ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р 70646.2— 2023

ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА НА ЛЮДЕЙ И ДОМАШНИХ ЖИВОТНЫХ

Часть 2

Специальные аспекты

(IEC 60479-2:2019, 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 19 июня 2023 г. № 406-ст

4 Настоящий стандарт разработан с учетом основных нормативных положений международного стандарта МЭК 60479-2:2019 «Воздействие электрического тока на людей и домашних животных. Часть 2. Специальные аспекты» (IEC 60479-2:2019 «Effects of current on human beings and livestock — Part 2: Special 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 Воздействие переменных токов частотой выше 100 Гц 3
5.1 Общие положения 3
5.2 Воздействие переменного тока частотой от 100 до 1000 Гц включительно 4
5.3 Воздействие переменного тока частотой от 1000 до 10 000 Гц включительно 6
5.4 Воздействие переменного тока частотой свыше 10 000 Гц 7
6 Воздействие токов особой формы сигнала 7
6.1 Общие положения 7
6.2 Эквивалентные значения, частота и порог 8
6.3 Воздействие переменного тока с постоянной составляющей 8
7 Воздействие переменных токов с фазовым регулированием 14
7.1 Формы сигналов и пороговые значения частот и токов 14
7.2 Порог реакции испуга и порог отпускания 15
7.3 Порог фибрилляции желудочков 16
8 Воздействие переменных токов с многопериодным регулированием 16
8.1 Формы сигналов и частоты 16
8.2 Порог реакции испуга и порог отпускания 17
8.3 Порог фибрилляции желудочков 17
9 Оценка эквивалентного порога для тока, содержащего составляющие нескольких частот 18
9.1 Пороги чувствительности и отпускания 18
9.2 Порог фибрилляции желудочков 18
10 Воздействие серий импульсов тока и токов нестандартной, сложной и случайной форм сигнала . 18
10.1 Порог ФЖ для серий импульсов тока с интервалами 300 мс и более между отдельными импульсами 18
10.2 Порог ФЖ для серий импульсов тока с интервалами менее 300 мс между отдельными импульсами 19
11 Воздействие электрического тока на тело человека, погруженное в воду 23
11.1 Общие положения 23
11.2 Удельное электрическое сопротивление водных растворов и тела человека 23
11.3 Кондуктивные токи, протекающие по телу, погруженному в воду 25
11.4 Физиологические реакции, вызываемые токами, протекающими по телу, погруженному в жидкость 25
11.5 Пороговые значения тока 26
11.6 Безопасные значения напряжений 27
12 Воздействие однократных однополярных импульсов тока малой длительности 27
12.1 Общие положения 27
12.2 Воздействие однополярных импульсов тока малой длительности 27
12.3 Порог чувствительности и болевой порог при разряде конденсатора 29
12.4 Порог фибрилляции желудочков 31
Приложение А (обязательное) Анализ сигналов нестандартной, сложной и случайной форм 34
Библиография 40

Введение

Настоящий стандарт является второй частью серии стандартов ГОСТ Р 70646.

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

В стандарте приведено воздействие следующих видов электрического тока, проходящих по телу человека:

- переменный ток синусоидальной формы с постоянными составляющими;
- переменный ток синусоидальной формы с фазовым регулированием;
- переменный ток синусоидальной формы с многопериодным регулированием;
- эквивалентные пороговые значения для тока, состоящего из нескольких составляющих разной частоты;
- серии импульсов тока и токи нестандартных, сложных и случайных форм;
- электрический ток, проходящий через тело человека, погруженное в воду;
- однополярный однократный импульс тока малой длительности.

В настоящем стандарте приведены дополнительные данные о воздействии токов синусоидальной формы частотой до 150 кГц к рассмотренным в ГОСТ Р 70646.1.

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА НА ЛЮДЕЙ И ДОМАШНИХ ЖИВОТНЫХ

Часть 2
Специальные аспекты

Effects of current on human beings and livestock. Part 2. Special aspects

Дата введения — 2023—08—01

1 Область применения

Настоящий стандарт распространяется на воздействие переменного синусоидального тока частотой более 100 Гц.

Настоящий стандарт распространяется на воздействие следующих видов электрического тока, проходящих по телу человека:

- переменный ток синусоидальной формы с постоянными составляющими,
- переменный ток синусоидальной формы с фазовым регулированием,
- переменный ток синусоидальной формы с многопериодным регулированием.

Для этих форм переменного тока описанные воздействия действительны только для частот от 15 до 100 Гц.

Настоящий стандарт распространяется на воздействие токов, имеющих форму однократного или многократных последовательных однополярных прямоугольных импульсов, синусоидальных импульсов и импульсов, являющихся результатом разрядов конденсатора, длительностью от 0,1 до 10 мс включительно.

В настоящем стандарте приведены способы анализа воздействия токов, имеющих случайную, сложную, нестандартную формы сигнала.

Настоящий стандарт распространяется только на кондуктивные токи, протекающие вследствие прямого приложения источника тока к телу, по ГОСТ Р 70646.1.

Стандарт не распространяется на токи, наводимые в теле вследствие воздействия внешнего электромагнитного поля.

Настоящий стандарт не предназначен для использования производителями продукции или органами по сертификации.

Настоящий стандарт предназначен для применения при разработке стандартов по безопасности в соответствии с положениями ГОСТ IEC Guide 104 (см. также [1]).

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 IEC 60050-551—2022 Международный электротехнический словарь. Часть 551. Силовая электроника

ГОСТ Р 70646.1—2023 Воздействие электрического тока на людей и домашних животных. Часть 1. Общие аспекты

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

Издание официальное

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 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 термины по ГОСТ Р 70646.1, а также следующие термины с соответствующими определениями:

3.1 **частотный коэффициент F_f** (frequency factor, F_f): Соотношение порогового значения тока на частоте f к пороговому значению тока на частоте 50/60 Гц для рассматриваемого физиологического эффекта.

Примечание — Частотный коэффициент различен для эффектов чувствительности, отпускания и ФЖ.

3.2

фазовое регулирование (phase control): Процесс изменения в пределах цикла момента, когда электронный вентильный прибор или плечо переходит в проводящее состояние.

[ГОСТ IEC 60050-551—2022, статья 551-16-23]

3.3 **угол регулирования фазы [задержки включения]** (phase control angle, current delay angle): Время, выраженное в угловых единицах, на которое момент отпирания вентиля задерживается системой фазового регулирования.

3.4

многопериодное регулирование (multicycle control): Изменение отношения между числом периодов, соответствующих открытому состоянию главного плеча, и числом периодов, соответствующих закрытому состоянию.

[ГОСТ IEC 60050-551—2022, статья 551-16-31]

3.5

коэффициент многопериодного регулирования p (multicycle control factor, p): Отношение между числом проводящих периодов и суммой чисел проводящих и непроводящих периодов в случае многопериодного управления.

[ГОСТ IEC 60050-551—2022, статья 551-16-37]

3.6 **удельная энергия фибрилляции F_e** (specific fibrillating energy, F_e): Минимальное значение выражения $I^2 \cdot t$ для однополярного импульса малой длительности, который при заданных условиях (путь протекания тока, фаза сердечного цикла) с определенной вероятностью вызывает фибрилляцию желудочков.

Примечания

1 F_e определяют формой импульса с помощью выражения $\int_0^{t_i} i^2 dt$, где t_i определено на рисунках 20 и 21. F_e, умноженное на активное сопротивление тела, дает энергию, рассеиваемую в теле человека при протекании импульса тока.

2 F_e выражают в Вт · с/Ом или $А^2 \cdot с$.

3.7 **удельный заряд фибрилляции F_q** (specific fibrillating charge, F_q): Минимальное значение выражения $I \cdot t$ для однополярного импульса малой длительности, который при заданных условиях (путь протекания тока, фаза сердечного цикла) с определенной вероятностью вызывает фибрилляцию желудочков.

Примечания

1 F_q определяют формой импульса с помощью выражения $\int_0^{t_i} idt$, где t_i определено на рисунках 20 и 21.

2 F_q выражают в Кл или А · с.

3.8 **постоянная времени** (time constant): Время, за которое величина, убывающая по экспоненциальному закону, снижается в $1/e = 0{,}3679$ раз от амплитудного значения.

Примечание — См. также [2], статья 801-21-45.

3.9 **время воздействия (конденсатора) t_i** (shock duration, t_i): Промежуток времени от начала разряда до момента, когда ток разряда снижается до 5 % своего максимального значения.

Примечание — Если постоянная времени разряда конденсатора равна T, то время воздействия разряда конденсатора составляет $3T$. За время воздействия разряда конденсатора практически вся энергия импульса рассеивается.

3.10 **время воздействия (для сложной асимптотически снижающейся формы сигнала) t_i** (shock duration (for complex asymptotic waveform), t_i): Минимальная длительность части импульса, которая содержит 95 % всей энергии импульса.

3.11 **порог чувствительности** (threshold of perception): Минимальное значение электрического заряда, которое при заданных условиях вызывает у человека, через тело которого он протекает, любое ощущение.

3.12 **болевой порог** (threshold of pain): Максимальное значение электрического заряда $(I \cdot t)$ или удельной энергии $(I^2 \cdot t)$, которое в виде импульса может быть приложено к человеку, держащему в руках большие электроды, без ощущения боли.

3.13 **боль** (pain): Неприятные ощущения и эмоции, связанные с действительным или возможным повреждением тканей.

4 Сокращения

В настоящем стандарте применены следующие сокращения:

ВТ — вероятный ток;

ДТ — допустимый ток;

ССС — случайный сложный сигнал;

ФЖ — фибрилляция желудочков;

ФНЧ — низкочастотный фильтр;

АС — переменный ток;

DC — постоянный ток.

5 Воздействие переменных токов частотой выше 100 Гц

Примечание — Значения для частот 50/60 Гц приведены в ГОСТ Р 70646.1. Для частот до 100 Гц включительно применяют положения ГОСТ Р 70646.1.

5.1 Общие положения

В современных электроустановках все чаще используют электроэнергию в виде переменного тока частотой более 50/60 Гц, например: применение в самолетах (400 Гц), электроинструменты и электросварочные аппараты (в основном до 450 Гц), электротерапия (в основном от 4000 до 5000 Гц) и импульсные источники электропитания (от 20 кГц до 1 МГц).

Экспериментальные данные, приведенные в настоящем разделе, могут быть использованы в целях оценки рисков для рассматриваемых частотных диапазонов.

Для подтверждения существующих оценок частотного коэффициента порога ФЖ с применением последних технологий и методов продолжаются экспериментальные исследования по определению влияния токов высоких частот.

Полное электрическое сопротивление человеческой кожи обратно пропорционально частоте для напряжений прикосновения порядка десятков вольт. Полное электрическое сопротивление кожи на частоте 500 Гц составляет примерно одну десятую от сопротивления кожи на частоте 50 Гц и во многих случаях может не учитываться. Вследствие этого полное сопротивление тела человека на таких частотах снижается до значения его внутреннего сопротивления Z_i (см. ГОСТ Р 70646.1).

Примечание — Рекомендуется применять измерение амплитуд тока для тех уровней, которые вызывают физиологические реакции чувствительности, испуга и неотпускания. Физиологическая реакция на несинусоидальные и содержащие составляющие нескольких частот токи наилучшим образом определяется амплитудным значением выходного сигнала измерительной цепи с взвешивающим фильтром аналогично тем, что приведены в ГОСТ Р МЭК 60990.

Рассматриваемые взвешивающие фильтры обеспечивают затухание сигнала в соответствии с частотными коэффициентами, приведенными в разделе 4 ГОСТ Р 70646.1—2023, таким образом, что выходной сигнал соответствует постоянному уровню физиологической реакции. Для кратковременных импульсов тока обеспечивается затухание сигналов, которые в противном случае вызвали бы меньшую физиологическую реакцию вследствие малой продолжительности их амплитудного значения. На выходе фильтра получается фиксированное значение, не зависящее от формы сигнала или наличия комбинации частот, которое может быть использовано для простого определения тока утечки и оценки существующего уровня опасности.

Сравнимые физиологические реакции вызывают несинусоидальные и синусоидальные токи, для которых с помощью данного метода измерений генерируются такие же амплитудные значения.

Типичный пример такого фильтра приведен в ГОСТ Р МЭК 60990.

5.2 Воздействие переменного тока частотой от 100 до 1000 Гц включительно

5.2.1 Порог чувствительности

Зависимость частотного коэффициента от частоты для порога чувствительности приведена на рисунке 1.

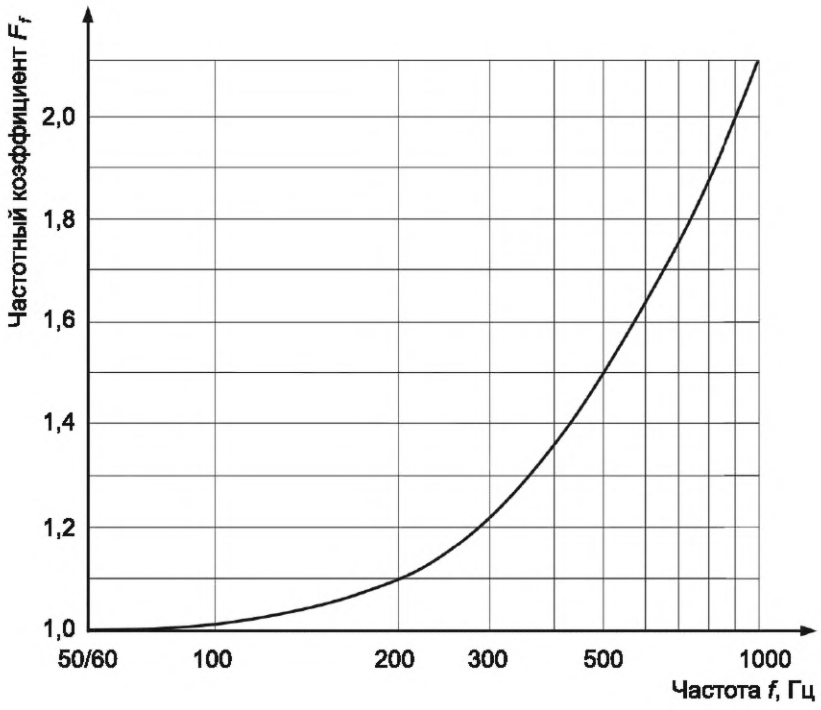


Рисунок 1 — Изменение порога чувствительности для диапазона частот от 50/60 до 1000 Гц

5.2.2 Порог отпускания

Зависимость частотного коэффициента от частоты для порога отпускания приведена на рисунке 2.

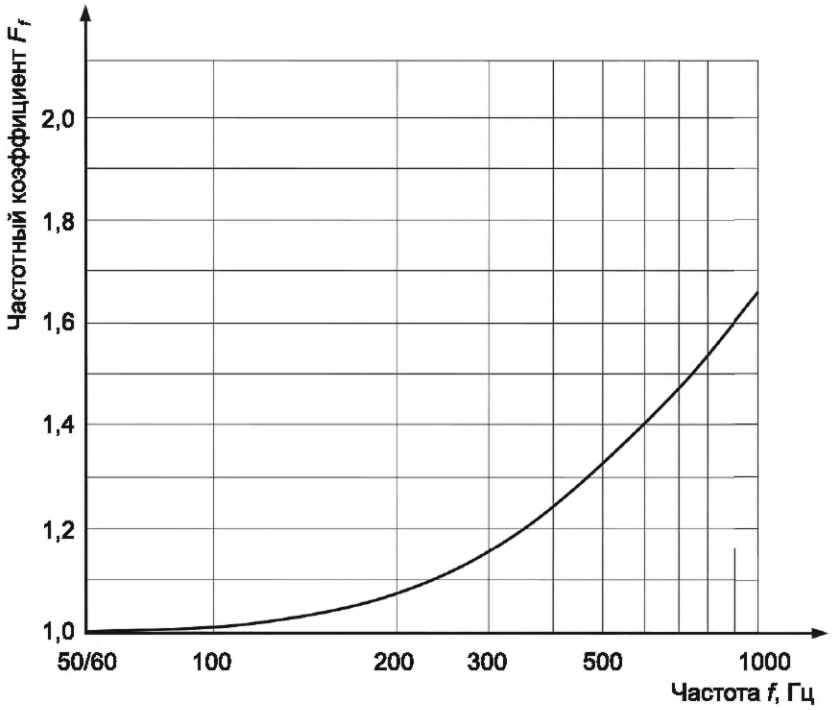


Рисунок 2 — Изменение порога отпускания для диапазона частот от 50/60 до 1000 Гц

5.2.3 Порог фибрилляции желудочков

На рисунке 3 приведена зависимость частотного коэффициента от частоты для порога ФЖ при протекании тока вдоль тела человека при времени воздействия больше длительности сердечного цикла.

Для времени воздействия менее длительности сердечного цикла экспериментальные данные по влиянию частоты отсутствуют.

