МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СОВЕТ ПО СТАНДАРТИЗАЦИИ, МЕТРОЛОГИИ И СЕРТИФИКАЦИИ
(МГС)
INTERSTATE COUNCIL FOR STANDARDIZATION, METROLOGY AND CERTIFICATION
(ISC)

МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ

**ГОСТ IEC 60664-4— 2017**

# КООРДИНАЦИЯ ИЗОЛЯЦИИ ДЛЯ ОБОРУДОВАНИЯ НИЗКОВОЛЬТНЫХ СИСТЕМ

## Часть 4

## Анализ высокочастотного напряжения

**(IEC 60664-4:2005, IDT)**

**Издание официальное**

Москва
Стандартинформ
2018

gost.e-ecolog.ru

## Предисловие

Цели, основные принципы и основной порядок проведения работ по межгосударственной стандартизации установлены в ГОСТ 1.0—2015 «Межгосударственная система стандартизации. Основные положения» и ГОСТ 1.2—2015 «Межгосударственная система стандартизации. Стандарты межгосударственные, правила и рекомендации по межгосударственной стандартизации. Правила разработки, принятия, обновления и отмены»

**Сведения о стандарте**

1 ПОДГОТОВЛЕН Автономной некоммерческой организацией «НТЦ «Энергия» на основе собственного перевода на русский язык англоязычной версии стандарта, указанного в пункте 5

2 ВНЕСЕН Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии

3 ПРИНЯТ Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 30 ноября 2017 г. № 52)

За принятие проголосовали:

| Краткое наименование страны по МК (ИСО 3166) 004—97 | Код страны по МК (ИСО 3166) 004—97 | Сокращенное наименование национального органа по стандартизации |
|---|---|---|
| Армения | AM | Минэкономики Республики Армения |
| Беларусь | BY | Госстандарт Республики Беларусь |
| Киргизия | KG | Кыргызстандарт |
| Россия | RU | Росстандарт |
| Узбекистан | UZ | Узстандарт |

4 Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 9 ноября 2018 г. № 968-ст межгосударственный стандарт ГОСТ IEC 60664-4—2017 введен в действие в качестве национального стандарта Российской Федерации с 1 июня 2019 г.

5 Настоящий стандарт идентичен международному стандарту IEC 60664-4:2005 «Координация изоляции для оборудования низковольтных систем. Часть 4. Анализ высокочастотного напряжения» («Insulation coordination for equipment within low-voltage system — Part 4: Consideration high-frequency voltage stress», IDT).

Международный стандарт разработан Международной электротехнической комиссией (IEC).

При применении настоящего стандарта рекомендуется использовать вместо ссылочных международных стандартов соответствующие им межгосударственные стандарты, сведения о которых приведены в дополнительном приложении ДА

6 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

*Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодном информационном указателе «Национальные стандарты», а текст изменений и поправок — в ежемесячном информационном указателе «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ежемесячном информационном указателе «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

© Стандартинформ, оформление, 2018

В Российской Федерации 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 . . . 2
3 Термины и определения . . . 2
4 Воздушные зазоры (изоляционные промежутки) . . . 2
4.1 Главные условия . . . 2
4.2 Основная информация . . . 3
4.3 Однородные или приблизительно однородные поля . . . 3
4.4 Неоднородные поля . . . 4
5 Расстояния утечки . . . 5
5.1 Экспериментальные данные . . . 5
5.2 Определение размеров расстояний утечки . . . 5
6 Твердая изоляция . . . 7
6.1 Основной анализ . . . 7
6.2 Влияющие факторы . . . 8
6.3 Определение размеров твердой изоляции . . . 8
7 Высокочастотные испытания . . . 9
7.1 Основные требования . . . 9
7.2 Испытательное напряжение источника . . . 9
7.3 Единство условий . . . 9
7.4 Испытание высокочастотного пробоя . . . 10
7.5 Испытания высокочастотного частичного пробоя . . . 10
7.6 Примеры результатов испытаний . . . 12
8 Несинусоидальные напряжения . . . 12
8.1 Основной анализ . . . 12
8.2 Периодическое импульсное напряжение . . . 12
8.3 Анализ гармонических составляющих . . . 12
8.4 Процедура определения размеров и испытания . . . 13
Приложение А (справочное) Изоляционные характеристики воздушных зазоров при высокочастотном напряжении . . . 14
Приложение В (справочное) Изоляционные характеристики расстояний утечки при высокочастотном напряжении . . . 20
Приложение С (справочное) Изоляционные характеристики твердой изоляции при высокочастотном напряжении . . . 23
Приложение D (обязательное) Испытания изоляции высокочастотными напряжениями . . . 30
Приложение Е (справочное) Стрессовые воздействия на изоляцию высокочастотными несинусоидальными напряжениями . . . 40
Приложение F (справочное) Диаграммы определения размеров . . . 45
Приложение ДА (справочное) Сведения о соответствии ссылочных международных стандартов межгосударственным стандартам . . . 47
Библиография . . . 48

