по таблице Е.1 предельное значение для 5 % Z_T = 650 Ом и R_0 = 500 Ом для 5 % населения по 5.7), получим значения начального активного сопротивления тела R_0 крупного рогатого скота для процентного ранга, равного 5 % поголовья, приведенные в таблице Е.3.

Таблица Е.3 — Начальное активное сопротивление тела R_0 крупного рогатого скота

Путь протекания тока	Значения сопротивления, которые не превышены для 5 % поголовья, Ом
От носа к четырем конечностям	175
От передних конечностей к задним	450

Е.11 Воздействие синусоидального переменного тока частотой в диапазоне от 15 до 100 Гц на домашних животных

Е.11.1 Общие положения

Данные о воздействиях в Е.11, в основном, получены на частотах 50 или 60 Гц, наиболее распространенных в электроустановках. Принято, что приведенные значения действительны в диапазоне частот от 15 до 100 Гц, при этом пороговые значения на границах этого диапазона частот выше, чем на частотах 50/60 Гц.

В данном разделе, в основном, рассмотрен риск возникновения ФЖ, которая является основной причиной летальных исходов при несчастных случаях в этом диапазоне частот.

Е.11.2 Порог реакции

Пороги различных видов реакции зависят от ряда параметров, таких как площадь контакта тела с электродом, условия контакта (сухие, влажные, давление, температура), вида реакции (движение мышц, снижение выработки молока для коровы), а также от вида животного и его физиологических характеристик.

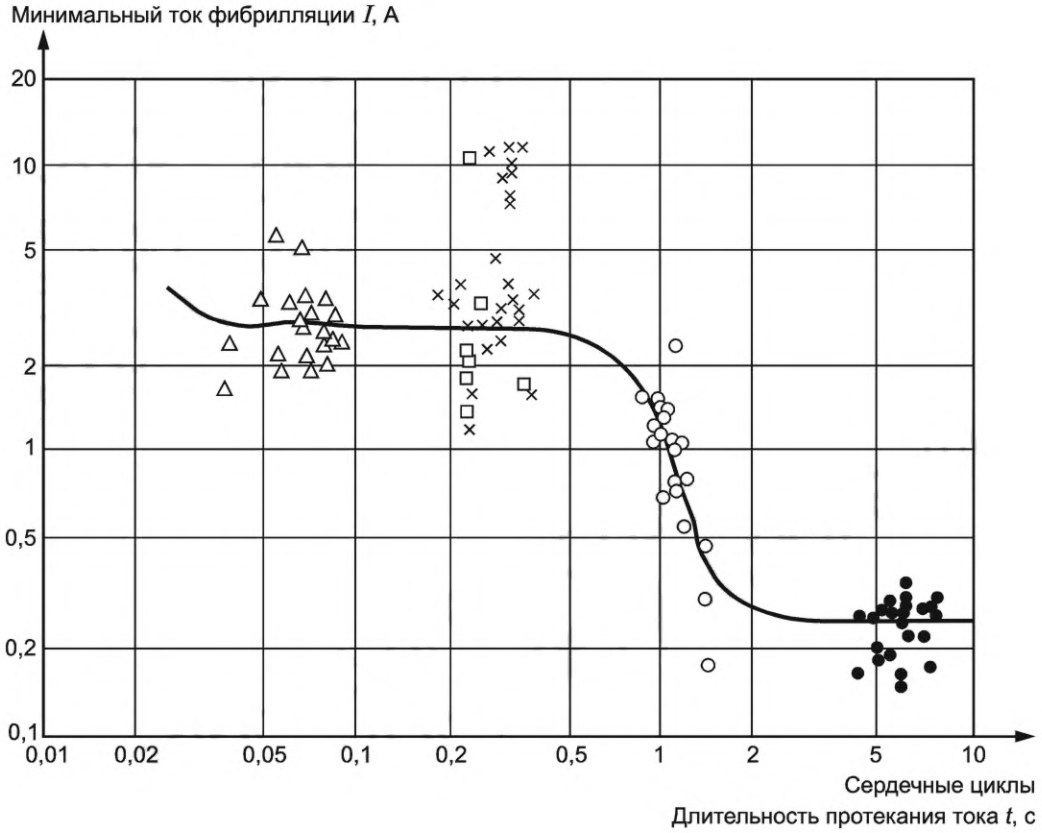
Некоторые измерения показывают, что порог реакции крупного рогатого скота составляет приблизительно 3 мА для каждой конечности. Отдельные исследования проведены с точки зрения способности убежать, выработки молока и т. п., но они не имеют практической пользы в отношении мер защиты от поражения электрическим током).