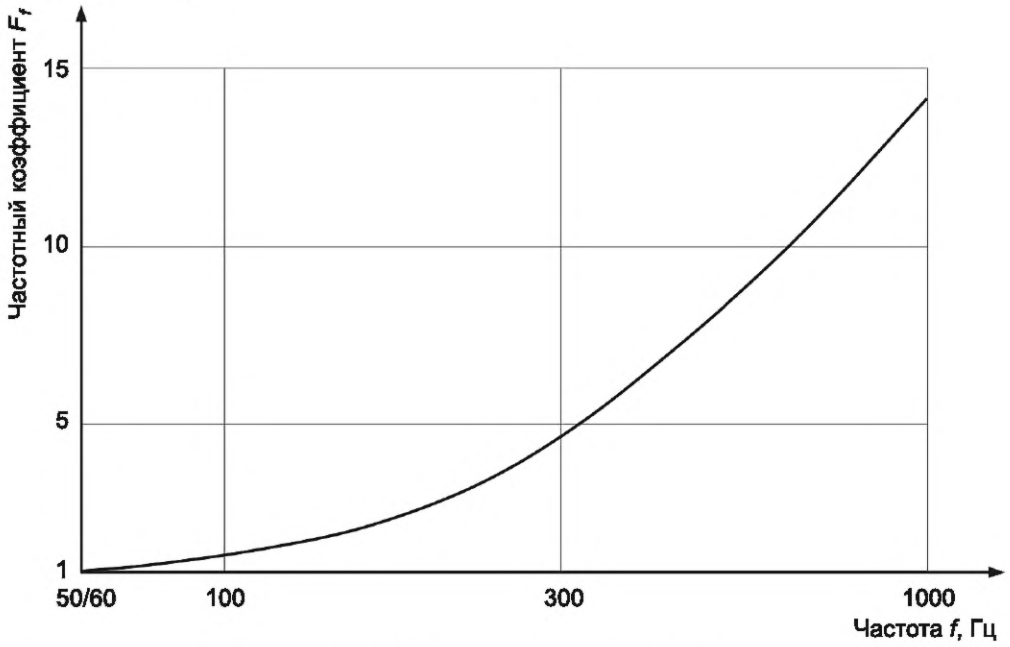


Рисунок 3 — Изменение порога ФЖ для диапазона частот от 50/60 до 1000 Гц (при этом время воздействия превышает длительность одного сердечного цикла, а ток протекает вдоль тела человека)

5.3 Воздействие переменного тока частотой от 1000 до 10 000 Гц включительно

5.3.1 Порог чувствительности

Зависимость частотного коэффициента от частоты для порога чувствительности приведена на рисунке 4.

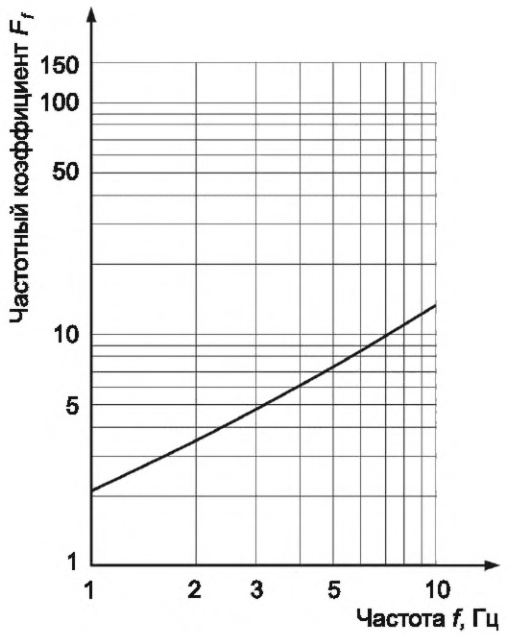


Рисунок 4 — Изменение порога чувствительности для диапазона частот от 1000 до 10 000 Гц

5.3.2 Порог отпускания

Зависимость частотного коэффициента от частоты для порога отпускания приведена на рисунке 5.

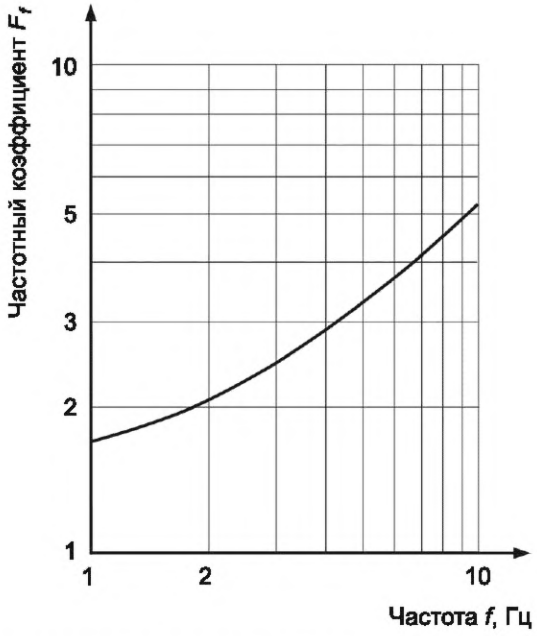


Рисунок 5 — Изменение порога отпускания для диапазона частот от 1000 до 10 000 Гц

5.3.3 Порог фибрилляции желудочков

Для частот от 1000 до 10 000 Гц применяют положения, изложенные в 5.4.4.

5.4 Воздействие переменного тока частотой свыше 10 000 Гц

5.4.1 Общие положения

В 5.4 не внесены изменения в части значений порога восприятия и порога отпускания для более высоких частот. Эти пороговые значения важны, но наиболее опасным является порог ФЖ. По этой причине порог фибрилляции приведен для частот до 150 кГц. Остальные виды пороговых значений могут рассматриваться, как в 5.4.2, 5.4.3, в пределах указанного диапазона частот.

5.4.2 Порог чувствительности

Для частот от 10 до 100 кГц пороговые значения тока чувствительности изменяются от 10 до 100 мА (действующее значение).

При протекании тока частотой свыше 100 кГц ощущение покалывания, как на более низких частотах, заменяется ощущением тепла при силе тока порядка нескольких сотен миллиампер.

5.4.3 Порог отпускания

Для частот свыше 100 кГц отсутствуют как данные экспериментальных исследований, так и данные по несчастным случаям, связанным с порогом отпускания.

5.4.4 Порог фибрилляции желудочков

На рисунке 6 приведена зависимость частотного коэффициента порога ФЖ в диапазоне частот от 1 до 150 кГц при протекании тока вдоль тела человека при времени воздействия больше длительности сердечного цикла.

Для частот свыше 1 кГц тепловое воздействие становится преобладающим.

Для времени воздействия меньше длительности сердечного цикла экспериментальные данные отсутствуют.

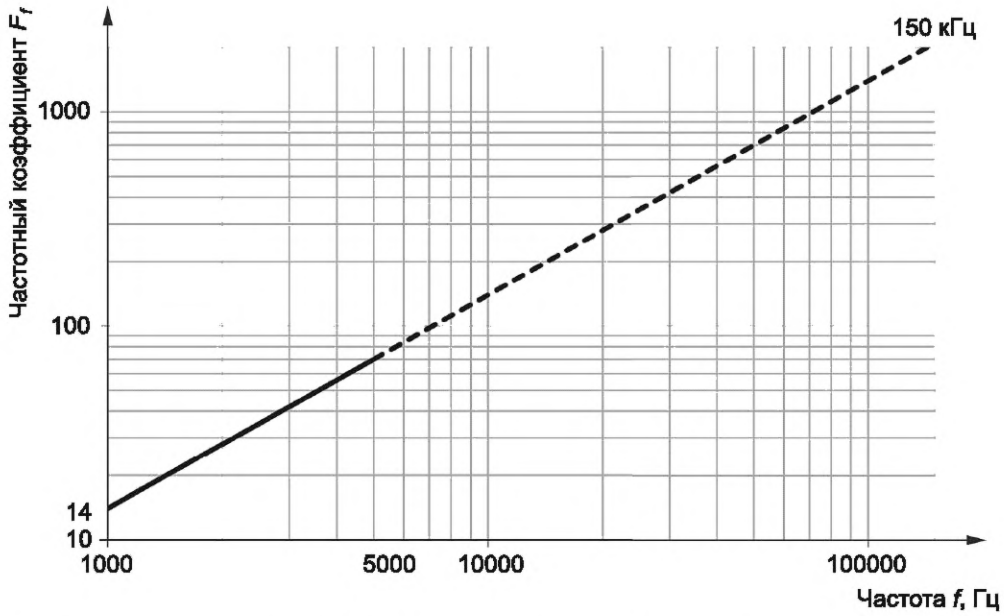


Рисунок 6 — Изменение порога ФЖ для длительного тока синусоидальной формы (от 1 до 150 кГц)

5.4.5 Прочие эффекты

В зависимости от длительности протекание токов частотой выше 100 кГц и значением силы тока порядка единиц ампера может вызывать ожоги.

6 Воздействие токов особой формы сигнала

6.1 Общие положения

Степень воздействия токов особой формы сигнала на тело человека находится между воздействиями от постоянных и переменных токов. По этой причине могут быть установлены значения силы тока, эквивалентные в отношении риска возникновения ФЖ.

В настоящем разделе описано воздействие следующих видов электрического тока, проходящих по телу человека:

- переменный ток синусоидальной формы с постоянными составляющими;
- переменный ток синусоидальной формы с фазовым регулированием;
- переменный ток синусоидальной формы с многопериодным регулированием.

Примечание — Другие формы сигналов находятся в процессе рассмотрения.

Принято, что приведенная информация действительна для переменного тока частотой от 15 до 100 Гц.

6.2 Эквивалентные значения, частота и порог

В 6.2 опасное воздействие может быть принято равным воздействию переменного тока чисто синусоидальной формы I_{ev}, имеющего следующие параметры:

а) эквивалент по значению

Необходимо различать следующие виды значений токов:

I_{RMS} — действующее значение тока рассматриваемой формы сигнала;

I_p — амплитудное значение тока рассматриваемой формы сигнала;

I_{pp} — размах значения тока рассматриваемой формы сигнала;

I_{ev} — действующее значение тока синусоидальной формы, вызывающее воздействия, аналогичные току рассматриваемой формы сигнала.

Примечание — Для оценки риска возникновения ФЖ вместо тока I_B, приведенного на рисунках А.19 и А.20 ГОСТ Р 70646.1—2023, используют ток I_{ev}.

Большую часть физиологических реакций определяет амплитуда тока после фильтра (по значению и по длительности), при этом естественный фильтр тела задает частотный коэффициент F. Амплитуду тока следует использовать во всех случаях, кроме тех, когда есть известное соотношение между действующим и амплитудными значениями, например для тока чисто синусоидальной формы;

б) эквивалент по частоте

Длительность периода рассматриваемой формы тока равна длительности периода эквивалентного синусоидального тока;

в) эквивалент по порогу

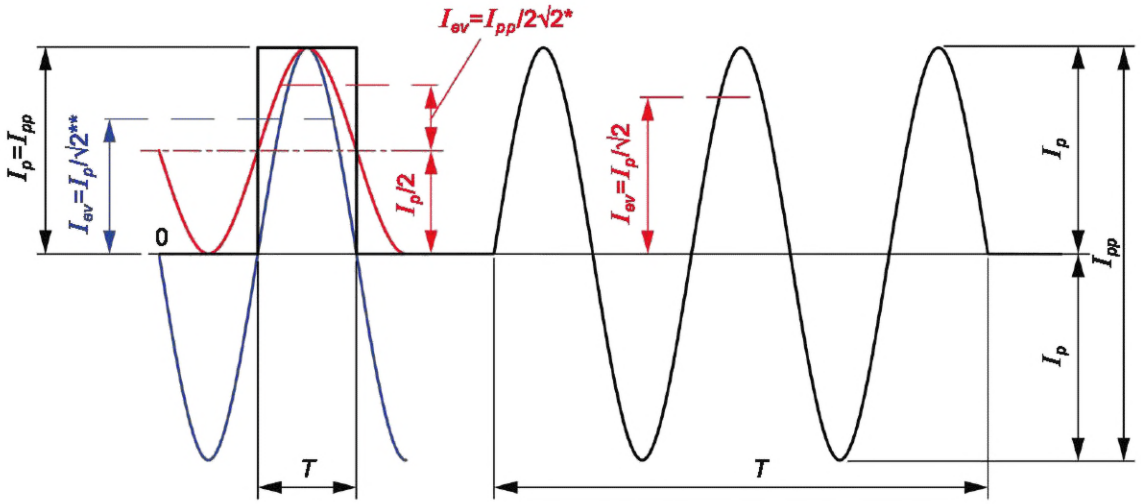
Различные пороговые значения тока (чувствительности, неотпускания, ФЖ) для токов, состоящих из переменной и постоянной составляющих в различных соотношениях, эквивалентны переменному току синусоидальной формы, имеющему значение I_{ev}.

Значение I_{ev} различно для разных видов пороговых значений тока.

6.3 Воздействие переменного тока с постоянной составляющей

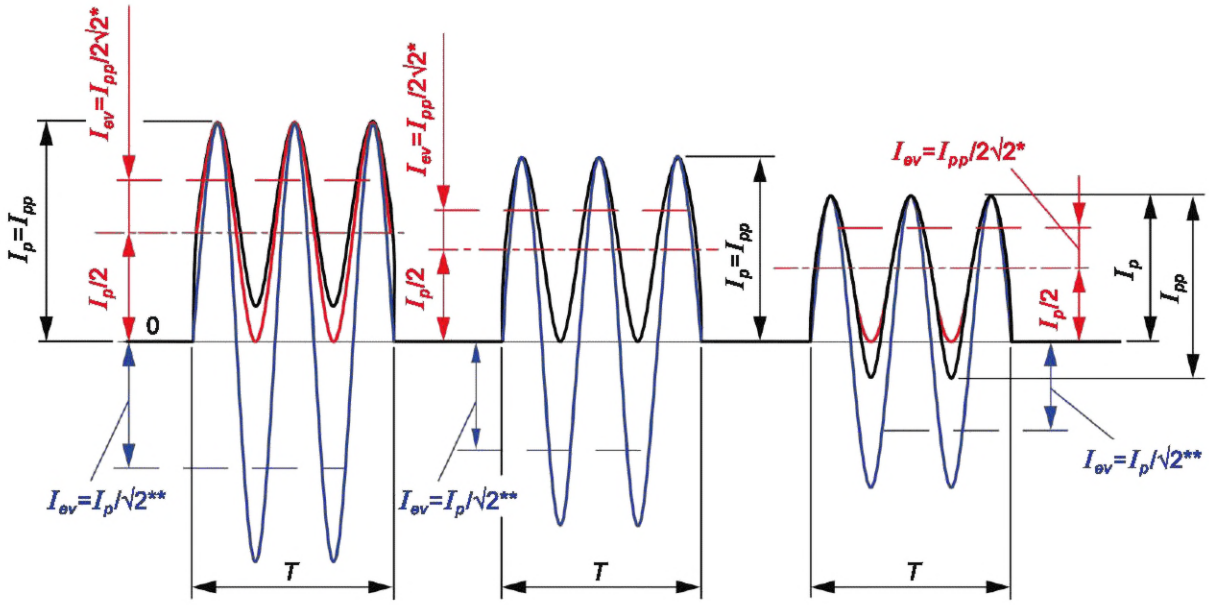
6.3.1 Формы сигнала, частоты и пороговые значения тока

На рисунке 7 приведены типичные формы сигнала, рассмотренные в 6.3.1. На нем представлены постоянные и переменные токи наряду с токами, представляющими собой их комбинацию в различных соотношениях.



* Для времени воздействия более 1,5 длительности сердечного цикла.
** Для времени воздействия менее 0,75 длительности сердечного цикла.

а) Комбинированные сигналы с различным соотношением переменной и постоянной составляющих совместно с прямоугольным импульсом для времени воздействия более 1,5 и менее 0,75 длительности сердечного цикла



* Для времени воздействия более 1,5 длительности сердечного цикла.
** Для времени воздействия менее 0,75 длительности сердечного цикла.

б) Комбинированные сигналы с различным соотношением переменной, состоящей из комбинации частот, и постоянной составляющих для времени воздействия более 1,5 и менее 0,75 длительности сердечного цикла

Рисунок 7 — Формы тока

6.3.2 Порог реакции испуга

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

Данные воздействия определяют амплитудным значением тока, и для получения суммарного воздействия необходимо последовательно скомбинировать токи всех частот. Схема измерений приведена в ГОСТ Р МЭК 60990.

6.3.3 Порог отпускания

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

Определение порогового значения тока отпускания для комбинации из переменного и постоянного токов (прикосновение рукой к цепи под напряжением, которое может длиться несколько секунд) показано на рисунке 5. Частота переменного тока для этого случая составляла 60 Гц. В качестве пороговых значений токов прикосновения для токов переменной и постоянной форм сигнала были использованы 7,07 мА амплитудного значения ($I_{AC\ peak}$) переменного тока (5 мА действующего значения для синусоидального тока) и 30 мА постоянного тока (DC). Данные пороговые значения адекватно описывают условия невозможности отпускания для всего населения, включая детей.

Уравнение для амплитудного значения переменного тока

$$I_{AC\ peak} = 7{,}176 \cdot \exp(-0{,}1434 \cdot DC) - 0{,}1061, \quad (1)$$

описывает рассматриваемую комбинацию переменного и постоянного токов и может быть использовано для расчета эквивалентного значения амплитуды переменного тока для любой комбинации постоянной и переменной составляющих в рассматриваемом диапазоне.

На рисунке 8 показаны пороговые значения тока отпускания для мужчин, женщин и детей.