## Введение

Настоящий стандарт рассматривает вопросы координации изоляции в условиях воздействия высокочастотных низковольтных напряжений.

Стандарт рассматривает вопросы воздействия высокочастотных напряжений на твердую изоляцию, а также определяет условия определения воздушных зазоров, расстояний утечки, размеров твердой изоляции при воздействии синусоидального и несинусоидального напряжения.

Стандарт применяется совместно с международным стандартом IEC 60664-1 «Координация изоляции для оборудования низковольтных систем. Часть 1. Принципы, требования и испытания», дополняя и конкретизируя вопросы координации изоляции в условиях воздействия высокочастотного напряжения.

Настоящий стандарт может быть использован при разработке национальных и межгосударственных стандартов на низковольтное оборудование, работающее при высокочастотном напряжении, для обеспечения соответствия его требованиям технических регламентов.

**МКС 29.035.01**

**Поправка к ГОСТ IEC 60664-4—2017 Координация изоляции для оборудования низковольтных систем. Часть 4. Анализ высокочастотного напряжения**

| В каком месте | Напечатано | Должно быть | | |
|---|---|---|---|---|
| Предисловие. Таблица согласования | — | Казахстан | KZ | Госстандарт Республики Казахстан |

(ИУС № 4 2020 г.)

МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ

# КООРДИНАЦИЯ ИЗОЛЯЦИИ ДЛЯ ОБОРУДОВАНИЯ НИЗКОВОЛЬТНЫХ СИСТЕМ

## Часть 4

## Анализ высокочастотного напряжения

Insulation coordination for equipment within low-voltage system. Part 4.
Consideration high-frequency voltage

**Дата введения — 2019—06—01**

## 1 Область применения

Настоящий стандарт рассматривает стрессовое воздействие высокочастотного напряжения на основную, дополнительную и усиленную изоляцию низковольтного оборудования. Значения размеров изоляции прямо применимы к основной изоляции; для усиленной изоляции соответствующие требования применяются в соответствии с IEC 60664-1. Положения стандарта применимы для определения размеров воздушных зазоров (изоляционных промежутков), расстояний утечки и твердой изоляции, подвергаемых воздействию периодических напряжений различных типов в диапазоне частот от 30 кГц до 10 МГц.

Настоящий стандарт должен применяться только совместно с IEC 60664-1 или IEC 60664-5. При их совместном применении ограничения по частоте, указанные в IEC 60664-1 и IEC 60664-5, расширяются до значений выше 30 кГц.

Настоящий стандарт также применяется совместно с IEC 60664-3 для частоты выше 30 кГц и защиты типа 1. Для защиты типа 2 этот вопрос находится в стадии рассмотрения.

Примечание 1 — Значения размеров для частоты выше 10 МГц находятся в стадии рассмотрения.

Примечание 2 — Настоящий стандарт не рассматривает высокочастотные помехи. Считается, что при нормальном применении оборудования интерференция высокочастотных напряжений с учетом воздействия на изоляцию незначительна. Следовательно, нет необходимости это учитывать.

Положения настоящего стандарта применяются к оборудованию, применяемому при высоте над уровнем моря не выше 2000 м при значении номинального напряжения не более 1000 В.

Положения стандарта применяются при назначении требований к воздушным зазорам, расстояниям утечки и твердой изоляции для оборудования при заданных критериях. Они включают методы электрических испытаний с учетом координации изоляции.

Минимальные воздушные зазоры, указанные в настоящем стандарте, не применимы в условиях ионизации газового пространства. Специальные требования по ограничениям для этого случая могут быть указаны соответствующими техническими комитетами.

Настоящий стандарт не регламентирует расстояния:

- через жидкую изоляцию;
- через иные газы, отличные от воздуха;
- через сжатый воздух.

Примечание 3 — Высокие напряжения могут присутствовать во внешних цепях оборудования.

Примечание 4 — Требования при высоте над уровнем моря выше 2000 м могут быть взяты из IEC 60664-1, таблица А.2, приложение А.