Е.11.3 Порог ФЖ

Пороги ФЖ зависят от вида животного и от его физиологических параметров (строение тела, состояние функции сердца и т. п.), а также от электрических параметров (длительность протекания тока, вид тока и т. п.).

Для синусоидальных токов частотой 50/60 Гц существует заметное снижение порога фибрилляции в случае, если ток протекает дольше длительности одного сердечного цикла. Причиной данного эффекта является увеличение неоднородности состояния возбуждения сердца вследствие экстрасистол, вызванных протеканием тока.

На рисунке Е.4 показано резкое изменение порога ФЖ для овец.



Примечание — Длительность воздействия дана кратно средней длительности сердечного цикла (0,45 с) на переменном напряжении частотой 60 Гц для пути протекания тока от передних конечностей к задним.

Длительность протекания тока:
Δ — 0,03 с; □ — 0,1 с; × — 0,12 с; ○ — 0,47 с; ● — 3 с

Рисунок Е.4 — ФЖ для овец

Таблица Е.4 — Порог ФЖ для различных видов домашних животных при протекании переменного тока частотой 50/60 Гц длительностью 3 с

Вид животного	Средняя масса		Минимальный ток фибрилляции	
	Тела, кг	Сердца, г	Средний, А	Диапазон, А
Свинья	79	300	0,24	От 0,17 до 0,27
Овца	56	270	0,25	От 0,16 до 0,39
Теленок	70	420	0,31	От 0,21 до 0,47
Пони	115	—	0,3	От 0,16 до 0,41
Примечание — Для лошадей данных для включения в таблицу недостаточно.				

Из этих данных следует, что порог ФЖ (см. таблицу Е.4) в пределах одного вида животных не зависит от массы животного. На рисунке Е.5 приведена зависимость минимального тока фибрилляции одного вида животных

(овцы) от массы тела. На рисунке Е.6 даны зависимости минимального тока ФЖ от массы для различных видов домашних животных.

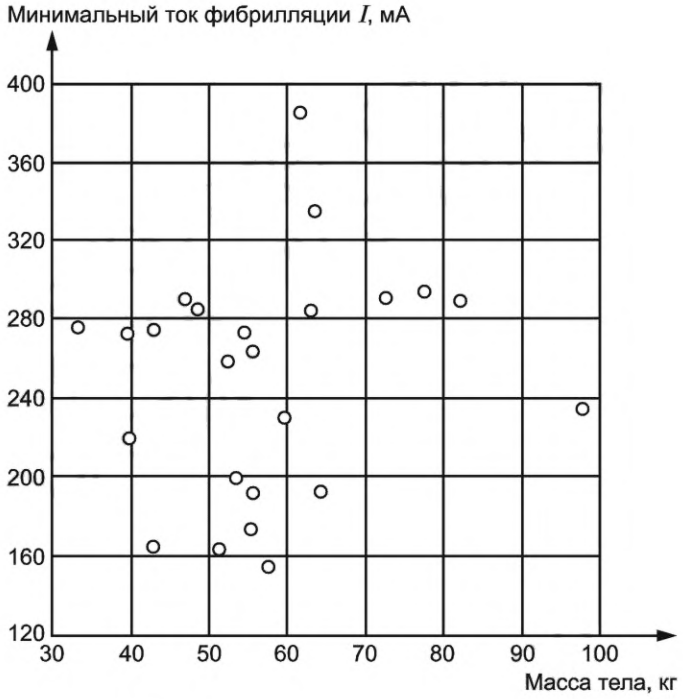


Рисунок Е.5 — Минимальный ток ФЖ для овец в зависимости от их массы для времени протекания тока 3 с