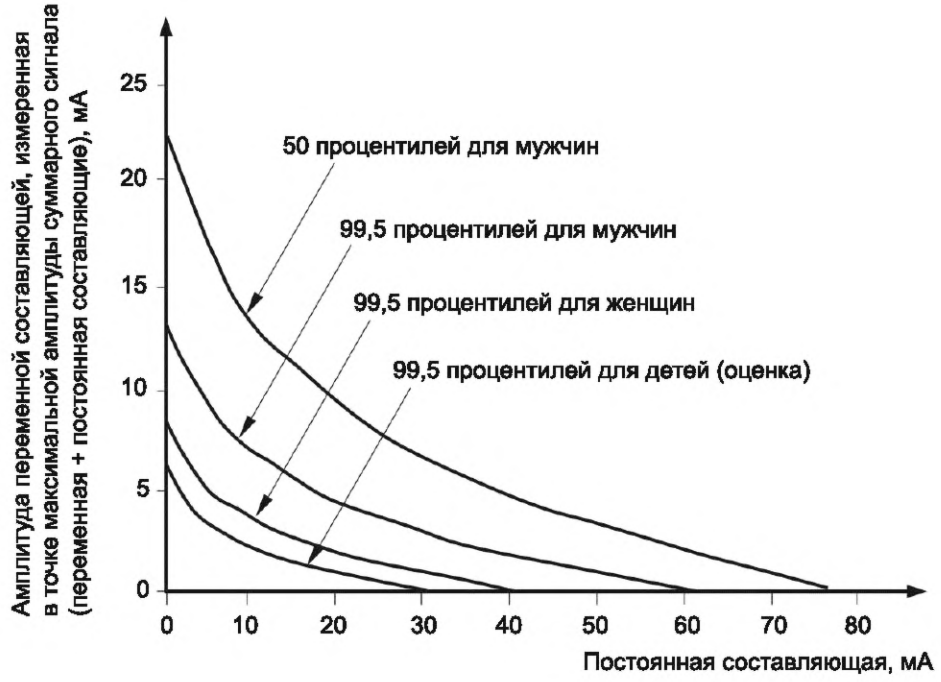


Рисунок 8 — Пороговые значения тока отпускания для мужчин, женщин и детей

Приведенные на рисунке 8 кривые могут быть описаны с помощью эмпирических уравнений. Для кривой 99,5 процентиля для мужчин используют уравнение

$$I_{AC\ peak} = 12{,}8905 \cdot \exp(-0{,}06939 \cdot DC) - 0{,}1905. \quad (2)$$

Для кривой 99,5 процентиля для женщин используют уравнение

$$I_{AC\ peak} = 8{,}523 \cdot \exp(-0{,}1049 \cdot DC) - 0{,}126. \quad (3)$$

Для оценочной кривой 99,5 процентиля для детей используют уравнение

$$I_{AC\ peak} = 6{,}3945 \cdot \exp(-0{,}1388 \cdot DC) - 0{,}0945. \quad (4)$$

На практике в некоторых стандартах допускается, в качестве исключения, наличие в постоянной составляющей пульсаций (например, до 10 %).

На рисунке 9 показаны амплитудные пороговые значения тока отпускания для комбинации синусоидального тока частотой 50/60 Гц и постоянного тока. Пороговые значения амплитуды суммарного (постоянная и переменная составляющие) тока отпускания оценены для всего населения, включая детей, и приведены в функции постоянной составляющей тока.

Кривая на рисунке 9 описывается уравнением

$$I_{AC\ peak} + I_{DC} = 7{,}176 \cdot \exp(-0{,}1434 \cdot DC) - 0{,}1061 + DC. \quad (5)$$

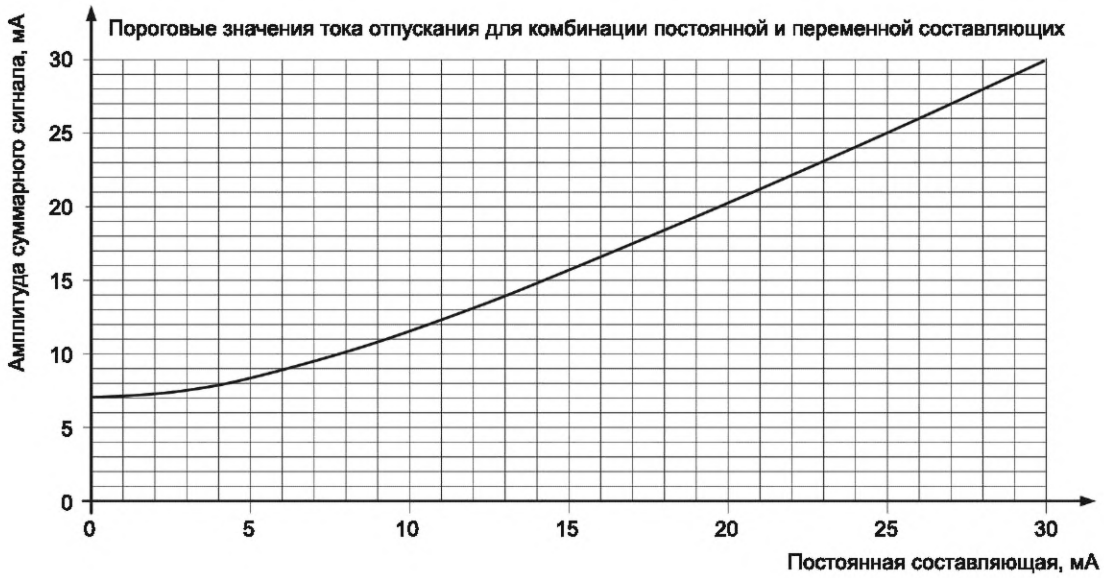


Рисунок 9 — 99,5 процентилей порогового значения тока отпускания для комбинации тока частотой 50/60 Гц и постоянного тока

Данные воздействия определяются амплитудным значением тока и для получения суммарного воздействия необходимо последовательно скомбинировать токи всех частот. Схема измерений приведена в ГОСТ Р МЭК 60990.

6.3.4 Порог фибрилляции желудочков

6.3.4.1 Формы сигналов, имеющие характерные соотношения между переменной и постоянной составляющим

Опасность возникновения фибрилляции может быть принята приблизительно равной опасности, создаваемой эквивалентным током синусоидальной формы I_{ev} со следующими характеристиками:

а) для времени воздействия более 1,5 длительностей сердечного цикла I_{ev} представляет собой действующее значение синусоидального переменного тока, значение размаха сигнала I_{pp} которого равно размаху рассматриваемого сигнала

$$I_{ev} = \frac{I_{pp}}{2\sqrt{2}}; \quad (6)$$

б) для времени воздействия менее 0,75 длительности сердечного цикла I_{ev} представляет собой действующее значение синусоидального переменного тока, значение амплитуды сигнала I_p которого равно амплитуде рассматриваемого сигнала

$$I_{ev} = \frac{I_p}{\sqrt{2}}. \quad (7)$$

Примечание — Данная корреляция становится менее точной с уменьшением соотношения между переменной и постоянной составляющих. При воздействии постоянного тока длительностью менее 0,1 с пороговое значение равно соответствующему действующему значению переменного тока (см. рисунки А.19 или А.21 в ГОСТ Р 70646.1—2023);

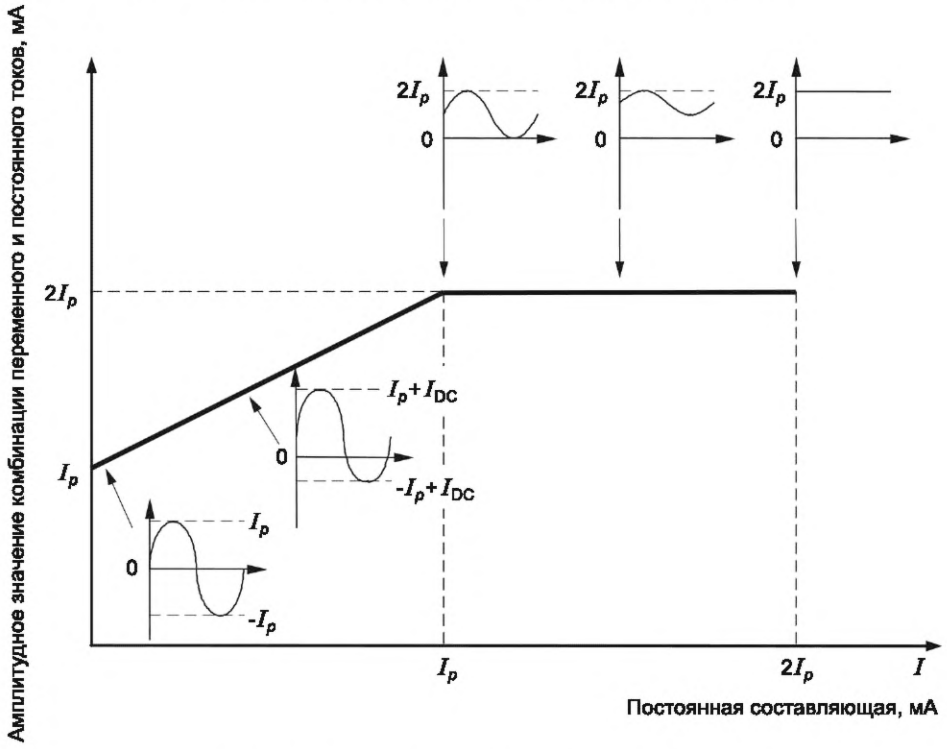
в) для времени воздействия более 0,75 и менее 1,5 длительности сердечного цикла амплитудный параметр эквивалентного сигнала изменяется от амплитудного значения до значения размаха рассматриваемого сигнала.

Примечание — Природа этого изменения является предметом дальнейших исследований.

Вероятность возникновения ФЖ одинакова для комбинации переменной составляющей частотой 50/60 Гц и постоянной составляющей тока длительностью несколько секунд или более и чисто синусоидального тока того же времени воздействия, если верно нижеследующее. Переменный ток синусоидальной формы частотой 50/60 Гц имеет размах сигнала, равный размаху комбинированного тока, при условии что постоянная составляющая относительно невелика и с ее наличием в течение периода мгновенное значение комбинированного тока меняет знак. Например, комбинация синусоидального тока частотой 50/60 Гц с действующим значением 40 мА и постоянного тока значением до $40 \cdot \sqrt{2}$ мА вызывает ФЖ примерно с той же вероятностью, как и один только переменный ток частотой 50/60 Гц с действующим значением 40 мА.

Если время воздействия составляет несколько секунд или более и постоянная составляющая в комбинированном токе достаточно велика, чтобы мгновенное значение этого тока в пределах периода не меняло знак, то комбинация постоянного и переменного токов вызывает ФЖ с той же вероятностью, что и чисто синусоидальный ток частотой 50/60 Гц, размах сигнала которого равен амплитуде комбинированного тока. Например, комбинация синусоидального тока частотой 50/60 Гц и постоянного тока с суммарным амплитудным значением $80 \cdot \sqrt{2}$ мА, мгновенное значение тока которой не меняет знак в течение периода, вызывает ФЖ примерно с такой же вероятностью, что и только синусоидальный ток частотой 50/60 Гц с действующим значением 40 мА без постоянной составляющей.

На рисунке 10 показан пример, когда вероятность ФЖ для комбинации синусоидального переменного тока (включая частоты 20, 50 и 60 Гц) с постоянным током неизменна.



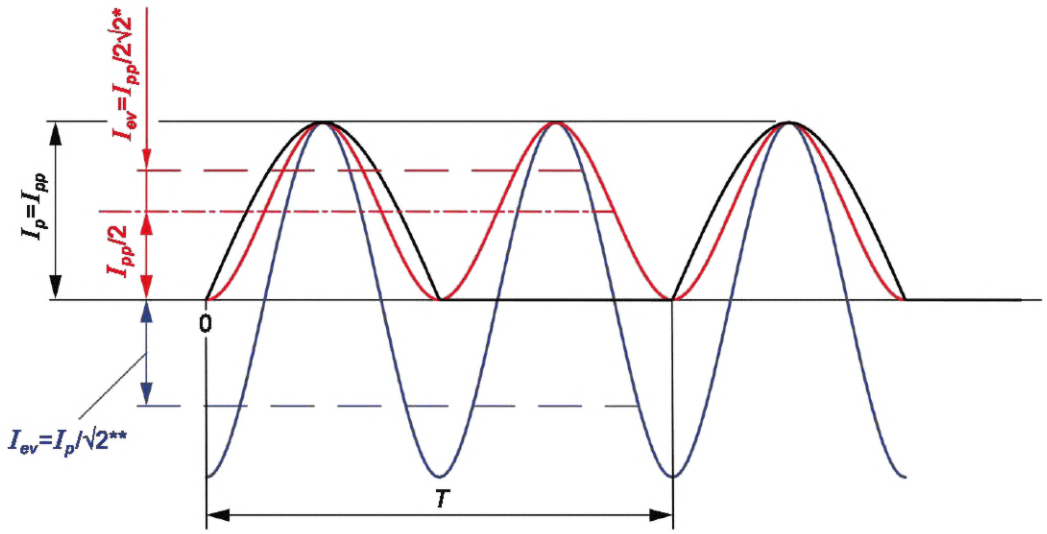
I_p — амплитудное значение чисто синусоидального тока

Рисунок 10 — Различные комбинации переменного и постоянного тока, вызывающие возникновение ФЖ с одинаковой вероятностью

Примечание — Значение размаха сигнала I_{pp} остается неизменным до тех пор, пока не достигнет значения I_p, а затем амплитудное значение комбинации токов остается неизменным на уровне двукратного значения амплитуды переменной составляющей без постоянной составляющей.

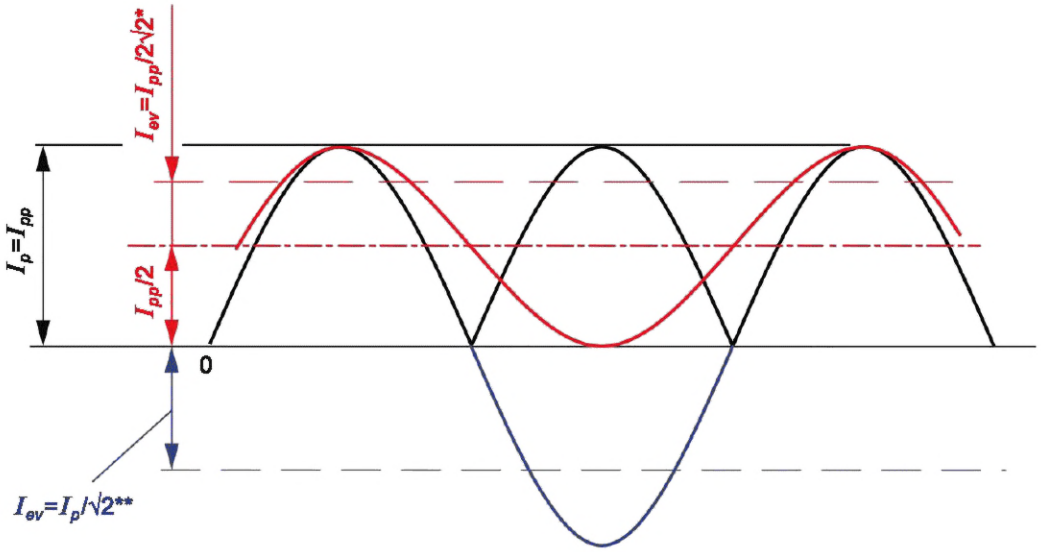
6.3.4.2 Примеры выпрямленного переменного тока

На рисунке 11 показаны формы сигнала для однополупериодного и двухполупериодного выпрямления. Для данных форм сигналов амплитудное значение тока равно значению размаха тока.



* Для времени воздействия более 1,5 длительности сердечного цикла.
** Для времени воздействия менее 0,75 длительности сердечного цикла.

а) Однополупериодное выпрямление



* Для времени воздействия более 1,5 длительности сердечного цикла.
** Для времени воздействия менее 0,75 длительности сердечного цикла.

б) Двухполупериодное выпрямление

Рисунок 11 — Формы выпрямленного переменного тока

Значение эквивалентного переменного тока I_{ev} определяют следующим образом:

а) при длительности более 1,5 длительностей сердечного цикла — по уравнению

$$I_{ev} = \frac{I_{pp}}{2\sqrt{2}} = \frac{I_p}{2\sqrt{2}}. \quad (8)$$

Отсюда, для однополупериодного выпрямления значение I_{ev} связано с действующим значением выпрямленного тока I_{RMS} уравнением

$$I_{ev} = \frac{I_{RMS}}{\sqrt{2}}; \quad (9)$$

для двухполупериодного выпрямления, уравнением

$$I_{ev} = \frac{I_{RMS}}{2}; \quad (10)$$

б) при длительности менее 0,75 длительности сердечного цикла — по уравнению

$$I_{ev} = \frac{I_{pp}}{\sqrt{2}} = \frac{I_p}{\sqrt{2}}. \quad (11)$$

Отсюда, для однополупериодного выпрямления значение I_{ev} связано с действующим значением выпрямленного тока I_{RMS} уравнением

$$I_{ev} = \sqrt{2} \cdot I_{RMS}; \quad (12)$$

для двухполупериодного выпрямления уравнением

$$I_{ev} = I_{RMS}. \quad (13)$$

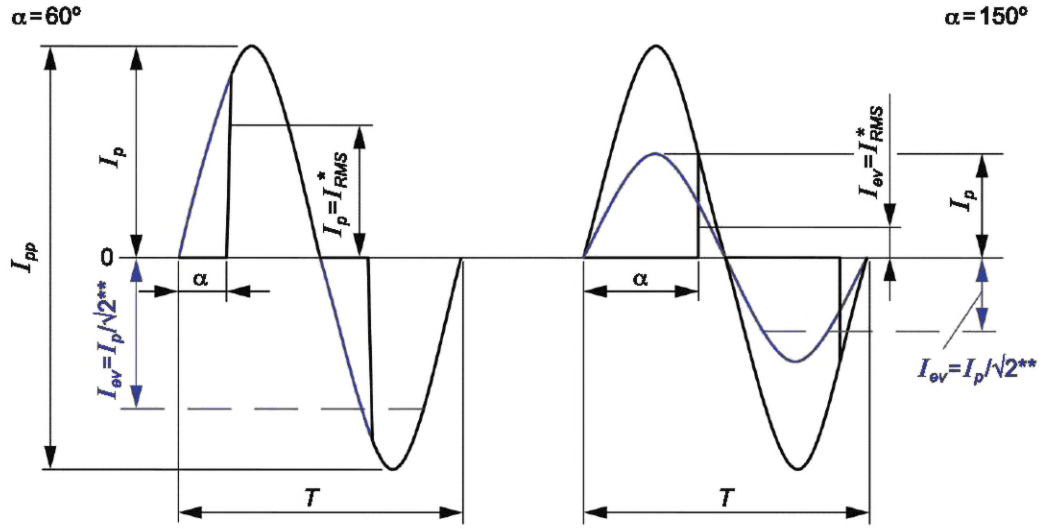
Как в случае реакции отпускания, так и ФЖ, полагают, что ток в теле протекает через конечности и туловище в течение нескольких секунд.