**Издание официальное**

Применение настоящего стандарта оговаривается ответственными техническими комитетами для различного оборудования в зависимости от рациональности достижения требований координации изоляции при указанных в стандарте изоляционных промежутках в воздухе, расстояний утечки и размеров твердой изоляции для оборудования.

## 2 Нормативные ссылки

Для применения настоящего стандарта необходимы следующие ссылочные стандарты. Для датированных применяют только указанное издание, для недатированных — последнее издание стандарта, включая все изменения к нему.

IEC 60112:2003, Method for the determination of the proof and the comparative tracking indices of solid insulating materials (Материалы электроизоляционные твердые. Методы определения нормативного и сравнительного индексов трекингостойкости)

IEC 60664-1:1992, Insulation coordination for equipment within low-voltage systems — Part 1: Principles, requirements and tests Amendment 1 (2000), Amendment 2 (2002) [Координация изоляции для оборудования в низковольтных системах. Часть 1. Принципы, требования и испытания. Изменение 1 (2000). Изменение 2 (2002)][1)]

IEC 60664-5, Insulation coordination for equipment within low-voltage systems — Part 5: A comprehensive method for determining clearances and creepage distances equal to or less than 2 mm (Координация изоляции для оборудования в низковольтных системах. Часть 5. Комплексный метод определения зазоров и путей утечки, равных или менее 2 мм)

IEC Guide 104:1997, The preparation of safety publications and the use of basic safety publications and group safety publications (Подготовка публикаций по безопасности и использование основополагающих и групповых публикаций по безопасности)[2)]

## 3 Термины и определения

В настоящем стандарте применены следующие термины с соответствующими определениями:

3.1 **приблизительно однородное поле** (approximately homogeneous field): Для частоты, превышающей 30 кГц, электрическое поле, имеющее приблизительную однородность, когда радиусы окружностей проводящих частей равны или больше 20 % размера воздушного зазора.

3.2 **неоднородное поле** (inhomogeneous field): Для частоты, превышающей 30 кГц, электрическое поле, имеющее неоднородность, когда радиусы окружностей проводящих частей равны или меньше 20 % размера воздушного зазора.

3.3 $U_{peak}$: Пиковое значение периодического пикового напряжения любого типа, приложенного через изоляцию.

3.4 $f_{crit}$: Критическая частота, при которой происходит снижение напряжения пробоя, происходящего в воздушном зазоре.

3.5 $f_{min}$: Частота, при которой происходит максимальное снижение напряжения пробоя, происходящего в воздушном зазоре.

3.6 **напряжение частичного разряда (ЧР)** (PD-voltage): Общий термин для двух типов частных разрядов — при начальном напряжении $U_i$ и при затухающем напряжении $U_e$.

3.7 **напряженность электрического поля *E*** (electrical field strength *E*): Изменение (градиент) напряжения на единицу длины, обычно выраженный в кВ/мм.

## 4 Воздушные зазоры (изоляционные промежутки)

### 4.1 Главные условия

Настоящий стандарт рассматривает изоляционные промежутки в воздухе. Значения размеров установлены для максимальной высоты 2000 м над уровнем моря. Для большей высоты применяется корректирующий коэффициент высоты, приведенный в IEC 60664-1, приложение А, таблица А.2.

---

[1)] Действует IEC 60664-1:2007, однако для однозначного соблюдения требований настоящего стандарта, выраженных в датированной ссылке, рекомендуется использовать только указанное в этой ссылке издание.

[2)] Действует IEC Guide 104:2010, однако для однозначного соблюдения требований настоящего стандарта, выраженных в датированной ссылке, рекомендуется использовать только указанное в этой ссылке издание.

### 4.2 Основная информация

В соответствии с основной информацией, приведенной в приложении А, раздел А.1, выдерживаемая способность воздушных зазоров может быть подвержена воздействию только частоты напряжения, если периодичность напряжения имеет место (см. IEC 60664-1, п. 3.1.1.2 или IEC 60664-5, п. 3.1.1.2). Для кратковременных перенапряжений достаточны размеры, приведенные в IEC 60664-1, п. 3.1.1.1 или IEC 60664-5, п. 3.1.1.1.

### 4.3 Однородные или приблизительно однородные поля

#### 4.3.1 Условия для приблизительно однородного поля

Для частоты, превышающей 30 кГц, приблизительно однородное поле рассматривается существующим, если радиусы окружностей проводящих частей равны или больше 20 % размера воздушного зазора.