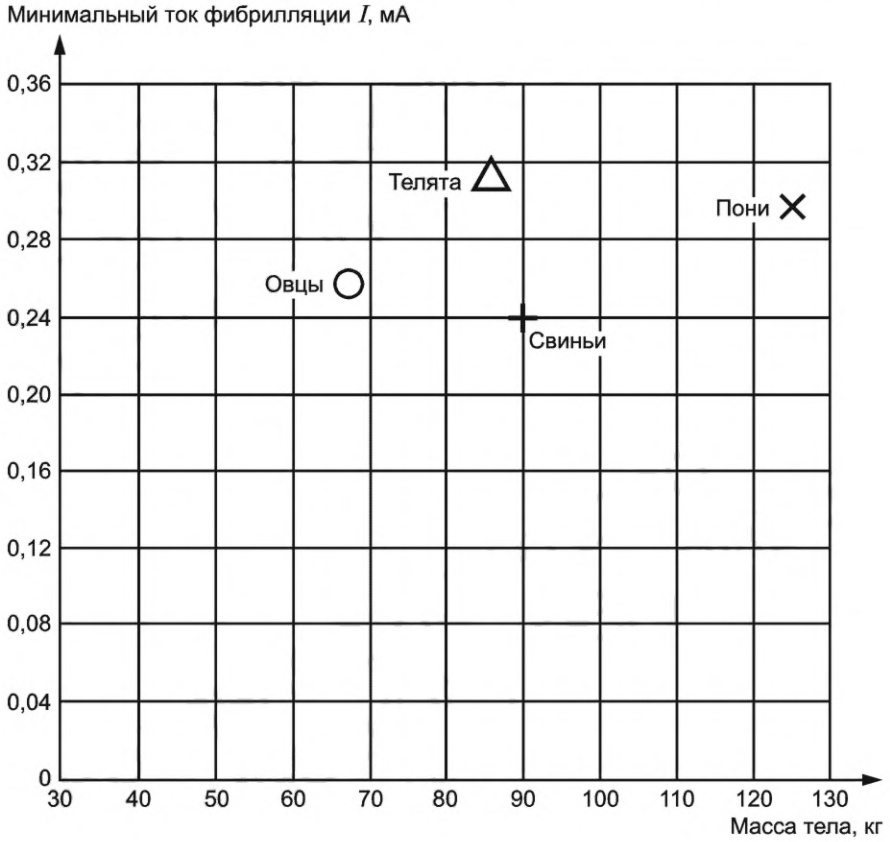


Рисунок Е.6 — Минимальный ток ФЖ (среднее значение) для различных видов животных в зависимости от их массы для времени протекания тока 3 с

Приложение Ж
(справочное)

Численные значения верхней границы уязвимости и нижней границы уязвимости

Порог ФЖ сердца при заданной форме сигнала тока — это минимальное значение тока, при протекании которого будет возникать ФЖ. Важно определить эти пороги для токов различных форм сигнала.

Дефибрилляция — это метод терапевтического воздействия, применяемый для прекращения ФЖ сердца. Этот процесс включает в себя прохождение импульсного тока большой амплитуды через сердце, находящееся в процессе ФЖ, имеющее целью ее прекращение.

Конструкция дефибриллятора не рассматривается в настоящем стандарте, однако, термины верхняя и нижняя границы уязвимости часто используют в этом смысле.

Существует диапазон значений токов, вызывающих ФЖ в случае, если они протекают в течение уязвимого периода. В современной литературе высказывают предположения, что такие же короткие импульсы значительной амплитуды, при их протекании вне пределов уязвимого периода, не вызывают ФЖ, а только инициируют дополнительное сокращение сердца. Если к сердцу в тот же момент сердечного цикла приложить короткие импульсы тока (длительностью от 3 до 10 мс), имеющие бóльшую амплитуду, то сердце подвергается надежной дефибрилляции. Этот уровень является верхней границей уязвимости миокарда. Многочисленные исследования показали, что он является порогом дефибрилляции миокарда, причем этот параметр важен, например, при определении настроек имплантируемого сердечного дефибриллятора.

Нижняя граница уязвимости представляет собой порог ФЖ.

Приложение И
(справочное)

Причины возникновения фибрилляции желудочков

Фибрилляция желудочков (ФЖ) — это явление, которое смогли изучить лучше после того, как были обнаружены электрические явления, сопровождающие работу сердца. Основной механизм этой ненормальной, как правило, приводящей к летальному исходу, сердечной деятельности состоит в том, что возникающие при ФЖ маленькие объемные круговые волны возбуждения снижают возможности по нагнетанию крови до минимального, неэффективного, локального уровня, в отличие от нормальных прямых, сильных и эффективных процессов возбуждения и сокращения желудочков.