Пример — Модулированный вызывной сигнал в телефонной цепи может длиться около 2 с, пока не наступит пауза (между звонками). Если человек прикасается к проводящей части, находящейся под напряжением вызывного сигнала, по его телу может протекать ток в течение нескольких секунд. Если имеет место модулированный вызывной сигнал, то человек будет неспособен отпустить проводящую часть в течение промежутка времени, пока сигнал будет передаваться. Если такое произойдет, ФЖ не сможет быть вызвана данным сигналом. При наступлении паузы между сериями вызывного сигнала человек сможет отпустить проводящую часть и отсоединиться от цепи.

7 Воздействие переменных токов с фазовым регулированием

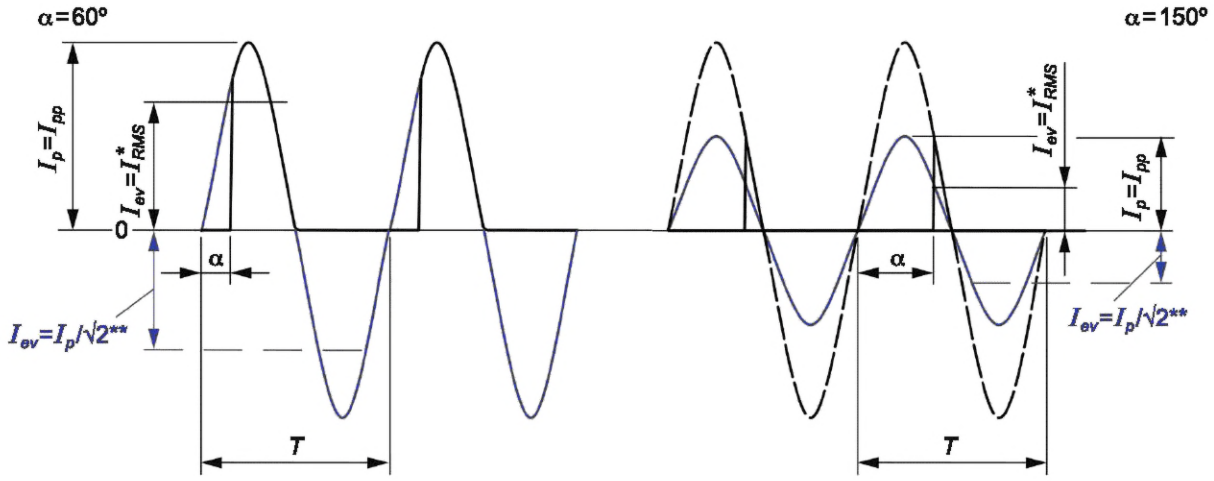
7.1 Формы сигналов и пороговые значения частот и токов

На рисунке 12 показаны формы сигналов для симметричного и несимметричного фазовых регулирований.



* Для времени воздействия более 1,5 длительности сердечного цикла.
** Для времени воздействия менее 0,75 длительности сердечного цикла.

а) Симметричное регулирование



* Для времени воздействия более 1,5 длительности сердечного цикла.
** Для времени воздействия менее 0,75 длительности сердечного цикла.

б) Несимметричное регулирование

Рисунок 12 — Формы сигнала переменного тока с фазовым регулированием

7.2 Порог реакции испуга и порог отпускания

Как показано в 6.3.2 и 6.3.3 пороги реакции испуга и отпускания зависят от различных параметров.

Вызываемые протеканием тока реакции ощущения или неотпускания примерно аналогичны реакциям, вызываемым переменным током с такой же амплитудой I_p. Если угол регулирования фазы превышает 120°, то амплитудные значения увеличиваются, как вследствие уменьшения времени протекания тока.

Данные воздействия определяются амплитудным значением тока. Для получения суммарного воздействия необходимо последовательно скомбинировать воздействия от токов всех частот. Схема измерений приведена в ГОСТ Р МЭК 60990.

7.3 Порог фибрилляции желудочков

7.3.1 Общие положения

Для токов с симметричным и несимметричным регулированиями пороговые значения различны.

7.3.2 Симметричное регулирование

Опасность возникновении ФЖ может быть принята примерно равной опасности, создаваемой при протекании эквивалентного переменного тока I_{ev} со следующими характеристиками:

а) для времени воздействия более 1,5 длительности сердечного цикла действующее значение тока I_{ev} равно действующему значению рассматриваемого тока;

б) для времени воздействия менее 0,75 длительности сердечного цикла I_{ev} представляет собой действующее значение тока, имеющего то же амплитудное значение, как и у рассматриваемого тока.

Примечание — Если угол регулирования фазы превышает 120°, ожидается повышение порога фибрилляции;

в) для времени воздействия от 0,75 до 1,5 длительностей сердечного цикла амплитудный параметр эквивалентного тока изменяется от амплитудного значения до действующего значения рассматриваемого тока.

7.3.3 Несимметричное регулирование

Опасность возникновении ФЖ может быть принята примерно равной опасности, создаваемой при протекании эквивалентного переменного тока I_{ev} со следующей характеристикой: для времени воздействия менее 0,75 длительности сердечного цикла I_{ev} представляет собой действующее значение тока, имеющего то же амплитудное значение, как и у рассматриваемого тока.

Примечания

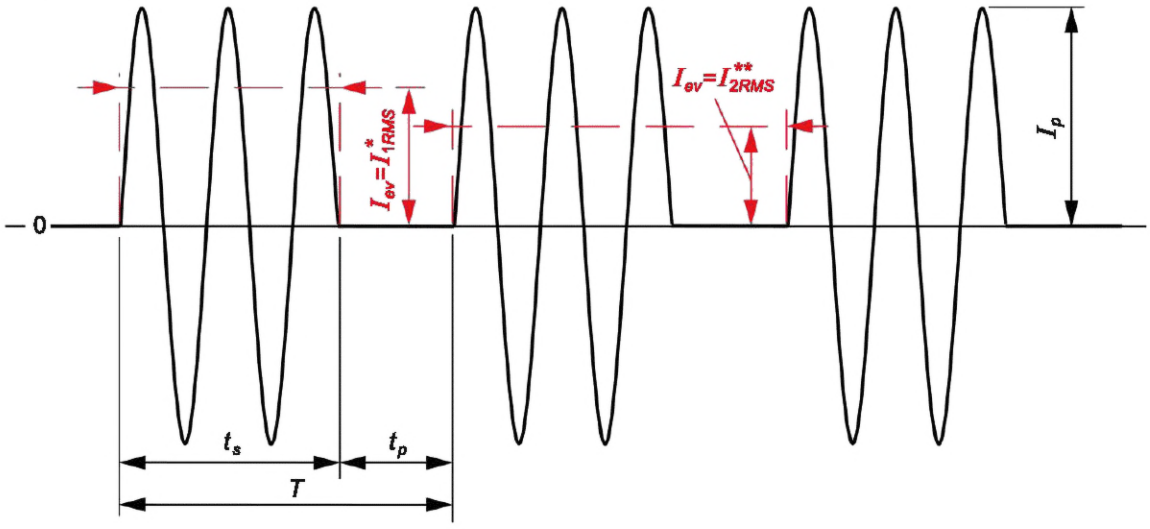
1 Если угол регулирования фазы превышает 120°, ожидается повышение порога фибрилляции.

2 Токи, создаваемые при несимметричном управлении (см. ГОСТ IEC 60050-551—2022, статья 551-16-25) могут иметь постоянную составляющую.

8 Воздействие переменных токов с многопериодным регулированием

8.1 Формы сигналов и частоты

На рисунке 13 показаны формы сигналов для коэффициента многопериодного регулирования мощности p = 0,67.



* Для времени воздействия более 1,5 длительности сердечного цикла и p << 1 или для времени воздействия менее 0,75 длительности сердечного цикла.

** Для времени воздействия более 1,5 длительности сердечного цикла и $p \approx 1$.

Рисунок 13 — Формы сигнала переменного тока, рассчитанные с учетом коэффициента многопериодного регулирования

Коэффициент многопериодного регулирования p вычисляют по формуле

$$p = \frac{t_s}{t_s + t_p}, \tag{14}$$

где t_s — отрезок времени, когда ток протекает;

t_p — отрезок времени, когда ток не протекает;

$t_s + t_p$ — рабочий период.

Действующее значение тока в отрезок времени, когда ток протекает, I_{1RMS} вычисляют по формуле

$$I_{1RMS} = \frac{I_p}{\sqrt{2}}. \tag{15}$$

I_{1RMS} не следует путать с действующим значением тока в течение рабочего периода I_{2RMS}, вычисляемым по формуле

$$I_{2RMS} = I_{RMS}\sqrt{p}. \tag{16}$$

8.2 Порог реакции испуга и порог отпускания

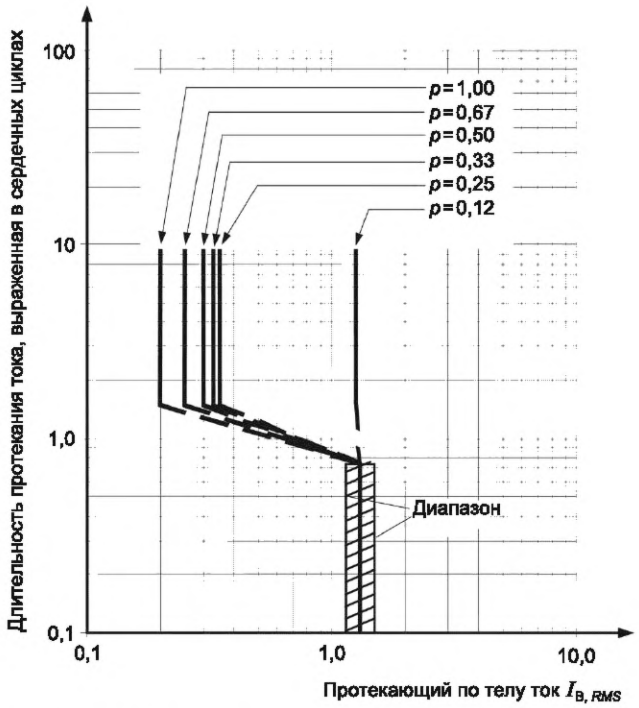
Как показано в 6.3.2, 6.3.3 и 7.2 пороги реакции испуга и порог отпускания зависят от различных параметров.

Данные воздействия определяются амплитудным значением тока. Для получения суммарного воздействия необходимо последовательно скомбинировать воздействия от токов всех частот.

8.3 Порог фибрилляции желудочков

8.3.1 Общие положения

В зависимости от времени воздействия и коэффициента многопериодного регулирования переменные токи с многопериодным регулированием в той же степени или менее опасны переменных токов с тем же временем воздействия и значением тока.



Примечание — Протекающий по телу ток $I_{B,RMS}$ представляет собой действующее значение тока в течение отрезка времени, когда протекает ток I_{1RMS}.

Рисунок 14 — Усредненные значения порога ФЖ для переменного тока с многопериодным регулированием для различных коэффициентов многопериодного регулирования (результаты экспериментов с молодыми свиньями)

На рисунке 14 приведены зависимости порога ФЖ для различных коэффициентов многопериодного регулирования, полученные в экспериментах с молодыми свиньями.

8.3.2 Время воздействия больше 1,5 длительности сердечного цикла

При времени воздействия больше 1,5 длительности сердечного цикла рассматриваемый порог зависит от коэффициента многопериодного регулирования *p*. Для значений *p,* близких к единице, он имеет действующее значение, равное действующему значению переменного тока при том же времени воздействия. Для значений *p*, приблизительно равных 0,1, действующее значение тока I_{1RMS} в течение отрезка времени, когда ток протекает, равно пороговому значению переменного тока с временем воздействия менее 0,75 длительности сердечного цикла.

Примечание — Для промежуточных значений *p* порог фибрилляции увеличивается от низкого уровня, показанного на рисунке А.19 ГОСТ Р 70646.1—2023, до высокого уровня, соответствующего времени воздействия менее 0,1 с.

8.3.3 Время воздействия менее 0,75 длительности сердечного цикла

При времени воздействия менее 0,75 длительности сердечного цикла действующее значение тока I_{1RMS} в течение отрезка времени, когда ток протекает, равно действующему значению синусоидального переменного тока для времени воздействия 0,1 с.

9 Оценка эквивалентного порога для тока, содержащего составляющие нескольких частот

9.1 Пороги чувствительности и отпускания

Данные воздействия определяются амплитудным значением тока и для получения суммарного воздействия необходимо последовательно скомбинировать воздействия от токов всех частот.

9.2 Порог фибрилляции желудочков

Опасность возникновения ФЖ при протекании тока, содержащего составляющие нескольких частот, может быть грубо оценена как опасность, возникающая при протекании переменного тока со следующими характеристиками:

- частота равна основной частоте;
- амплитуда I_{ev} эквивалентна сумме квадратов амплитуд всех составляющих, поделенных на соответствующий частотный коэффициент, приведенный на рисунке 3:

$$I_{ev} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{I_i}{F_i}\right)^2}, \qquad (17)$$

где I_i — составляющая тока для *i*-й частоты.

Приведенный результат объединения сигналов определяет только соотношение между амплитудой и действующим значением комбинированного сигнала. Физиологическая реакция зависит от углов сдвига фаз между составляющими комбинированного сигнала, которые необходимо знать и которые не учтены в приведенной оценке.

10 Воздействие серий импульсов тока и токов нестандартной, сложной и случайной форм сигнала

10.1 Порог ФЖ для серий импульсов тока с интервалами 300 мс и более между отдельными импульсами

Считается маловероятным, что ФЖ возникает вследствие протекания через сердце однократного импульса тока, для которого комбинация значения и длительности расположена ниже кривой c_1 на рисунке А.21 ГОСТ Р 70646.1—2023. Данный вывод также справедлив в отношении одиночного импульса постоянного тока, не содержащего заметной переменной составляющей.

Импульсы тока, разделенные друг от друга интервалом, равным 300 мс или более, не обладают кумулятивным эффектом в отношении сердца и, поэтому, могут рассматриваться отдельно друг от друга, как если бы они были одиночными импульсами тока. Если импульсы тока в серии отделены друг от друга интервалом 300 мс или более, то для определения опасности возникновения ФЖ с кривой c_1 могут сравниваться значения и длительность каждого импульса тока по отдельности.

10.2 Порог ФЖ для серий импульсов тока с интервалами менее 300 мс между отдельными импульсами

10.2.1 Общие положения

Два или более импульса тока, протекающие через сердце и разделенные интервалом менее 300 мс, создают большую вероятность возникновения нарушений в работе сердца за счет суммирования и накопления воздействий (кумулятивный эффект). Даже в случаях, когда параметры каждого из импульсов тока, входящих в серию, существенно меньше порога ФЖ, который установлен для подобных воздействующих по отдельности одиночных импульсов, кумулятивные эффекты могут вызывать ФЖ при условии, что каждый из импульсов вызывает желудочковый ответ.

Протекающие через сердце короткие импульсы тока, разделенные интервалами менее 300 мс, могут запускать волну возбуждения с увеличивающейся неоднородностью. Кумулятивный эффект от таких волн состоит в увеличении разделения волны, что приводит к ФЖ. Если интервалы составляют менее 100 мс, то эффект очень четко выражен, при условии что каждый из импульсов вызывает желудочковый ответ.

Первый импульс тока в серии может быть оценен по рисункам А.19 или А.21 ГОСТ Р 70646.1—2023 соответственно. Если второй импульс тока вызывает желудочковый ответ и если интервал между ним и первым импульсом составляет менее 300 мс, то порог ФЖ, относящийся ко второму импульсу тока, может составлять приблизительно 65 % значения порога фибрилляции для первого импульса. Этот процесс может продолжаться до тех пор, пока значение порога достигнет минимума, после прохождения несколько импульсов, разделенных интервалами менее 300 мс, каждый из которых вызывает желудочковый ответ. В таких условиях минимальное пороговое значение может составлять 10 % и менее порогового значения для первого импульса.

В таблице 1 приведены наихудшие оценочные значения порогов ФЖ, относящиеся к серии импульсов, в предположении, что интервал между ними в серии составляет менее 300 мс и каждый из них вызывает желудочковый ответ. Бестоковые паузы между импульсами длительностью менее 300 мс не достаточны для полного исчезновения результатов воздействия предыдущего импульса.

Каждый импульс имеет достаточные для появления желудочкового ответа значения тока и длительности. Предполагается, что порог ФЖ снижается на 35 % после прохождения каждого импульса тока, если интервал между ними составляет менее 100 мс.

Таблица 1 — Оценка порога ФЖ после каждого импульса в серии, каждый из которых вызывает желудочковый ответ

Импульс тока с интервалами между импульсами менее 100 мс, при этом первый импульс находится в зоне AC-3 или DC-3, указанных на рисунках А.19 и А.21 ГОСТ Р 70646.1—2023	Оценочное значение порога ФЖ после протекания каждого импульса тока в серии, при этом все импульсы способны вызвать желудочковый ответ, %
Первый импульс тока	100
Второй импульс тока	65
Третий импульс тока	42
Четвертый импульс тока	27
Пятый импульс тока	18
Шестой импульс тока	12
Седьмой и последующие импульсы тока	10 или менее

10.2.2 Примеры

Пример 1 — Четыре импульса, разделенные интервалами 500 мс, с небольшим риском возникновения ФЖ для первого импульса и без кумулятивного эффекта

Рассматривают серию из четырех прямоугольных однополярных импульсов тока (см. рисунок 15), протекающих по телу человека между левой рукой и обоими ступнями. Каждый импульс имеет амплитуду 100 мА и длительность 0,01 с. Предполагают, что импульсы разделены бестоковой паузой длительностью 0,5 с. В данном примере существует риск ФЖ, если импульс тока протекает по телу снизу вверх (ступни присоединены к аноду).