#### 4.3.2 Экспериментальные значения характеристик пробоя

В соответствии с заключением, приведенным в А.2.1, критическая частота $f_{crit}$, снижающая напряжения пробоя, находится в следующей зависимости от значения воздушного зазора

$$f_{crit} = \frac{0,2}{d/\text{мм}}\text{МГц}, \quad (1)$$

где $d$ — воздушный зазор.

Экспериментальные значения, приведенные в А.2.1 для условий однородного поля, указывают на максимальное снижение напряжения пробоя при частоте, составляющей 20 % значения частоты 50/60 Гц. Частота, при которой происходит максимум снижения, называется $f_{min}$.

Примечание — Для целей настоящего стандарта частота $f_{min}$, показанная на рисунке А.1, принята как 3 МГц.

#### 4.3.3 Размеры для условий однородных и приблизительно однородных полей

Изоляционные характеристики воздушных зазоров при естественном давлении атмосферного воздуха в условиях однородных полей должны рассматриваться с учетом частоты следующим образом:

- выше частоты $f_{crit}$ напряжение пробоя снижается с ростом частоты. Максимальное снижение напряжение пробоя около 20 %;
- напряжение пробоя достигает минимума при частоте $f_{min}$. При более высоких частотах напряжение пробоя нарастает и может превысить значение при промышленной частоте.

Это свидетельствует о том, что эти характеристики также приемлемы и для условий приблизительно однородного поля.

Размеры для однородных полей основаны на значениях, приведенных для случая В в IEC 60664-1, таблица 7 или IEC 60664-5, таблица 3. Применение этих значений требует испытаний на устойчивость в соответствии с IEC 60664-1, п. 4.1.1 или IEC 60664-5, п. 4.1.1.

Размеры для приблизительно однородных полей основаны на значениях, приведенных для случая А в IEC 60664-1, таблица 7 или IEC 60664-5, таблица 3. Испытаний на устойчивость не требуется. Однако радиусы окружностей проводящих частей должны быть равны или больше 20 % размера воздушного зазора.

Имеется два метода определения размеров.

1. Если отсутствует понимание оценки, воздушные зазоры в пределах диапазона частот настоящего стандарта должны назначаться для 125 % значения необходимого выдерживаемого напряжения в соответствии с IEC 60664-1, таблица 7 или IEC 60664-5, таблица 3.

2. Если оценка возможна, применяется следующее:

a) для частот ниже $f_{crit}$ [см. формулу (1)] воздушные зазоры должны назначаться для 125 % значения необходимого выдерживаемого напряжения в соответствии с IEC 60664-1, таблица 7 или IEC 60664-5, таблица 3;

b) для частот выше $f_{min}$ воздушные зазоры должны назначаться для 125 % значения необходимого выдерживаемого напряжения в соответствии с IEC 60664-1, таблица 7 или IEC 60664-5, таблица 3;

c) для частот между $f_{crit}$ и $f_{min}$ воздушные зазоры определяют по формуле

$$100\ \% + \frac{f - f_{crit}}{f_{min} - f_{crit}} \cdot 25\ \% \quad (2)$$

требуемого выдерживаемого напряжения в соответствии с IEC 60664-1, таблица 7 или IEC 60664-5, таблица 3.

В целях определения критической частоты первоначально воздушный зазор принимается для 100 % значения необходимого выдерживаемого напряжения в соответствии с IEC 60664-1, таблица 7 или IEC 60664-5, таблица 3. Это может быть принято, если применимы условия a), b) или c). Так как этот расчет должен влиять на результат (воздушный зазор), требуется его повторение.

Примечание — Дальнейшая информация по вопросу определения размера приведена в приложении F.

### 4.4 Неоднородные поля

#### 4.4.1 Условия неоднородного поля

Для частоты, превышающей 30 кГц, неоднородное поле рассматривается существующим, если радиусы окружностей проводящих частей меньше 20 % размера воздушного зазора.

#### 4.4.2 Экспериментальные значения частных разрядов и характеристик пробоя

Для условий неоднородного поля частота $f_{crit}$ может быть вычислена по формуле (1). При частотах выше $f_{crit}$ влияние частоты на напряжение пробоя намного больше зависит от условий неоднородного поля. Снижение напряжения пробоя с учетом частоты силового источника может быть более чем на 50 %.