Причина неожиданного перехода от нормальной сердечной деятельности к началу ФЖ лежит в естественной неоднородности в пределах фазы электрической реполяризации тканей желудочков. Данную фазу называют уязвимой, так как внешний импульс постоянного или переменного тока в течение этого периода может вызывать ФЖ. ФЖ может также возникать при быстром подхвате внешнего возбуждения тканями сердца.

Экспериментальные и теоретические исследования показали, что процессы оказались более сложными, чем только в отношении круговых волн возбуждения. Более сложные формы сигналов также приводят в выводу, что процессы возникновения и дальнейшего существования ФЖ имеют дополнительные влияющие факторы по сравнению с простой теорией повторного возбуждения. Эти открытия привели к развенчанию теории спиральных волн и появлению гипотезы одиночных и многократных маленьких волн.

Вероятность начала ФЖ увеличивает предшествующая экстрасистола желудочков, и чем более часто она возникает, тем более опасными могут быть последствия (см. ГОСТ Р 70646.2). Причиной этого явления становится увеличение неоднородности в течение реполяризации желудочков каждый раз, когда возникает экстрасистола. Внутренним слоям стенки желудочка требуется большее время для реполяризации, чем внешним, и эта разница возрастает с увеличением частоты возникновения экстрасистол, что формирует основу для начала ФЖ. Сказанное верно и для постоянного тока, что объясняет, почему происходит фибрилляция на постоянном токе.

Прекращение ФЖ называют дефибрилляцией. В настоящее время дефибрилляцию выполняют с помощью двухфазного разряда. Есть три основные теории дефибрилляции:

- прогрессивная деполяризация;
- повышение порога уязвимости;
- повторное возбуждение с помощью электрода.

Цель первой фазы дефибрилляционного разряда — сообщить заряд мембранам большей части клеток сердца с помощью разряда длительность от 3 до 10 мс. Цель второй фазы — вернуть заряд мембраны клеток к нулю.

Приложение К
(справочное)

Примеры расчетов Z_T

Расчеты токов прикосновения I_T важны для оценки мероприятий по защите от поражения электрическим током и для расследования несчастных случаев с электричеством.

Ток прикосновения I_T рассчитывают по формуле

$$I_T = \frac{U_T}{Z_T}, \quad (К.1)$$

где U_T — напряжение прикосновения;

Z_T — общее полное сопротивление тела человека при заданном пути протекания тока, площади контакта с электрической цепью и условиями в месте контакта.

Приведенные ниже расчеты основаны на данных соответствующих таблиц настоящего стандарта и выполнены для процентильного ранга, равного 50 % (т. е. для 50 % населения). Процентильный ранг, равный 50 % взят потому, что значения для него являются наиболее надежными со статистической точки зрения.

Приведены четыре примера расчетов:

1) напряжения прикосновения составляют 100 и 200 В, контакт с электрической цепью происходит в сухих условиях, ток протекает от кистей рук до ступней ног, площадь контакта для кистей рук средняя (порядка 1000 мм^2, таблица 4), для ступней — большая (таблица 1);

2) напряжения прикосновения составляют 100 В и 200 В, контакт с электрической цепью происходит в сухих условиях, ток протекает между кистями рук, площадь контакта маленькая (порядка 100 мм^2, таблица 7);

3) напряжение прикосновения составляет 25 В, контакт с электрической цепью происходит в условиях увлажнения соленой водой, ток протекает от кистей рук до туловища, площадь контакта для кистей рук большая (порядка 10 000 мм^2, таблица 3) и очень большая для туловища (сопротивлением кожи пренебрегают). Данная ситуация моделирует человека, сидящего на земле и обеими руками держащего устройство класса III (с питанием от сверхнизкого напряжения), в котором произошло повреждение изоляции;

4) в расчетах значения округлены с точностью до 5 Ом;

5) при напряжении прикосновения 1000 В и более площадь и условия контакта, вид напряжения не оказывают заметного влияния на значение активного сопротивления тела. Принятый путь протекания тока моделирует человека, сидящего на земле и прикасающегося головой к проводнику под высоким напряжением.

Пример 1— Напряжения прикосновения составляют 100 и 200 В переменного напряжения частотой 50/60 Гц, контакт с электрической цепью происходит в сухих условиях, ток протекает от кистей рук до ступней ног, площадь контакта для кистей рук средняя, для ступней — большая.