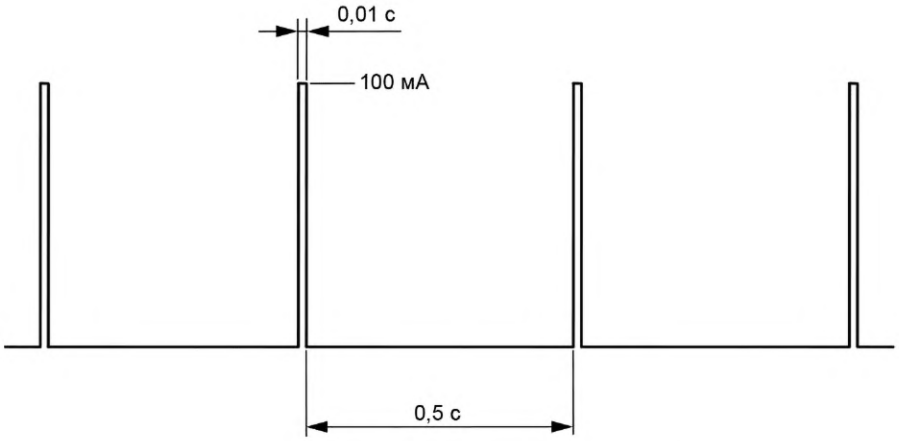


Рисунок 15 — Серия из четырех однополярных прямоугольных импульсов тока

В соответствии с рисунком А.21 ГОСТ Р 70646.1—2023 каждый из импульсов амплитудой 100 мА или длительностью 0,01 с не оказывает опасных физиологических воздействий (зона DC-2), и импульсы разделены интервалами более 300 мс. В данном случае риск возникновения ФЖ считают низким.

Пример 2 — Четыре импульса, разделенные интервалами 500 мс, с существенным риском возникновения ФЖ для первого импульса и без кумулятивного эффекта

Рассматривают другую серию из четырех прямоугольных однополярных импульсов тока (см. рисунок 16), протекающих по телу человека между левой рукой и обеими ступнями в том же направлении (ступни присоединены к аноду).

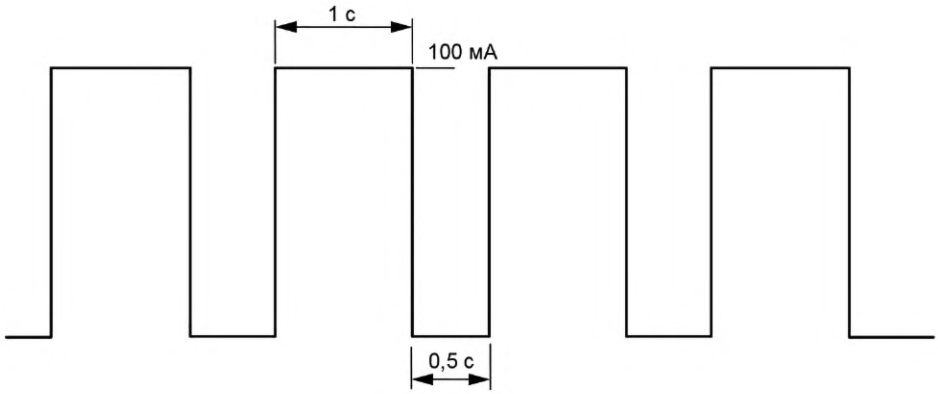


Рисунок 16 — Вторая серия из четырех однополярных прямоугольных импульсов тока

Каждый импульс имеет такую же амплитуду 100 мА, но длительность каждого импульса увеличена до 1 с. Импульсы разделены аналогичной бестоковой паузой длительностью 0,5 с.

Согласно рисунку А.21 ГОСТ Р 70646.1—2023 каждый из импульсов в отдельности способен вызвать обратимые нарушения процесса формирования и прохождения сердечных импульсов возбуждения (область DC-3).

Импульсы по-прежнему разделены интервалом более 300 мс, следовательно риск накопления воздействий мал. Импульсы могут быть рассмотрены как отдельные импульсы на основе тех же критериев, что и первый импульс. Таким образом, предполагается, что каждый импульс наносит одинаковый вред.

Пример 3 — Четыре импульса, разделенные интервалами менее 300 мс, с существенным риском возникновения ФЖ для первого импульса и с кумулятивным эффектом

Рассматривают еще одну серию из четырех прямоугольных однополярных импульсов тока, протекающих по телу человека между левой рукой и обеими ступнями в том же направлении (ступни присоединены к аноду). Каждый импульс имеет амплитуду 200 мА и длительность 100 мс, но они разделены бестоковой паузой длительностью 50 мс, а не 0,5 с (см. рисунок 17). В данном примере существует риск ФЖ.

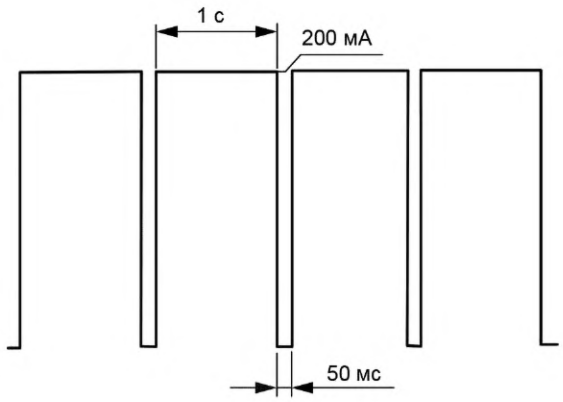


Рисунок 17 — Третья серия из четырех однополярных прямоугольных импульсов тока

Согласно рисунку А.21 ГОСТ Р 70646.1—2023 каждый из импульсов в отдельности способен вызвать обратимые нарушения в сердце (область DC-3). Каждый подобный импульс способен вызвать желудочковый ответ и бестоковая пауза длительностью 50 мс между ними не достаточна для исчезновения этих нарушений до начала следующего импульса. В предположении, что был вызван желудочковый ответ, делают вывод, что мог иметь место кумулятивный эффект, вследствие которого пороговое значение для седьмого импульса составляет 10 % или менее исходного и риск ФЖ для данной серии импульсов высок.

10.2.3 Сигналы нестандартной, сложной и случайной форм

В некоторых случаях требуется рассмотреть сигналы нестандартной, сложной и случайной форм. Подобные формы сигнала не подлежат рассмотрению на основе других разделов настоящего стандарта. Такие токи могут возникнуть, к примеру, в случае их протекания по поверхности загрязненного изолятора.

Термины «случайный» и «сложный» подразумевают, в частности, что:

а) в пределах периода наблюдения не происходит периодического повторения сигнала и не существует типового образца для непериодического сигнала;

б) форма сигнала не может быть легко описана математически;

в) форма сигнала не может быть легко разложена на гармонические составляющие.

Пример фрагмента сигнала подобной формы приведен на рисунке 18. Данный сигнал может быть зафиксирован в цифровом виде с помощью, например, осциллографа или цифровой регистрирующей системы. Затем оцифрованная осциллограмма может быть рассмотрена с точки зрения опасности возникновения ФЖ с помощью цифровой обработки на основе подходящего метода. Задачи подобного типа могут быть решены общеизвестными методами, такими как свертка, анализ Фурье, вэйвлет-анализ, однако эти методы для обычных пользователей часто неудобны. По этой причине ниже рассмотрен простой и надежный традиционный метод. Данный метод допускается использовать для преобразования данных осциллограмм, подобных изображенной на рисунке 18, в вид, который может быть использован совместно с рисунком А.19 ГОСТ Р 70646.1—2023.

Исследования уязвимости пациентов с имплантированными кардиодефибрилляторами показали, что период уязвимости к ФЖ длится приблизительно 60 мс вблизи амплитуды волны *T*. Проведен анализ ССС. Цель анализа определить наихудшие условия воздействия с точки зрения размера уязвимого периода сердечного цикла. В идеальном случае, наихудшие условия следует определять с помощью анализа перемещающихся интервалов, имеющих форму зависимости уязвимого периода от силы разряда. Существует также более простой и традиционный метод, включающий в себя анализ временных интервалов на осциллограмме случайных сложных сигналов с целью определения наихудшего стиму-

лирующего воздействия. Как показано ниже, в соответствии с теорией уязвимости с осциллограммы ССС взяты выборки разных длительностей, чтобы на их основе найти наихудшие воздействия и сгенерировать кривую вероятных токов.

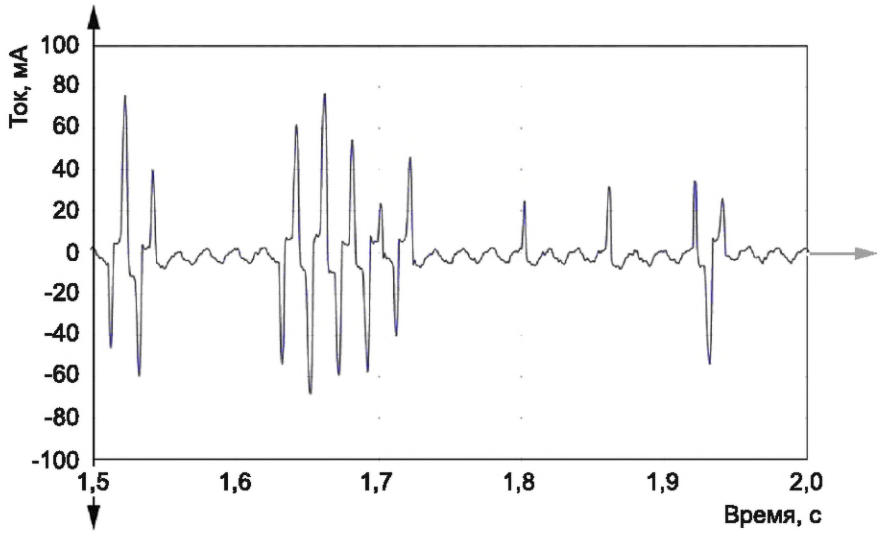


Рисунок 18 — Пример зависимости от времени тока, протекающего через загрязненный изолятор

В данном методе анализа ССС рассматривают влияние на человека как уровня сложного воздействия, так и его длительности. Принимают, что воздействие на человека может начаться в любой точке фрагмента осциллограммы и на неопределенное время. Для какого-либо заданного времени воздействия определяют наибольший ток, который является самым опасным в отношении ФЖ. Затем последовательно рассматривают все возможные длительности воздействия и определяют максимальные уровни воздействия для каждой из них.

Ток, который является наибольшим для какого-либо заданного времени воздействия, называют вероятным током (ВТ) для данного интервала времени. ВТ определяют на основе обработки цифровой осциллограммы по методу, изложенному в приложении А. В результате нахождения всех возможных ВТ для всех возможных интервалов времени воздействия, получают кривую ВТ. Таким образом, для фрагмента осциллограммы находят кривую наихудших условий воздействия тока, которая может быть использована в дальнейшем.

ВТ получают в формате, который может быть использован совместно с данными для частоты 50 Гц, которые основаны на экспериментах. Кривую ВТ, приведенную на рисунке 19 настоящего стандарта, наносят на рисунок А.19 ГОСТ Р 70646.1—2023. Таким образом, данный метод является способом приведения сигнала случайной сложной формы к кривой действующего значения, соответствующей рисунку А.19 ГОСТ Р 70646.1—2023. До начала анализа фрагмента ССС его следует пропустить через фильтр низких частот с верхней частотой среза 100 Гц, так как кривые на рисунке А.19 ГОСТ Р 70646.1—2023 считают действительными до частоты 100 Гц.

Маловероятно, что рассматриваемый сигнал вызовет ФЖ, так как кривая ВТ, нанесенная на рисунок А.19 ГОСТ Р 70646.1—2023, расположена ниже кривой ДТ. Выбор кривой ДТ рассмотрен в приложении А.

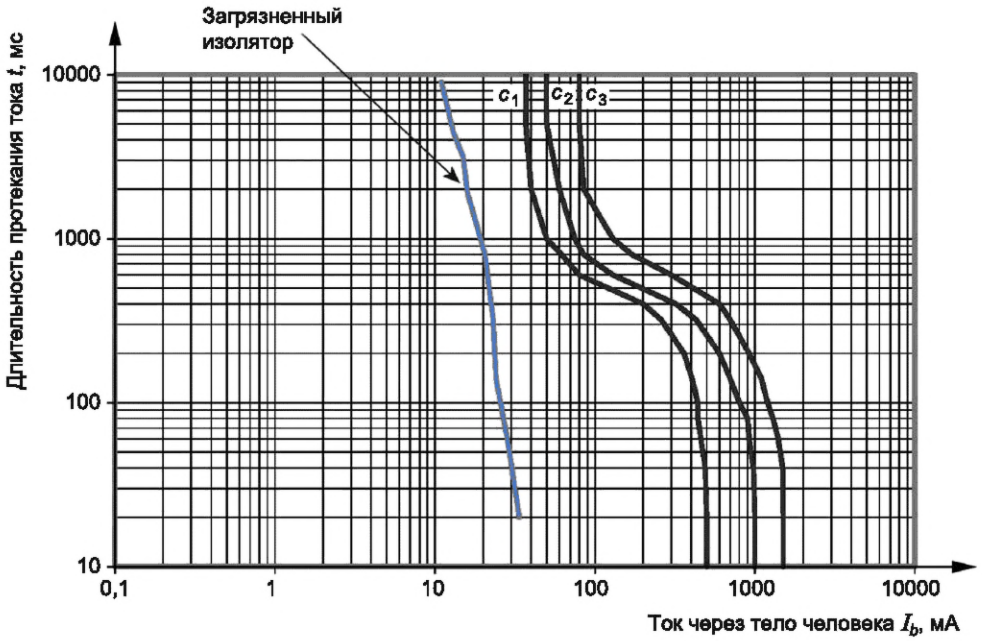


Рисунок 19 — Кривая BT, нанесенная на кривые зависимости тока от времени для переменного тока (см. рисунок А.19 ГОСТ Р 70646.1—2023)

11 Воздействие электрического тока на тело человека, погруженное в воду

11.1 Общие положения

В настоящем разделе рассмотрено воздействие электрического тока на тело человека в случае, когда тело погружено в воду, имеющую различные степени электропроводности. Рассмотрены токи на частоте 50/60 Гц и постоянные токи, при этом воздействие токов других частот может быть оценено с помощью информации, приведенной в [3], [4].

Примечания

1 Если не указано иное, напряжение и токи имеют синусоидальную форму и величины выражены в виде действующего значения.

2 В настоящем стандарте термин «вода» используют для описания чистой воды, а также растворов солей и других примесей в чистой воде.

11.2 Удельное электрическое сопротивление водных растворов и тела человека

Чистая вода практически не проводит ток, но когда в нее добавлены примеси, например соль, удельное электрическое сопротивление воды может существенно снижаться. В таблице 2 приведены значения удельного сопротивления типичных водных растворов, в которых люди могут находиться частично или полностью.

Таблица 2 — Удельное электрическое сопротивление водных растворов

Водный раствор	Удельное электрическое сопротивление, Ом · см
Дождевая вода	От 254 до 42 000
«Стандартная» жесткая вода	1780
Водопроводная вода	От 1290 до 16 000
Вода для стирки (водопроводная вода с добавлением средства для стирки)	520
Вода в плавательном бассейне	300
Изотонический (нормальный) физиологический раствор	60

Окончание таблицы 2

Водный раствор	Удельное электрическое сопротивление, Ом · см
Морская вода	22
Примечание — Значения сопротивления в данной таблице примерно соответствуют комнатной температуре, при изменении температуры сопротивление будет меняться.	

Если тело человека погружено в электропроводящую воду, то на путь протекания тока в воде оказывает влияние соотношение между удельным электрическим сопротивлением этого тела, не являющимся однородным, и воды. Если удельное сопротивление воды меньше, чем погруженного в нее тела (например, морской воды), то большая часть тока будет протекать за пределами тела человека, а не через него. Однако, если вода имеет большее, чем у тела человека, удельное сопротивление (например, вода в озере), то большая часть тока будет протекать по цепи с меньшим сопротивлением и сконцентрируется в теле человека. Наличие тела вносит искажения в электрические поля и пути протекания токов в воде. Наименьшие искажения в электрические поля и пути протекания токов будут внесены при равенстве удельных электрических сопротивлений воды и частей тела в воде. Однако, вследствие неоднородности тела человека, некоторая степень искажения электрических полей и путей протекания тока в воде будет возможна всегда.

Напряженность электрического поля (выраженная в В/м) равна произведению удельного электрического сопротивления (в Ом · см) и плотности тока (в А/см^2). По этой причине при наличии двух параллельных путей, имеющих одинаковую напряженность электрического поля вдоль них, по пути с более низким удельным электрическим сопротивлением будет протекать ток пропорционально большей плотности.

В таблице 3 показаны примерные значения удельного электрического сопротивления различных частей тела человека при нормальной температуре тела. Значения соответствуют воздействию постоянного тока или переменного тока низкой частоты.

Таблица 3 — Удельное электрическое сопротивление тканей тела человека

Ткани тела человека	Удельное электрическое сопротивление, Ом · см
Кровь	62,9*
Спинномозговая жидкость	64,6
Рука (часть тела)	160
Скелетная мышца	240
Шея (часть тела)	280
Пальцы и ладонь (часть тела)	280
Грудная клетка (часть тела)	От 375 до 455
Туловище (часть тела)	415
Мозг	588
Голова (часть тела)	840
Сердечная мышца	От 925 до 1150
Кость	16 000
* Данное значение относится к плазме крови без кровяных клеток в образце. С увеличением количества клеток в образце удельное электрическое сопротивление будет расти до значения приблизительно 300 Ом · см.	
Примечание — Тело человека неоднородно по своему составу и, вследствие этого, по удельному электрическому сопротивлению. Значения, приведенные в таблице, особенно для частей тела, следует рассматривать как усредненные значения.	