Для условий неоднородного поля частичный разряд (корона) может быть ожидаем при напряжении ниже напряжения пробоя. В связи с высоким риском повреждения, вызванные этими пробоями с высокой частотой повторения, определение размеров должно быть точным, чтобы избежать возникновения частичного пробоя (ЧП).

Экспериментальные данные приведены в A.2.2.

#### 4.4.3 Определение размеров воздушных зазоров в условиях неоднородного поля

При частотах ниже $f_{crit}$ [см. формулу (1)] воздушные зазоры могут быть назначены для 100 % значения установленного выдерживаемого напряжения в соответствии с IEC 60664-1, таблица 7 или IEC 60664-5, таблица 3.

Частота напряжения должна быть принята во внимание для определения размеров для частоты раной или более чем $f_{crit}$. Если ЧП начинается при кратковременных перенапряжениях и не может быть затухающим при любых установившихся напряжениях (см. IEC 60664-1, п. 4.1.2.4), для определения размера должно применяться напряжение затухания ЧП. Соответствующие данные (см. примечание) (измерений) совместно с ограничивающей кривой (определения размеров) представлены на рисунке 1.

Примечание 1 — Для определения размеров применимы данные A.2.2, полученные для воздушных зазоров выше 0,75 мм при частоте 1 МГц, начиная от напряжения пробоя, и выше, начиная от напряжение затухания ЧП.

Значения размеров для неоднородного поля систематизированы в таблице 1. Эти значения применимы, если встречаются малые радиусы скруглений проводящих частей. На практике эти условия выполнимы, если радиусы скруглений проводящих частей менее 20 % величины воздушных зазоров.

Примечание 2 — Дальнейшая информация по назначению размеров представлена в приложении F.

Таблица 1 — Минимальные значения воздушных зазоров при атмосферном давлении для условий неоднородного поля

| Напряжение, $U_{peak}$, кВ | Воздушные зазоры, мм |
|---|---|
| 0,6[a), b)] и выше | 0,065 |
| 0,8[a)] | 0,18 |
| 1,0[a)] | 0,5 |
| 1,2[a)] | 1,4 |
| 1,4[a)] | 2,35 |
| 1,6[a)] | 4,0 |
| 1,8[a)] | 6,7 |
| 2,0[a)] | 11,0 |

[a)] Для промежуточных значений относительно указанных в таблице применяется расчет.
[b)] Для напряжений $U_{peak}$ ниже 0,6 кВ нет достоверных данных.