Приняты следующие условные обозначения:

Z_{TA} (H-H) — общее полное сопротивление тела при большой площади контакта с электрической цепью и пути протекания тока между кистями рук;

Z_{TA} (H-F) — общее полное сопротивление тела при большой площади контакта с электрической цепью и пути протекания тока от кисти руки до ступни ноги;

Z_{TA} (H-T) — общее полное сопротивление тела при большой площади контакта с электрической цепью и пути протекания тока от кисти руки до туловища;

Z_{TA} (H-T) = Z_{TA} (H-H)/2;

Z_{TA} (T-F) — общее полное сопротивление тела при большой площади контакта с электрической цепью и пути протекания тока от туловища до ступни ноги;

Z_{TA} (T-F) = Z_{TA} (H-F) — Z_{TA} (H-T);

Z_{TB} (H-H) — общее полное сопротивление тела при средней площади контакта с электрической цепью и пути протекания тока между кистями рук.

Значения Z_{TA} (H-H) для большой площади контакта приведены в таблице 1, значения Z_{TB} (H-H) для средней площади контакта — в таблице 4.

Расчет для процентильного ранга, равного 50 %, выполняют следующим образом.

Z_{TA} (H-H) составляет 1725 Ом (при 100 В) и 1275 Ом (при 200 В) для пути протекания тока от кисти руки до ступни ноги с коэффициентом 0,8.

Примечание — Согласно некоторым измерениям значение полного сопротивления для пути протекания тока от кисти руки до ступни ноги ниже полного сопротивления для пути протекания тока между кистями рук на 10 % — 30 %. Взяв в качестве среднего значения 20 %, получим коэффициент 0,8.

Z_{TA} (H-F) составляет 1380 Ом при 100 В и 1020 Ом при 200 В.

Z_{TA} (Н-Т) вычисляют по формуле Z_{TA} (Н-Т) = Z_{TA} (Н-Н)/2.

Z_{TA} (Н-Т) = 860 Ом при 100 В и Z_{TA} (Н-Т) = 635 Ом при 200 В.

Отсюда, с учетом Z_{TA} (Т-F) = Z_{TA} (Н-F) — Z_{TA} (Н-Т), получаем Z_{TA} (Т-F) = 520 Ом при 100 В и Z_{TA} (Т-F) = = 385 Ом при 200 В.

Для средней площади контакта (порядка 1000 мм^2) из таблицы 4: Z_{TB} (Н-Н) = 5200 Ом при 100 В и Z_{TB} (Н-Н) = = 2200 Ом при 200 В.

Отсюда, с учетом Z_{TB} (Н-Т) = Z_{TB} (Н-Н)/2, получаем Z_{TB} (Н-Т) = 2600 Ом при 100 В и Z_{TB} (Н-Т) = 1100 Ом при 200 В.

Общее полное сопротивление тела $Z_T' = Z_{TA}$ (Т-F) + Z_{TB} (Н-Т).

Z_T' = 3120 Ом при 100 В и Z_T' = 1485 Ом при 200 В.

При параллельном соединении двух путей кисть руки — стопа ноги $Z_T = Z_T'/2$, тогда Z_T = 1560 Ом при 100 В и Z_T = 740 Ом при 200 В.

Отсюда ток прикосновения I_T = 65 мА (при 100 В) и I_T = 270 мА (при 200 В).

Результаты расчетов объединены в таблице К.1.

Таблица К.1 — 50-й процентиль общего полного сопротивления для пути протекания тока от кистей обеих рук до ступней обеих ног при средней площади контакта для кистей рук и большой площади контакта для ступней ног, с учетом коэффициента снижения 0,8, токи прикосновения I_T и электрофизиологические реакции

Напряжение прикосновения, В	Полное сопротивление для пути кисть руки — туловище Z_{TB} (Н-Т), Ом	Полное сопротивление для пути кисть руки — ступня ноги Z_{TA} (Т-F), Ом	Полное сопротивление для пути обеих кисти рук — ступни обеих ног Z_T, Ом	Ток прикосновения I_T, мА	Электрофизиологическая реакция при длительности протекания тока t от 10 до 30 мс
100	2600	520	1560	65	Короткие подергивания
200	1100	385	740	270	Тяжелое поражение электрическим током, скачок на месте, судороги в руках

Следует обратить внимание на тот факт, что при U_T = 200 В ток прикосновения в четыре раза выше, чем при 100 В. Если длительность протекания тока превысит 0,2 с, то с высокой вероятностью произойдет ФЖ.