11.3 Кондуктивные токи, протекающие по телу, погруженному в воду

Внутреннее полное сопротивление источника электроэнергии, вызывающего протекание тока в воде, может быть как низким, так и высоким, в зависимости от его вида и конструкции. Если внутреннее полное сопротивление источника мало по сравнению с полным сопротивлением воды и погруженного тела, то источник можно рассматривать в качестве источника напряжения. В этом случае ток через тело и воду определяется в большей степени полным сопротивлением различных параллельных проводящих путей в воде и не ограничивается внутренним сопротивлением источника. Наличие путей протекания тока, подключенных параллельно телу, незначительно влияет на ток, протекающий по нему. Низкое входное сопротивление источника позволяет запитать от него каждый из параллельных проводящих путей, при этом ток, по существу, определяется полным сопротивлением каждого отдельного пути.

Если внутреннее полное сопротивление источника велико по сравнению с полным сопротивлением воды и погруженного тела, то источник можно рассматривать в качестве источника тока. В этом случае значение суммарного тока, протекающего от источника через воду и тело, определяется напряжением источника, разделенным на внутреннее сопротивление источника. Сопротивление внешней цепи мало в сравнении с внутренним сопротивлением источника и влияет незначительно. Ток в воде делится между телом и проводящими путями вокруг тела. Большая часть тока протекает по пути меньшего сопротивления. В крайнем случае, если принять воду в качестве идеального проводника, по телу ток протекать не будет, так как он будет протекать рядом с телом через воду, обладающую высокой проводимостью. В другом крайнем случае, если вода имеет высокое удельное сопротивление, то почти весь ток будет сконцентрирован в теле человека.

В таблице 4 приведены качественные соотношения между удельным сопротивлением водного раствора (по отношению к удельному сопротивлению погруженного в него тела человека) и характеристикой полного внутреннего сопротивления источника электроэнергии (импеданс источника по отношению к импедансу раствора и погруженного тела).

Таблица 4 — Качественные соотношения между удельным электрическим сопротивлением водного раствора и характеристикой полного внутреннего сопротивления источника электроэнергии

Наименование показателя	Водный раствор с высоким удельным сопротивлением	Водный раствор с низким удельным сопротивлением
Источник напряжения (низкое значение полного внутреннего сопротивления источника по отношению к полному сопротивлению комбинации воды и погруженного в нее тела)	Ток через тело определяется напряжением источника и полным сопротивлением тела, включенного последовательно с сопротивлением воды, расположенной между телом и электродами. Чем выше удельное сопротивление воды, включенной последовательно с телом, тем меньше ток через тело	Ток через тело определяется напряжением источника и полным сопротивлением тела, включенного последовательно с сопротивлением воды, расположенной между телом и электродами. Чем ниже удельное сопротивление воды, включенной последовательно с телом, тем больше ток через тело
Источник тока (высокое значение полного внутреннего сопротивления источника по отношению к полному сопротивлению комбинации воды и погруженного в нее тела)	Суммарный ток определяют в результате деления напряжения источника на его полное внутреннее сопротивление. Ток через тело определяется соотношением между значениями полных сопротивлений тела в воде и воды, расположенной параллельно телу. Чем выше удельное сопротивление воды, чем больший ток протекает по телу	Суммарный ток определяют в результате деления напряжения источника на его полное внутреннее сопротивление. Ток через тело определяется соотношением между значениями полных сопротивлений тела в воде и воды, расположенной параллельно телу. Чем ниже удельное сопротивление воды, чем меньший ток протекает по телу

11.4 Физиологические реакции, вызываемые токами, протекающими по телу, погруженному в жидкость

Если тело полностью погружено в воду, возникновение реакции чувствительности и реакции испуга маловероятно. Для полностью погруженного тела плотность тока через кожу обычно мала, несмотря

на то, что ток, протекающий через тело в целом и через некоторые внутренние ткани (мышцы, кровь, нервы и т. п.), может быть значительным. Вследствие низкой плотности тока, протекающего через кожу, через внутренние части тела, погруженного в воду, может протекать ток опасных значений, не вызывая при этом ощущений, обычно сопутствующих воздействию электрическим током.

Физиологические реакции на ток в теле, включающие в себя мышечные судороги (обездвиживание), могут быть особенно опасны, когда тело погружено в воду, поскольку они могут влиять на способность человека плыть или поддерживать голову над поверхностью воды. Подобное воздействие на нормальное управление мышцами может привести к тому, что человек утонет.

ФЖ может происходить, когда ток достаточного уровня протекает по телу в районе сердца. Ориентация тела по отношению в электрическому полю в воде не всегда постоянна и может непрерывно меняться. По этой причине следует учитывать возможность, что ток будет протекать по телу в наиболее неблагоприятном направлении, при котором плотность тока в сердце будет максимальна. Например, при определенном положении тела по отношению к электродам в воде ток может втекать напрямую в грудную клетку и вытекать через левую руку.

По телу человека, погруженного в большое количество воды, которое электрически изолировано от земли и которое приобрело потенциал относительно земли от источника, но при этом разности потенциалов в воде отсутствуют (в воде отсутствует электрическое поле), не будет протекать ток до тех пор, пока человек, находясь в воде, не прикоснется к проводящей части, присоединенной к земле. В этом случае ток будет протекать из воды через большую площадь кожи, погруженной в воду, в тело человека и далее через конечность, которой человек касается заземленного элемента. Возможно, человек будет не способен отпустить этот заземленный элемент и если ток через тело будет достаточно велик, он вызовет нарушения дыхания и ФЖ.

Электрические ожоги для погруженного в воду тела менее вероятны вследствие охлаждения кожи водой.

Если тело человека полностью погружено в воду, то ток, протекающий через голову, может вызывать ряд других физиологических реакций. Небольшие токи могут вызывать покалывающее или жалящее ощущение. Ток бóльших значений может вызывать раздражение лицевых мышц. Токи еще бóльших значений могут вызывать раздражение зрительного нерва и появление фосфенов. Фосфены — это зрительное ощущение, возникающее от действия внешнего раздражителя на глаз, не связанного со светом, в данном случае, от электрического тока. Механическое давление на закрытый глаз также может вызывать фосфены. Хотя фосфены сами по себе не несут вреда, они могут напугать неподготовленного человека и вызвать бессознательную или даже паническую реакцию, что может повлечь за собой другие риски, в том числе привести к тому, что человек утонет. Непосредственные воздействия от тока полностью исчезают при прекращении его протекания, однако, еще бóльшие токи могут вызывать боли в верхней части лица. Эти боли проходят через промежуток времени от нескольких минут до нескольких часов. Такие токи также могут вызывать нарушения чувства равновесия. Данный эффект проходит, но это может продолжаться до нескольких дней.

11.5 Пороговые значения тока

Для тела, погруженного в воду, пороговые значения токов для физиологических реакций не являются однозначно определяемыми. Существует слишком много параметров, которые при движении тела относительно электродов источника в воде могут оказывать непрерывное влияние на полное электрическое сопротивление тела, каждый проводящий путь протекания тока и значение тока в этом пути. Ниже приведена предварительная оценка предельных значений тока для случая, когда тело человека погружено в воду с низким удельным электрическим сопротивлением. Испытания по определению этих значений были проведены в воде с удельным сопротивлением 22 Ом · см, моделирующей морскую воду, которая была подготовлена путем добавления хлорида натрия в водопроводную воду.

В общем случае, если ток частотой 50/60 Гц действующим значением 5 мА протекает по телу человека, он способен вызывать мышечные судороги, которые могут привести к нарушениям способности плыть, сбоям дыхания и даже ФЖ. Когда человек погружен в воду, ток может протекать непосредственно через грудную клетку, не протекая по конечностям. Кроме того, сохранение контроля над мышцами важно, чтобы не утонуть. Значение 5 мА не коррелируется с кривой *b* на рисунке А.19 ГОСТ Р 70646.1—2023. Условия, когда тело погружено в воду, отличаются от обычного сценария поражения электрическим током, поэтому здесь руководствуются другими соображениями.

Для измерения тока, создаваемого в воде источником с большим внутренним полным сопротивлением, иногда используют резистор сопротивлением 50 Ом. Однако, это значение может быть слишком

велико для корректной модели полного сопротивления тела. Это становится важным, когда источник имеет низкое внутреннее сопротивление. В этом случае значение полного сопротивления модели тела в значительной степени влияет на ток и должно более точно моделировать тело.

При протекании через грудную клетку тела ребенка тока 5 мА частотой 50/60 Гц в теле может быть создана плотность тока 30 мкА/см^2.

11.6 Безопасные значения напряжений

При разработке стандартов на продукцию для таких объектов как плавательные бассейны и бани, где происходит погружение тела в воду, применяют ограничение токов, а не напряжений. Если указывать безопасные уровни напряжений, то они будут очень низкими, возможно, порядка единиц вольт, вследствие очень низкого сопротивления проводящих путей, которые могут существовать внутри погруженного тела.

12 Воздействие однократных однополярных импульсов тока малой длительности

12.1 Общие положения

Однократные однополярные импульсы тока малой длительности в виде прямоугольного или синусоидального импульса, или импульса разряда конденсатора могут быть источником опасности при пробое изоляции в электроприборах, содержащих электронные компоненты, или при касании проводящих частей такого оборудования, находящихся под напряжением. По этой причине для таких видов тока важно установить безопасные предельные значения.

Воздействия импульсов тока, рассматриваемые в настоящем разделе, для времени воздействия 10 мс или более, соответствуют воздействиям, приведенным в ГОСТ Р 70646.1.

В 12.2 и 12.4 рассмотрены диапазоны времен от 1,0 до 10 мс. Принято, что главным фактором образования ФЖ для различных видов однополярных импульсов тока являются значения $I \cdot t$ и $I^2 \cdot t$.

Экстраполяция различных импульсов в диапазоне от 1 до 100 мкс показана на рисунке 20. Заряд, переданный мембране, является наиболее значимым фактором деполяризации мембраны. Значение тока и длительность импульса с постоянной времени T, приложенного к мембране с целью воздействия, являются существенными параметрами для определения заряда и, вследствие этого, риска возникновения ФЖ.

Установлено, что наилучшим образом влияние на сердце отражает количество электрического заряда, а не рассчитанное действующее значение тока.

12.2 Воздействие однополярных импульсов тока малой длительности

12.2.1 Формы сигнала

На рисунке 20 приведены формы сигналов для прямоугольных импульсов, синусоидальных импульсов и для тока разряда конденсатора. Следует различать следующие значения тока:

I_{DC} — значение тока прямоугольного импульса,

$I_{AC,\ RMS}$ — действующее значение тока синусоидального импульса,

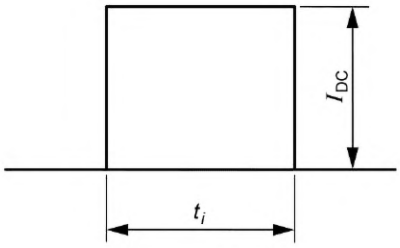
$I_{AC(p)}$ — амплитудное значение тока синусоидального импульса,

$I_{C,\ RMS}$ — действующее значение тока разряда конденсатора для времени $3T$,

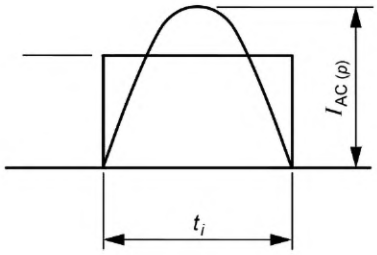
$I_{C(p)}$ — амплитудное значение тока разряда конденсатора.

Примечание — Если U_e — это напряжение на конденсаторе в начале разряда через тело человека и R_e — начальное сопротивление тела человека, то амплитудное значение тока разряда конденсатора $I_{C(p)}$ вычисляют по формуле

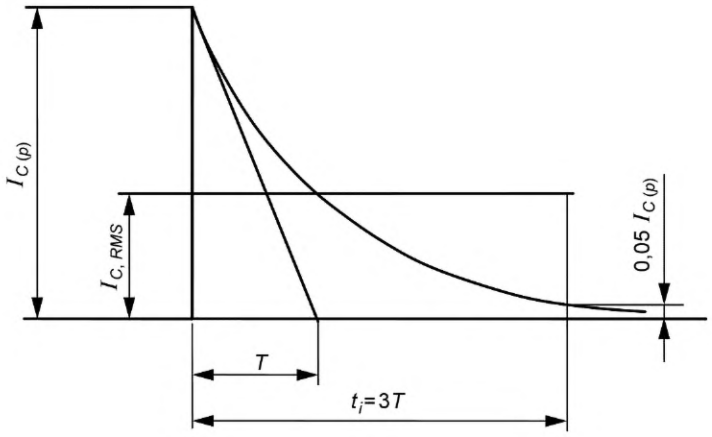
$$I_{C(p)} = \frac{U_e}{R_e}. \qquad (18)$$



а) Прямоугольный импульс



б) Синусоидальный импульс



в) Ток разряда конденсатора

Рисунок 20 — Формы токов для прямоугольных импульсов, синусоидальных импульсов и для токов разряда конденсатора

12.2.2 Определение удельной энергии фибрилляции F_e

Удельную энергию фибрилляции F_e для различных форм импульсов вычисляют по формулам:

а) для прямоугольных импульсов

$$F_e = I_{DC}^2 t_i; \tag{19}$$

б) для синусоидальных импульсов

$$F_e = \frac{I_{AC(p)}^2}{2} t_i = I_{AC,RMS}^2 t_i; \tag{20}$$

в) для импульсов разряда конденсатора с постоянной времени T

$$F_e = I_{C(p)}^2 \frac{T}{2} = I_{C,RMS}^2 t_i. \tag{21}$$

На рисунке 21 приведены значения токов для прямоугольных импульсов, синусоидальных импульсов и импульсов разряда конденсатора с постоянной времени T, имеющих одинаковые значения удельной энергии фибрилляции F_e и времени воздействия t_i. Для этого случая справедливо соотношение:

$$I_{DC} = \frac{I_{AC(p)}}{\sqrt{2}} = \frac{I_{C(p)}}{\sqrt{6}}. \tag{22}$$

Примечание — Соотношение $I_{DC} = \frac{I_{C(p)}}{\sqrt{6}}$ получено следующим образом:

$$F_e = I^2_{C(p)} \int_0^{\infty} e^{-\frac{2t}{T}} dt = I^2_{C(p)} \frac{T}{2}, \tag{23}$$

$$I^2_{C,\,RMS} 3T = I^2_{DC} 3T = I^2_{C(p)} \frac{T}{2}, \tag{24}$$

$$I_{C,\,RMS} = I_{DC} = I_{C(p)} \frac{1}{\sqrt{6}}. \tag{25}$$

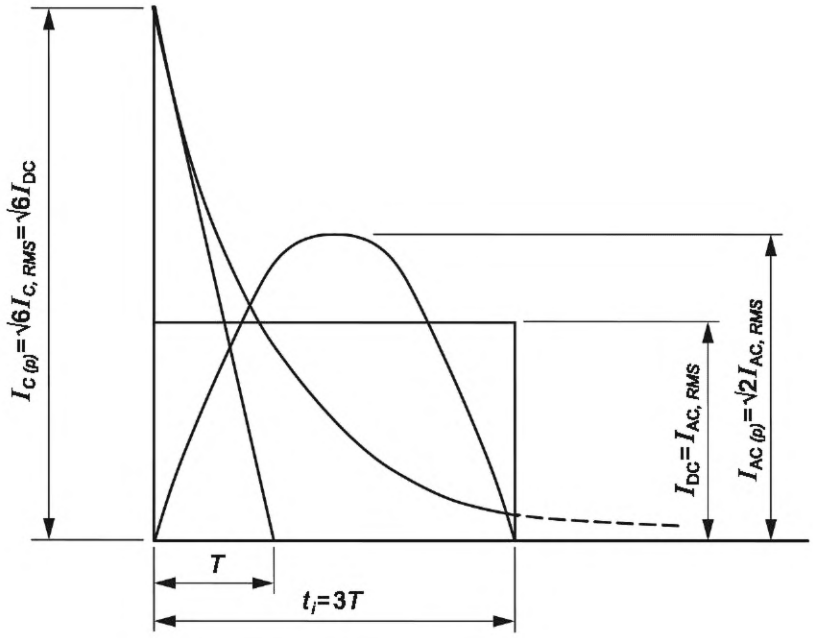
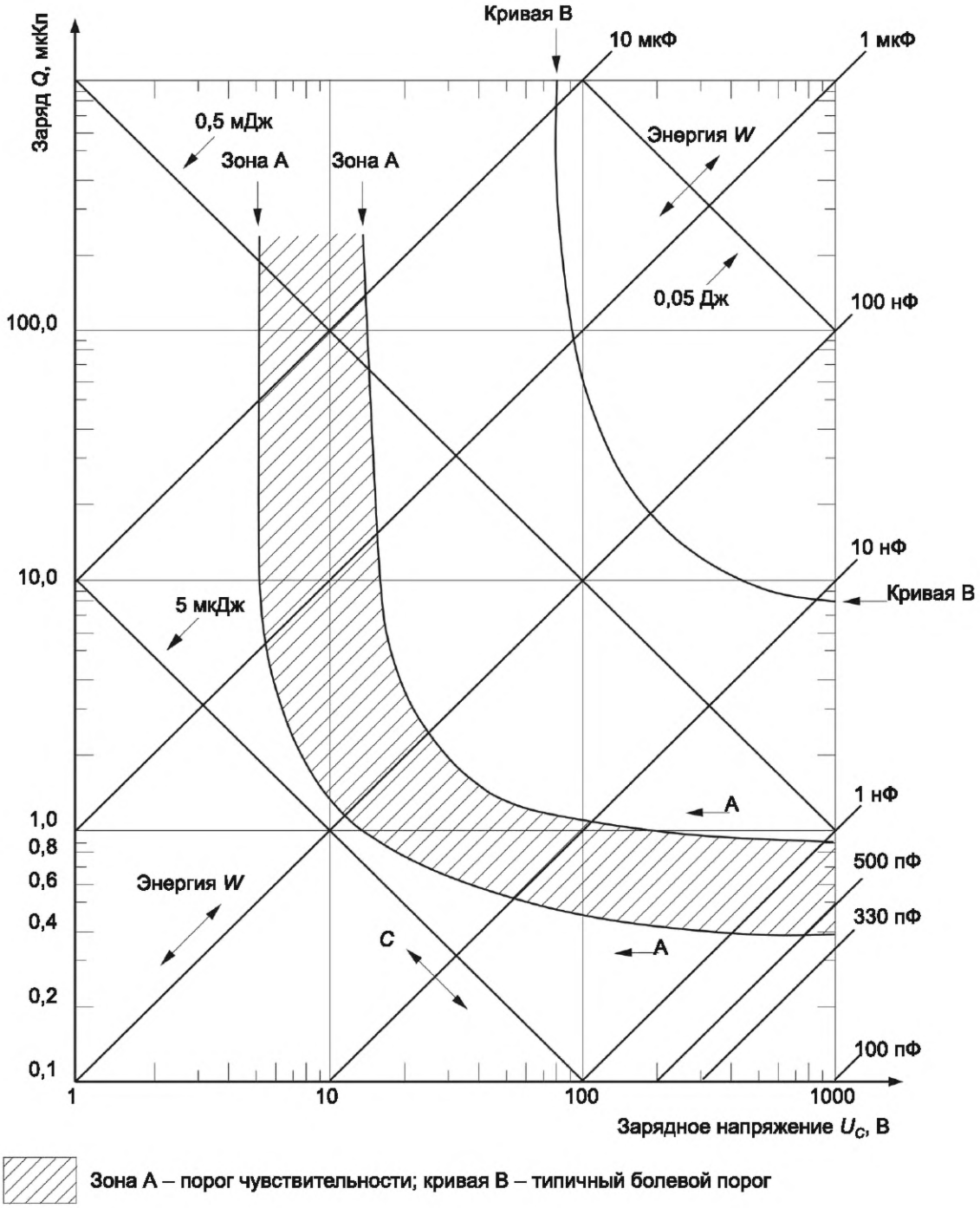


Рисунок 21 — Прямоугольный импульс, синусоидальный импульс и импульс разряда конденсатора с одинаковыми удельными энергиями фибрилляции и временем воздействия

12.3 Порог чувствительности и болевой порог при разряде конденсатора

Данные пороговые значения зависят от формы электродов, заряда импульса и амплитуды тока. На рисунке 22 приведены значения порога чувствительности и болевого порога в функции заряда и зарядного напряжения конденсатора для человека, касающегося больших электродов сухими руками.