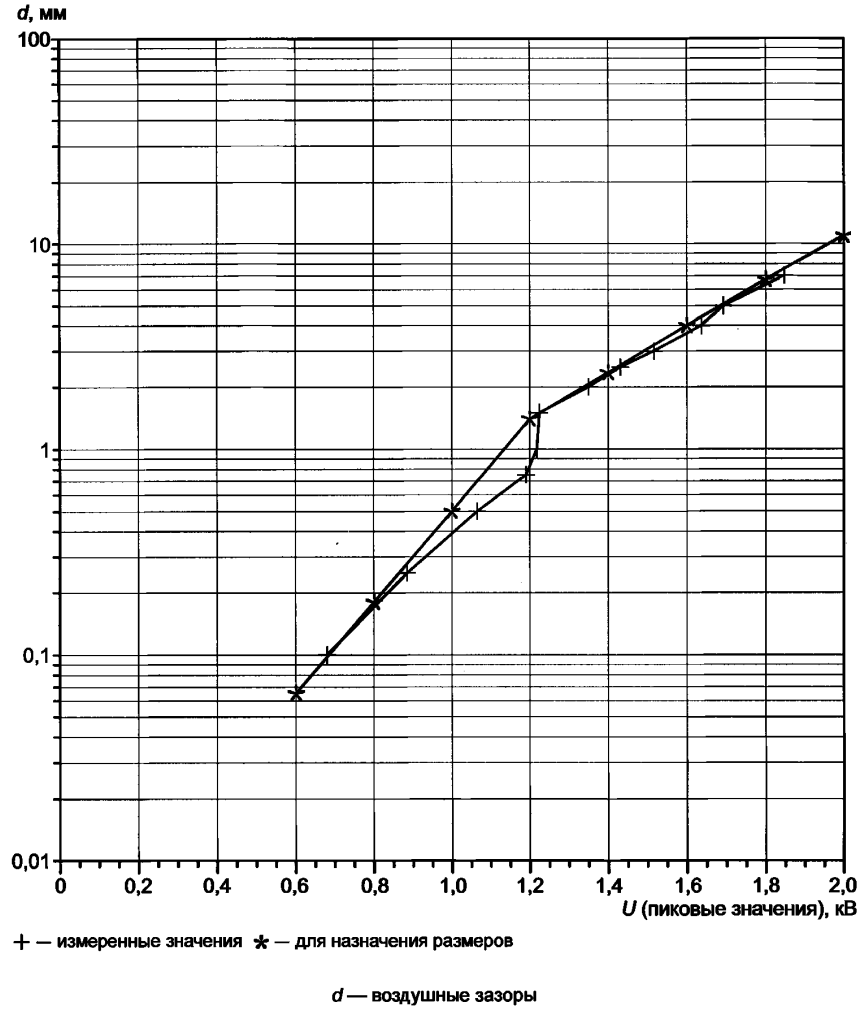



Рисунок 1 — Размеры воздушных промежутков в неоднородном поле в воздушной среде при атмосферном давлении (радиусы точек электродов в плане — 5 мкм) для исключения случаев ЧП или пробоев (воздушные зазоры менее 1 мм)

## 5 Расстояния утечки

### 5.1 Экспериментальные данные

Влияние частоты на напряжение пробоя для значений расстояний утечек оценивается в зависимости от значений, приведенных в приложении В.

Экспериментальные условия для исследований имеющихся условий и материалов включают в эксперименты, описанные в В.2.

Экспериментальные значения представлены в В.3. Частота напряжения оказывает существенное влияние на напряжение ЧП и напряжение пробоя.

### 5.2 Определение размеров расстояний утечки

На рисунке 2 представлены измеренные значения совместно с ограничивающей кривой (определения размеров) для трех различных частот в диапазоне до 100 кГц, до 1 МГц и до 3 МГц. Значения размеров расстояний утечки систематизированы в таблице 2. Промежуточные значения для соответствующих диапазонов частот имеют линейную зависимость. Данные значения приемлемы для степени загрязнения 1.

Примечание 1 — Для определений размеров расстояний утечки значения, приведенные в С.3 для напряжений ЧП, приемлемы, если ЧП при высоком напряжении имеет разрушающий эффект основного материала и происходит в течение длительного времени.

Эксперименты, описанные в [5][1)], показывают, что размеры расстояний утечки для степеней загрязнения 2 и 3 могут быть получены из известных расстояний для степени загрязнения 1 применением поправочных коэффициентов. Для степени загрязнения 2 применяется поправочный коэффициент 1,2, а для степени загрязнения 3 — коэффициент 1,4.

Значения, приведенные в таблице 2, не учитывают влияние эффекта трекинга. Для этих целей должны быть рассмотрены материалы IEC 60664-1 и IEC 60664-5. Вследствие этого значения таблицы 2 меньше соответствующих значений, приведенных в IEC 60664-1, таблица 4 или IEC 60664-5, таблица 4.

Эти значения размеров применимы для всех материалов, свойства которых могут быть ухудшены тепловым воздействием. Для материалов, которые не подвержены такому ухудшению (например, керамика), достаточно определение размеров расстояний утечки в соответствии с разделом 4.

Таблица 2 — Значения минимальных расстояний утечки для различных частот

| Напряжение $U_{peak}$, кВ | Расстояния утечки[a)], мм | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Для 30 кГц < $f$ ≤ 100 кГц | Для $f$ ≤ 0,2 МГц[b)] | Для $f$ ≤ 0,4 МГц[b)] | Для $f$ ≤ 0,7 МГц[b)] | Для $f$ ≤ 1,0 МГц[b)] | Для $f$ ≤ 2,0 МГц[b)] | Для $f$ ≤ 3,0 МГц[b)] |
| 0,1 | 0,0167 | — | — | — | — | — | 0,3 |
| 0,2 | 0,042 | — | — | — | — | 0,15 | 2,8 |
| 0,3 | 0,083 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,80 | 20,0 |
| 0,4 | 0,125 | 0,13 | 0,15 | 0,19 | 0,35 | 4,5 | — |
| 0,5 | 0,183 | 0,19 | 0,25 | 0,40 | 1,5 | 20,0 | — |
| 0,6 | 0,267 | 0,27 | 0,40 | 0,85 | 5,0 | — | — |
| 0,7 | 0,358 | 0,38 | 0,68 | 1,9 | 20,0 | — | — |
| 0,8 | 0,450 | 0,55 | 1,1 | 3,8 | — | — | — |
| 0,9 | 0,525 | 0,82 | 1,9 | 8,7 | — | — | — |
| 1,0 | 0,600 | 1,15 | 3,0 | 18,0 | — | — | — |
| 0,1 | 0,683 | 1,7 | 5,0 | — | — | — | — |
| 0,2 | 0,850 | 2,4 | 8,2 | — | — | — | — |
| 0,3 | 1,20 | 3,5 | — | — | — | — | — |
| 0,4 | 1,65 | 5,0 | — | — | — | — | — |
| 0,5 | 2,30 | 7,3 | — | — | — | — | — |
| 0,6 | 3,15 | — | — | — | — | — | — |
| 0,7 | 4,40 | — | — | — | — | — | — |
| 0,8 | 6,10 | — | — | — | — | — | — |