Пример 2 — Напряжения прикосновения составляют 100 и 200 В переменного напряжения частотой 50/60 Гц, контакт с электрической цепью происходит в сухих условиях, ток протекает между кистями рук, площадь контакта маленькая (электроды типа С, таблица 7).

Общее полное сопротивление тела при малой площади контакта в сухих условиях согласно таблице 7 Z_{TC} (Н-Н) составляет 40 кОм при U_T = 100 В и 5,4 кОм при U_T = 200 В.

Токи прикосновения составят I_T = 2,5 мА при 100 В и I_T = 37 мА при 200 В, причем последнее значение все еще ниже порога ФЖ. При большей длительности протекания тока (несколько секунд) после пробоя кожи (Z_T составит приблизительно 1000 Ом), I_T превысит 0,1 А, что станет причиной летального исхода.

Пример 3 — Напряжение прикосновения составляет 25 В переменного напряжения частотой 50/60 Гц, контакт с электрической цепью происходит в условиях увлажнения соленой водой, ток протекает от кистей рук до туловища, площадь контакта для кистей рук большая и очень большая для туловища (сопротивлением кожи пренебрегаем).

Общее полное сопротивление тела Z_T (Н-Н) = 1300 Ом принимают по таблице 3 для процентильного ранга, равного 50 %.

Отсюда, с учетом Z_{TA} (Н-Т) = Z_{TA} (Н-Н)/2 = 650 Ом.

При руках, прикоснувшихся параллельно, получим Z_T = Z_{TA} (Н-Т)/2 =325 Ом.

Отсюда ток прикосновения I_T = 77 мА.

Несмотря на применение безопасного сверхнизкого напряжения, происходит поражение электрическим током, сопровождаемое сильными невынужденными мышечными реакциями, находящимися далеко за порогом отпускания.

Пример 4 — Предельные значения полного сопротивления при пути протекания тока между кистями рук для напряжений 1000 В и выше для 5 %, 50 % и 95 % населения составляют 575, 775 и 1050 Ом соответственно. При таком напряжении сопротивление кожи пренебрежимо мало. При определении сопротивления Z_T с помощью рисунка А.2, значения сопротивления при пути протекания между кистями рук должны быть снижены от 10 % до 30 %, как указано в примечании 1 к таблицам 1 — 3. Принимая среднее значение 20 %, получаем значение полного сопротивления для пути протекания от кисти руки до ступни ноги 460, 620 и 840 Ом соответственно.

С учетом коэффициентов, приведенных на рисунке А.2, расчет общего полного сопротивления Z_T тела человека, сидящего на земле и касающегося головой проводника под высоким напряжением, выглядит следующим образом:

для 5 % Z_T = 460(0,10 + 0,013) = 52 Ом;

для 50 % Z_T = 70 Ом;

для 95 % Z_T = 95 Ом.

В данном примере значения токов прикосновения составят десятки ампер и при бóльших напряжениях будут увеличиваться.

Библиография

[1] Долин П. А. Основы техники безопасности в электроустановках: Учебное пособие для вузов. — М.: Энергия, 1979

[2] Карякин Р. Н. Заземляющие устройства электроустановок. Справочник. — М: ЗАО «Энергосервис», 2006

[3] Руководство ИСО/МЭК 51. Вопросы безопасности. Руководящие указания по их включению в стандарты

УДК 621.316.92:006.354 ОКС 13.260

Ключевые слова: воздействие электрического тока на людей и домашних животных, общие аспекты, требования, полное электрическое сопротивление тела, пороговые значения тока через тело

Редактор *Н.В. Таланова*
Технический редактор *В.Н. Прусакова*
Корректор *С.В. Смирнова*
Компьютерная верстка *Е.А. Кондрашовой*

Сдано в набор 19.06.2023. Подписано в печать 06.07.2023. Формат 60×84⅛. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 6,98. Уч.-изд. л. 6,78.

Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

Создано в единичном исполнении в ФГБУ «Институт стандартизации»
для комплектования Федерального информационного фонда стандартов,
117418 Москва, Нахимовский пр-т, д. 31, к. 2.

gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru

gost.e-ecolog.ru