Болевому порогу соответствуют значения удельной энергии примерно от 50 до $100 \cdot 10^6$ $А^2с$ для пути протекания тока через конечности при применении больших электродов.



Примечание — Диагональные оси проградуированы для емкости *C* и энергии *W*. С помощью этих осей на пересечении значений для зарядного напряжения и емкости можно определить заряд и энергию импульса.

Рисунок 22 — Порог чувствительности и болевой порог для тока разряда конденсатора (сухие руки, большие электроды)

12.4 Порог фибрилляции желудочков

12.4.1 Общие положения

Порог ФЖ зависит от формы, длительности и значения тока импульса, фазы сердечного цикла в момент начала импульса, пути протекания тока по телу человека и от физиологических характеристик человека.

Эксперименты на животных показывают:

- для импульсов малой длительности и относительно малой энергии, в общем случае, ФЖ имеет место, только если импульс воздействует в течение уязвимого периода сердечного цикла.

Примечание — Для импульсов большой энергии, воздействующих вне уязвимого периода сердечного цикла, возникновение фибрилляции возможно даже по истечении нескольких минут после воздействия;

- при воздействии однополярных импульсов со временем воздействия менее 10 мс определяющим для наступления ФЖ является удельный заряд фибрилляции F_e.

Пороговые значения для ФЖ приведены на рисунке 23. Для 50 % вероятности возникновения ФЖ значение F_q составляет приблизительно 0,005 А · с, а значение F_e растет от примерно 0,01 $А^2$·с для длительности импульса t_i = 4 мс до 0,02 · $А^2$·с для t_i = 1 мс.

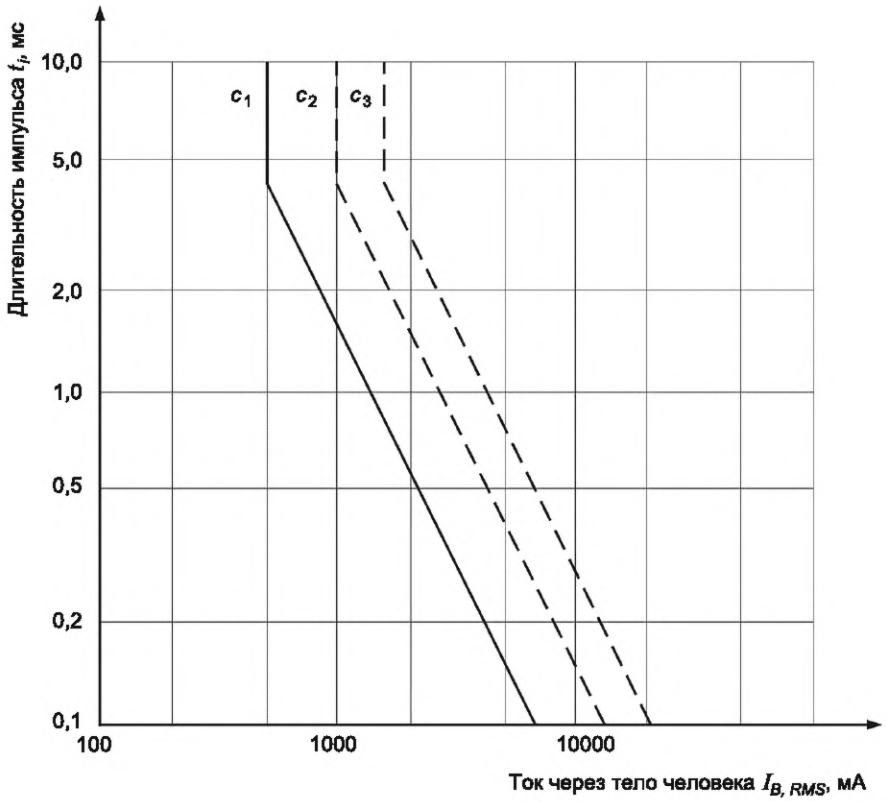


Рисунок 23 — Вероятность возникновения фибрилляции при протекании тока от левой ладони до ступней ног

Кривые на рисунке 23 соответствуют вероятностям возникновения фибрилляции при протекании тока от левой руки к ступням. Другие пути протекания тока рассмотрены в 6.9 ГОСТ Р 70646.1—2023.

Ниже кривой c_1 — фибрилляция отсутствует.

Между кривыми c_1 и c_2 — низкий риск возникновения фибрилляции (вероятность не более 5 %).

Между кривыми c_2 и c_3 — средний риск возникновения фибрилляции (вероятность не более 50 %).

Выше кривой c_3 — высокий риск возникновения фибрилляции (вероятность более 50 %).

12.4.2 Примеры

Для пояснения практического применения соотношений, указанных в 12.4.1, приведены два примера, а в таблицах 5 и 6 представлены соответствующие им результаты воздействий электрического

тока. В первом примере рассмотрен разряд конденсатора с постоянной времени T = 1 мс и временем воздействия $t_i = 3T$ = 3 мс, что может быть рассмотрено в рамках настоящего стандарта. Во втором примере постоянная времени равна T = 10 мс, т. е. t_i = 30 мс, откуда следует, что пороговые значения для ФЖ следует принимать по рисунку А.19 ГОСТ Р 70646.1—2023.

Пример 1

Воздействие разряда конденсатора на тело человека:

конденсатор емкостью C = 1 мкФ, зарядные напряжения — 10, 100, 1000, 10 000 В.

Путь протекания тока: рука — нога (ступня), начальное значение сопротивления тела R_i = 1000 Ом (см. сноску в таблице 5).

Постоянная времени T = 1 мс, т. е. время воздействия $t_i = 3T$ = 3 мс.

Удельная энергия фибрилляции $F_e = I^2_{C,\,RMS} t_i \approx \frac{W_C}{R_i}$.

Таблица 5 — Воздействие импульсов электрического тока для примера 1

Наименование показателя	Зарядное напряжение U_e, В			
	10	100	1000	10 000
Ток разряда Амплитудное значение $I_{C(p)}$, А	0,01	0,1	1	10
Действующее значение тока разряда, А $I_{C,\,RMS} = I_{C(p)} \frac{1}{\sqrt{6}}$	0,0041	0,041	0,41	4,1
Удельный заряд F_q, Кл	$0{,}01 \cdot 10^{-3}$	$0{,}1 \cdot 10^{-3}$	10^{-3}	$10 \cdot 10^{-3}$
Энергия разряда W_C, Дж	$0{,}05 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	0,5	50
Удельная энергия фибрилляции F_e при R_i = 1000 Ом, $А^2 \cdot с$*	$0{,}05 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$0{,}5 \cdot 10^{-3}$	$50 \cdot 10^{-3}$
Физиологические реакции	Легкие	Неприятные	Болезненные	Вероятно возникновение ФЖ

* Значение R_i = 1000 Ом произвольно выбрано для данного примера. Его не следует путать с величиной R_i для категории населения, соответствующей процентильному рангу, равному 95 % согласно разделу 5 ГОСТ Р 70646.1—2023.

Примечания

1 F_q выражают в Кл или А · с.

2 W_C выражают в Дж или Вт · с.

Пример 2

Воздействие разряда конденсатора на тело человека:

конденсатор емкостью C = 20 мкФ, зарядные напряжения — 10, 100, 1000, 10 000 В.

Путь протекания тока: рука — туловище, начальное значение сопротивления тела R_i = 500 Ом (см. сноску * в таблице 6).

Постоянная времени T = 10 мс, т. е. время воздействия $t_i = 3T$ = 30 мс (см. сноску ** в таблице 6).

Удельная энергия фибрилляции $F_e = I^2_{C,\,RMS} t_i \approx \frac{W_C}{R_i}$.

Таблица 6 — Воздействие импульсов электрического тока для примера 2

Наименование показателя	Зарядное напряжение U_e, В			
	10	100	1000	10 000
Ток разряда Амплитудное значение $I_{C(p)}$, А	0,01	0,1	1	10
Действующее значение тока разряда, А $I_{C,\,RMS} = I_{C(p)} \frac{1}{\sqrt{6}}$	0,008	0,08	0,8	8
Удельный заряд F_q, Кл	$0{,}2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$20 \cdot 10^{-3}$	$200 \cdot 10^{-3}$
Энергия разряда W_C, Дж	10^{-3}	0,1	10	1000
Удельная энергия фибрилляции F_e при R_i = 500 Ом, $А^2 \cdot с$*,**	—	—	—	—
Физиологические реакции	Легкие	Болезненные	Опасные, но возникновение ФЖ маловероятно	Опасные, вероятно возникновение ФЖ

* Значение R_i = 500 Ом произвольно выбрано для данного примера. Его не следует путать с величиной R_i для категории населения, соответствующей процентильному рангу, равному 5 % согласно разделу 5 ГОСТ Р 70646.1—2023.

** Поскольку время воздействия t_i более 10 мс, то значения порога фибрилляции были приняты по рисунку А.19 ГОСТ Р 70646.1—2023.

Примечания

1 F_q выражают в Кл или А · с.

2 W_C выражают в Дж или Вт · с.

Приложение А
(обязательное)

Анализ сигналов нестандартной, сложной и случайной форм

А.1 Общие положения

Осциллограмма сигнала оцифрована и подвергнута фильтрации согласно требованиям 10.2.3.

Ниже приведено формальное описание метода, а затем с помощью примеров приведены разъяснения.

А.2 Формальная теоретическая формулировка метода

Фрагмент сигнала, оцифрованный с шагом по времени *t,* состоящий из *N* интервалов, представлен на рисунке А.1.



N — число интервалов оцифровки для фрагмента осциллограммы; *t* — шаг оцифровки (выборочный интервал, период дискретизации), с; *i* — мгновенное значение тока в какой-либо точке

Рисунок А.1 — Определение фрагмента сигнала случайной сложной формы

Фрагмент состоит из $N + 1$ точек данных и его длительность составляет $N \cdot t$ с. Не обязательно, чтобы значение *t* было постоянным, но на практике так обычно и происходит. Если это значение меняется, то нижеприведенные выражения, в частности по отношению к длине шага оцифровки, следует модифицировать. Приведенные ниже выражения действительны только для постоянного шага оцифровки *t.*

В пределах фрагмента рассмотрен участок времени (выборка) длительностью *k* шагов. Данный участок содержит $k + 1$ точку данных. Выборку начинают в точке *p* и заканчивают в точке $p + k$. На рисунке А.2 это показано в графическом виде.



k — длина рассматриваемого участка времени, выраженная в количестве шагов оцифровки; *p* — начальная точка рассматриваемого участка

Рисунок А.2 — Определение длительности выборки

Действующее значение тока $i_{interval}^{RMS}$ для рассматриваемого участка (выборки) вычисляют по формуле

$$i_{interval}^{RMS} = \sqrt{\frac{1}{k+1}\sum_{m=p}^{p+k} i_m^2}. \qquad (A.1)$$

Рассчитывают действующее значение для всех возможных выборок длительностью *k* шагов в пределах фрагмента осциллограммы и находят его максимальное значение. Для подсчета действующего значения для всех возможных выборок длительностью *k* шагов, следует взять выборку, начинающуюся в точке i_0 и заканчивающуюся в точке i_k и рассчитать действующее значение для этой выборки. Затем последовательно берут выборку длиной *k* шагов, которую начинают в точках i_1, i_2, i_3 и т. д. до тех пор, пока они не закончатся. Последняя выборка длитель-

ностью k шагов начинается в точке i_{N-k} и заканчиватся в точке i_N. Эта точка означает окончание рассмотрения выбороки длительностью k шагов.

Максимальное действующее значение тока для всех этих выборок является точкой на кривой ВТ для времени $k \cdot t$, то есть

$$\text{ВТ}_{kt} = \max_{p=0}^{N-k}\left(\sqrt{\frac{1}{k+1}\sum_{m=p}^{p+k} i_m^2}\right). \quad \text{(А.2)}$$

Процедуру повторяют для всех значений k от 1 до N, то есть

$$\text{ВТ}_{kt} = \max_{p=0}^{N-k} \ldots \left(\sqrt{\frac{1}{k+1}\sum_{m=p}^{p+k} i_m^2}\right) \forall k = 1 \ldots N. \quad \text{(А.3)}$$

Данное выражение определяет кривую вероятных токов полностью и метод может потребовать большого количества расчетов, но отдельные пользователи могут, по желанию, просто выбрать поддиапазон значений k для определения меньшего количества точек на кривой ВТ.

В целом, кривую ВТ определяют посредством последовательной обработки участков данных заданной длительности времени и получением действующего значения тока для каждой длительности. Этого достигают, осуществляя последовательные выборки данных, каждый раз начиная со следующей точки, до тех пор пока не будут рассчитаны все действующие значения для данной длительности. Из полученных значений выбирают максимальное, которое будет являться точкой кривой ВТ для данного времени. Затем процедуру последовательно повторяют для бóльших длительностей для получения достаточного количества точек на графике кривой ВТ (зависимость максимальных действующих значений тока от времени воздействия). Вследствие этого по методу не определяют скользящее среднее действующее значение, так как длительность времени контролируется и последовательно увеличивается.

Применение метода проиллюстрировано в нижеприведенных примерах.

В частности, приведены пояснения по кривой допустимых значений, с которой сравнивают кривую ВТ, и выбору шага оцифровки t.

А.3 Демонстрация расчетов

А.3.1 Общие положения

Рассмотрен фрагмент заданной осциллограммы, оцифрованной с шагом оцифровки t = 20 мс.

В данном примере 10 значений токов, соответствующих 20 мс шагу оцифровки (20, 40, 60 … 200 мс), равны соответственно 5, 7, 8, 4, 9, 11, 9, 7, 3 и 1 мА. ВТ должен быть определен для всех возможных длительностей при последовательном увеличении длительностей. Для каждой рассмотренной длительности максимальное действующее значение тока будет определять точку на кривой ВТ для данной длительности. Таким образом последовательно находят точки на кривой ВТ для всех длительностей.

Метод применяют следующим образом.

Для получения действующих значений сначала значения токов возводят в квадрат. Для каждого шага оцифровки (20, 40, 60 … 200 мс) равны соответственно 25, 49, 64, 16, 81, 121, 81, 49, 9 и 1 мА^2. Возведение в квадрат также гарантирует, что положительные и отрицательные значения будут рассмотрены равным образом.

В качестве первой длительности выбрают 20 мс, соответствующая ей выборка включает в себя только одну точку. Максимальное значение составляет 121 мА^2. Отсюда значение вероятного тока для всех возможных интервалов длительностью 20 мс составляет 11 мА. Его и наносят на кривую ВТ для времени 20 мс (см. рисунок А.3).

Следующую длительность принимают равной 60 мс, каждая соответствующая ей выборка включает в себя три точки. Рассчитывают вероятный ток для каждой возможной выборки длительностью 60 мс, не забывая делить на число точек (3) в выборке:

а) (25 + 49 + 64)/3 = 46,0 мА^2;
б) (49 + 64 + 16)/3 = 43,0 мА^2;
в) (64 + 16 + 81)/3 = 53,7 мА^2;
г) (16 + 81 + 121)/3 = 72,7 мА^2;
д) (81 + 121 + 81)/3 = 94,3 мА^2;
е) (121 + 81 + 49)/3 = 83,7 мА^2;
ж) (81 + 49 + 9)/3 = 46,3 мА^2;
и) (49 + 9 + 1)/3 =19,7 мА^2.