[a)] Значения расстояний утечки, приведенные в таблице, применяются при степени загрязнения 1. Для степени загрязнения 2 необходимо применение поправочного коэффициента 1,2, а для степени загрязнения 3 — поправочного коэффициента 1,4.

[b)] Для промежуточных значений частот допустим пропорциональный пересчет.

[1)] Здесь и далее в квадратных скобках ссылки на источники, приведенные в библиографии.

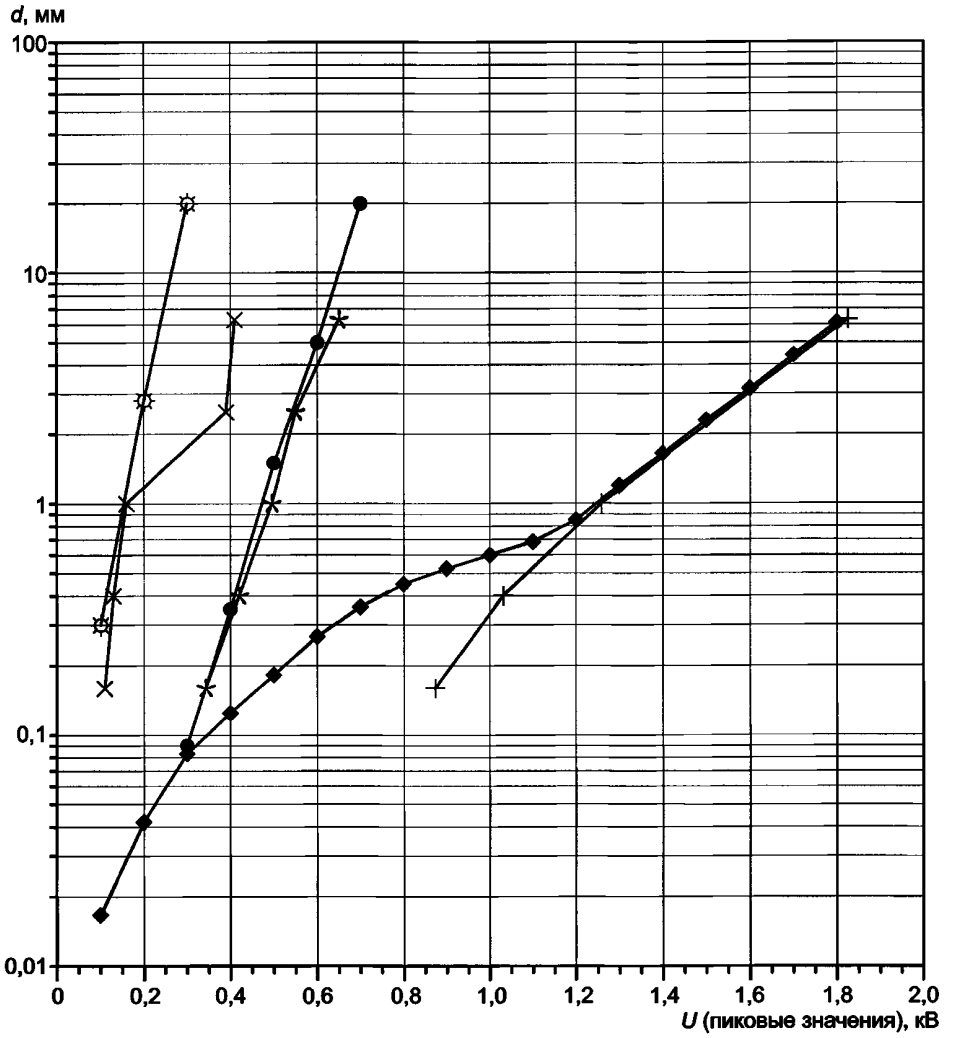



Рисунок 2 — Размеры расстояний утечки, исключающие случаи ЧП (расстояния утечки не менее 1 мм) или пробоев (расстояния утечки менее 1 мм)

## 6 Твердая изоляция

### 6.1 Основной анализ

В сравнении с изоляционными промежутками в воздушной среде твердая изоляция может обеспечить диэлектрическую прочность, по крайней мере при одинаково высокой напряженности. Однако на практике высокая напряженность поля для твердой изоляции применяется редко.