Максимальное значение составляет 94,3 мА^2, отсюда на кривой ВТ для времени 60 мс (для групп из трех точек) значение тока составляет 9,7 мА (см. рисунок А.3).

Следующую длительность принимают равной 120 мс, каждая соответствующая ей выборка включает в себя шесть точек. Рассчитывают вероятный ток для каждой возможной выборки длительностью 120 мс, не забывая делить на число точек (6) в выборке:

а) (25 + 49 + 64 + 16 + 81 + 121)/6 = 59,3 мА^2;

б) (49 + 64 + 16 + 81 + 121 + 81)/6 = 68,7 мА^2;

в) (64 + 16 + 81 + 121 + 81 + 49)/6 = 68,7 мА^2;

г) (16 + 81 + 121 + 81 + 49 + 9)/6 = 59,5 мА^2;

д) (81 + 121 + 81 + 49 + 9 + 1)/6 = 57,0 мА^2.

Максимальное значение составляет 68,7 мА^2, отсюда на кривой ВТ для времени 120 мс значение тока составляет 8,3 мА (см. рисунок А.3).

Полученные значения образуют кривую ВТ, которая построена на рисунке А.3.

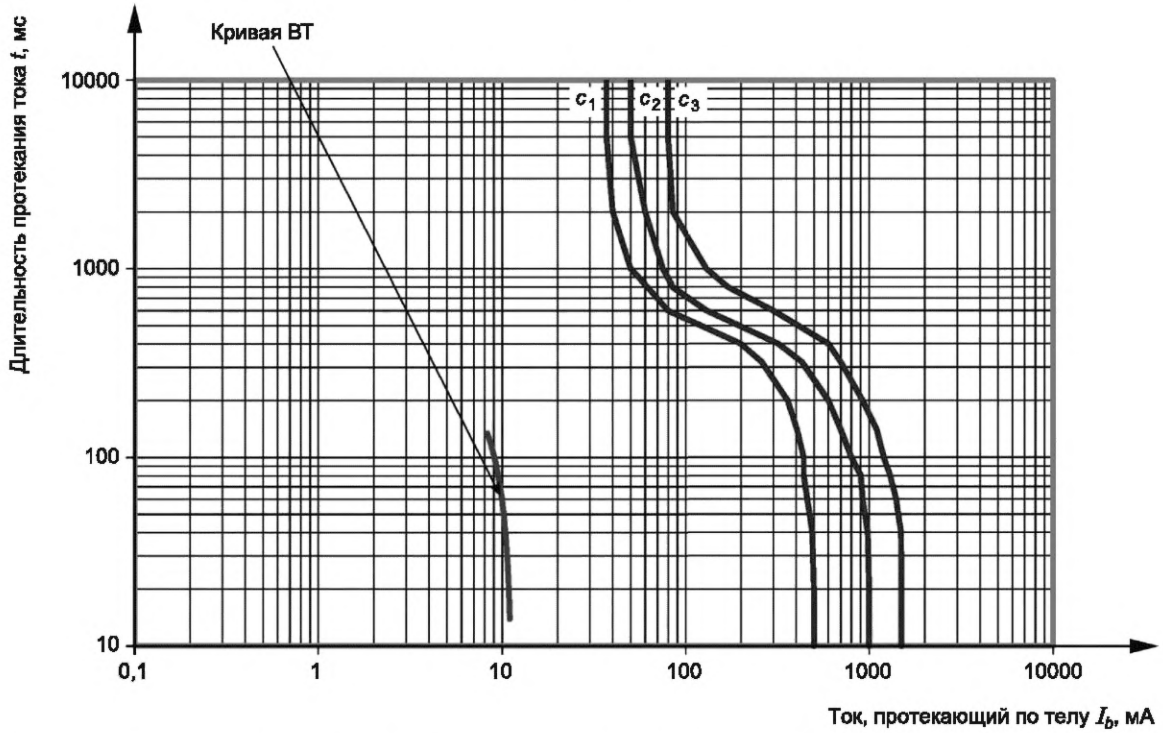


Рисунок А.3 — Кривая ВТ, наложенная на времятоковые зависимости действующих значений переменного тока, для демонстрации метода анализа сигналов случайной сложной формы

В качестве ДТ в данном примере была выбрана кривая c_1. Для любого времени воздействия значения на кривой ВТ не превышают значения на кривой ДТ, отсюда, с точки зрения выбранного критерия, рассматриваемый ток является безопасным.

А.3.2 Выбор допустимого тока

Рассматриваемый метод позволяет преобразовать данные для сравнения их с традиционными кривыми действующих значений, приведенными на рисунке А.19 ГОСТ Р 70646.1—2023. Следует выбрать подходящий уровень ДТ для такого сравнения.

В различных применениях может показаться необходимым выбрать заниженные по сравнению с кривой c_1 значения. При этом могут быть приняты допустимые значения менее, чем на кривой c_1. Во всех случаях значения ДТ не должны быть больше значений на кривой c_1.

Следует отметить, что в данном методе не принимается в расчет снижение порога ФЖ для импульсов, следующих с небольшими интервалами. Если такие импульсы возможны, могут быть приняты меньшие значения ДТ с учетом анализа серий импульсов, рассмотренного в настоящем стандарте.

А.3.3 Выбор шага оцифровки

Выбор шага оцифровки *t* осуществляют после анализа осциллограммы. С одной стороны, в качестве значения тока *i* за выборочный интервал лучше всего подходит максимальное действующее значение в течение этого интервала. Однако это предполагает заметно меньший выборочный интервал и существенную обработку значений в течение интервала выборок для получения результата для какого-либо принятого шага *p*. Считают, что это уве-

личивает сложность более, чем необходимо. Это также требует существенно более сложного режима оцифровки, чем доступный обычно.

Таким образом, в качестве i_p принимают мгновенное значение тока на каждом шаге p при заданном шаге оцифровки t. Если при этом на осциллограмме пропадают существенные детали сигнала, следует принять меньшее значение t.

Как и в случае любого выбора в отношении осциллограммы, анализ может быть повторен при других параметрах.

А.4 Примеры 1 и 2

Ниже приведены два примера использования метода в более реальных обстоятельствах. Сигнал был сгенерирован с помощью метода Монте-Карло.

Примеры типичных сигналов случайной сложной формы, сгенерированных как указано ниже, приведены на рисунках А.4—А.6.

Пример 1

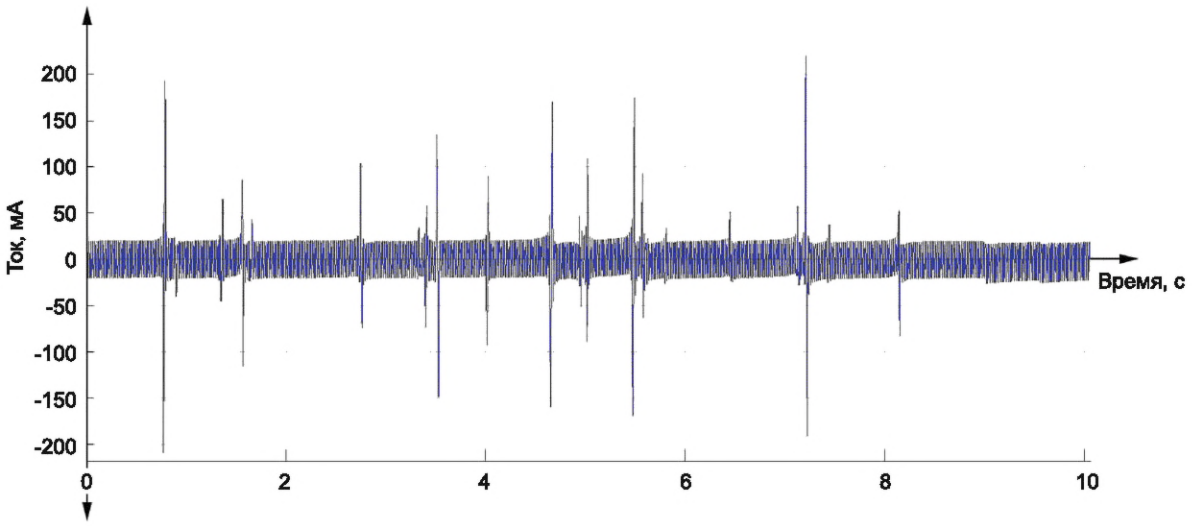


Рисунок А.4 — Сигнал случайной сложной формы, типичный для тех, что использованы в примере 1

В примере 1 использован сигнал случайной сложной формы со следующими параметрами:

а) осциллограмма тока частотой 50 Гц, который не опасен с точки зрения возникновения ФЖ, служит базой для сигнала. В данном случае это ток действующим значением 20 мА. Длительность фрагмента данных равна 10 с;

б) на данную базу в случайных точках, в пределах 10 с, наложены 50 импульсов случайной длительности до 10 мс включительно. Амплитуда импульсов меняется в пределах 200 мА случайным образом. На рисунке А.21 ГОСТ Р 70646.1—2023 показано, что эти импульсы также безопасны;

в) настройка: в данном примере (при реальном анализе подобного не происходит) сразу после каждого импульса добавлен точно такой же с амплитудой противоположного знака. Это сделано для того, чтобы у сигнала отсутствовала постоянная составляющая. Если среднее значение постоянной составляющей не нулевое, то это среднее значение накопится в процессе анализа, особенно для длительных интервалов времени, и повлияет на значение вероятного тока. Возможно, это то, что необходимо в определенных случаях, но здесь нулевое среднее значение необходимо для того, чтобы ожидаемые воздействия от импульсов можно было бы оценить без учета накапливающегося постоянного смещения;

г) сигналы пропущены через ФНЧ с верхней частотой среза 100 Гц. Применен ФНЧ — фильтр высокого порядка с применением цифровых технологий фильтрования. Найдены действующие значения для фрагментов.

Проанализирован фрагмент длительностью 9 с для выборок длительностью 20, 50, 100, 200, 500, 1000, 2000 и 5000 мс.

Для каждой из этих длительностей определены вероятные токи и их значения нанесены на рисунок А.19 ГОСТ Р 70646.1—2023 совместно в кривыми c_1, c_2, c_3, как показано ниже на рисунке А.6.

В сравнении с кривой c_1, принятой в качестве кривой ДТ, маловероятно, что рассматриваемый ток вызовет появление ФЖ.

Пример 2

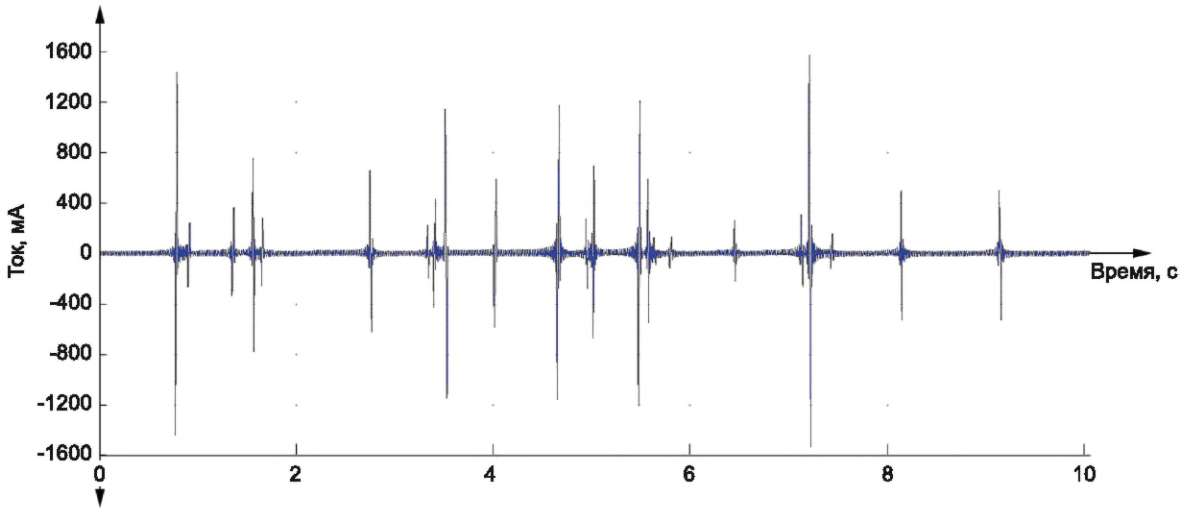


Рисунок А.5 — Сигнал случайной сложной формы, типичный для тех, что использованы в примере 2

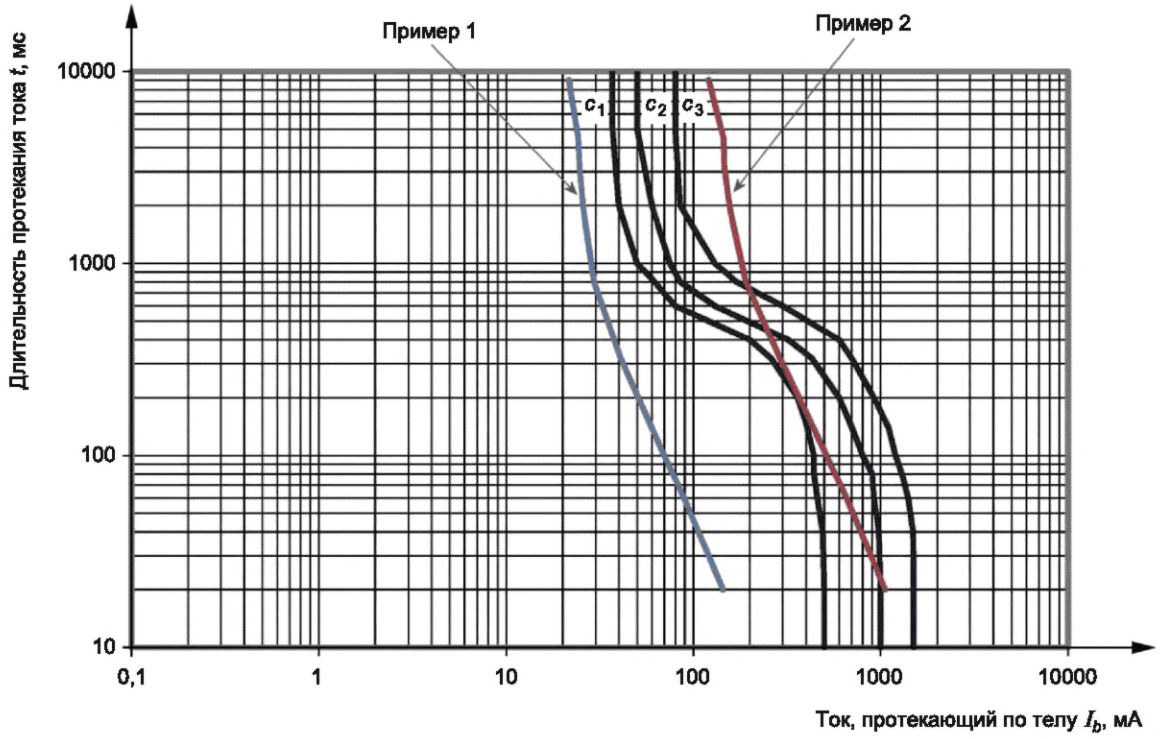


Рисунок А.6 — Кривые ВТ, полученные в примерах 1 и 2 по методу анализа токов случайных сложных форм сигнала, и времятоковые зависимости для действующего значения переменного тока

В примере 2 использован сигнал случайной сложной формы со следующими параметрами:

а) осциллограмма тока частотой 50 Гц, который не опасен с точки зрения возникновения ФЖ, служит базой для сигнала. В данном случае это ток действующим значением 20 мА. Длительность фрагмента данных равна 10 с;

б) на данную базу в случайных точках, в пределах 10 с, наложены 50 импульсов случайной длительности до 10 мс включительно. Амплитуда импульсов меняется в пределах 1500 мА случайным образом. На рисунке А.21 ГОСТ Р 70646.1—2023 показано, что эти импульсы способны вызывать ФЖ;

в) настройка: проведены манипуляции аналогично примеру 1;

г) сигналы пропущены через ФНЧ с верхней частотой среза 100 Гц, аналогично примеру 1.

Проанализирован фрагмент длительностью 9 с для выборок длительностью 20, 50, 100, 200 , 500, 1000, 2000 и 5000 мс.

Для каждой из этих длительностей определены вероятные токи и их значения нанесены на рисунок А.19 ГОСТ Р 70646.1—2023 совместно в кривыми c_1, c_2, c_3, как показано на рисунке А.6.

В сравнении с кривой c_1, принятой в качестве кривой допустимого тока, появление ФЖ не исключено.

Отсюда следует, что в обоих приведенных примерах получены результаты в соответствии с ожиданиями.

Библиография

[1] Руководство ИСО/МЭК 51:2014 — Аспекты безопасности. Руководящие указания по включению их в стандарты

[2] МЭК 60050-801:1994 — Международный электротехнический словарь. Глава 801. Акустика и электроакустика

[3] IEC TP 60479-4:2020 — Воздействие электрического тока на людей и домашних животных. Часть 4. Воздействие ударов молнии

[4] IEC/TP 60479-5:2007 — Воздействие электрического тока на людей и домашних животных. Часть 5. Пороговые значения напряжения касания для психологических воздействий

УДК 621.316.92:006.354 ОКС 13.260

Ключевые слова: воздействие электрического тока на людей и домашних животных, специальные аспекты, требования, переменный синусоидальный ток частотой более 100 Гц, полное электрическое сопротивление тела, пороговые значения тока через тело

Редактор *Н.В. Таланова*
Технический редактор *В.Н. Прусакова*
Корректор *О.В. Лазарева*
Компьютерная верстка *А.Н. Золотаревой*

Сдано в набор 20.06.2023. Подписано в печать 04.07.2023. Формат 60×84⅛. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 5,12. Уч.-изд. л. 4,20.

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