Примечание — Технически надежность стойкости к деградации и окончательному пробою твердой изоляции обеспечивается применением более низких значений напряженности поля, что далее детально изложено в разделе С.1 приложения С.

### 6.2 Влияющие факторы

Для частоты 1 МГц напряженность поля кратковременного пробоя должна быть на 10 % ниже значения для силовой частоты. Напряженность поля пробоя не должна достигать нижнего предела, имеющегося при частоте выше значения 100 МГц.

Примечание — Характеристика пробоя при высокой частоте представлена в разделе С.2 приложения С.

Диэлектрическая прочность твердой изоляции в основном, и особенно при высокочастотном напряжении, должна далее снижаться под влиянием влажности и температуры. Эти влияния учитываются в зависимости от условий перед испытаниями в соответствии с 7.3.

В соответствии с этими характеристиками твердой изоляции, которая применяется в высокочастотных установках, не должно быть длительного воздействия условий влажности выше 92 % относительной влажности. Некоторые материалы, такие как стекло и некоторые виды керамики, не подвержены воздействию влажности и, следовательно, не требуют ограничения предела влажности значением 92 %.

Диэлектрическая прочность твердой изоляции функционально зависит от толщины материала. Очень тонкие пленки могут иметь диэлектрическую прочность, которая может быть на порядок выше, чем у испытательного образца толщиной 0,75 мм. Так различные размеры соответствующей толщины твердой изоляции выбираются, исходя из имеющейся зависимости прочности изоляции от толщины изоляции.

Влияние температуры на напряжение пробоя может быть прослежено в разделе С.2 приложения С. Таким образом, температура является важным влияющим фактором, который должен учитываться для определения размеров и при испытаниях.

Частные пробои при высокочастотных напряжениях должны иметь импульсные частотные повторения, зависящие от частоты напряжения. Следовательно, нет приемлемого планируемого жизненного цикла твердой изоляции при наличии частных пробоев.

### 6.3 Определение размеров твердой изоляции

Взамен высокочастотных испытаний в соответствии с разделом 7 может быть применен следующий метод определения размеров. Он применим для максимальной частоты напряжения 10 МГц, если напряженность поля приблизительно однородна, нет выбросов специфичных напряжений, соответствующих формуле (3) или рисунку 3 соответственно, и нет пустот или воздушных полостей, имеющихся между твердой изоляцией. Если эти условия полностью не удовлетворяются, требуется проведение высокочастотных испытаний в соответствии с разделом 7.

Определение размеров применяют, если электрическое поле приблизительно однородно (см. примечание). Для толстых слоев твердой изоляции с $d_1 \geq 0{,}75$ мм пиковое значение напряженности поля E должно быть не более 2 кВ/мм. Для тонких слоев твердой изоляции с $d_1 \leq 30$ мкм пиковое значение напряженности поля E должно быть не более 10 кВ/мм. Для вычислений промежуточных значений толщин $d_1 > d > d_2$ должна применяться формула (3) (см. также рисунок 3).

$$E = \left(\frac{0{,}25}{d} + 1{,}667\right)\frac{\text{кВ}}{\text{мм}}. \qquad (3)$$

Примечание — В данном контексте электрическое поле является приблизительно однородным, если различие значений напряженности поля не превышает ± 20 %.

Применение напряженности поля для определения размеров твердой изоляции требует установления приблизительно однородного поля без наличия пустот или воздушных полостей внутри. Требуется проведение испытания на диэлектрическую стойкость или испытания на частичный пробой при высокочастотном напряжении, если напряженность поля не может быть вычислена (так как поле неоднородно), или пиковые значения выше полученных из формулы (3) или из графика рисунка 3 соответственно, или не исключено наличие пустот или воздушных полостей, или для высокой частоты, такой как 10 МГц. Первым применяется кратковременное воздействие, вторым — длительное воздействие в соответствии с IEC 60664-1, п. 3.3.3.2.2.

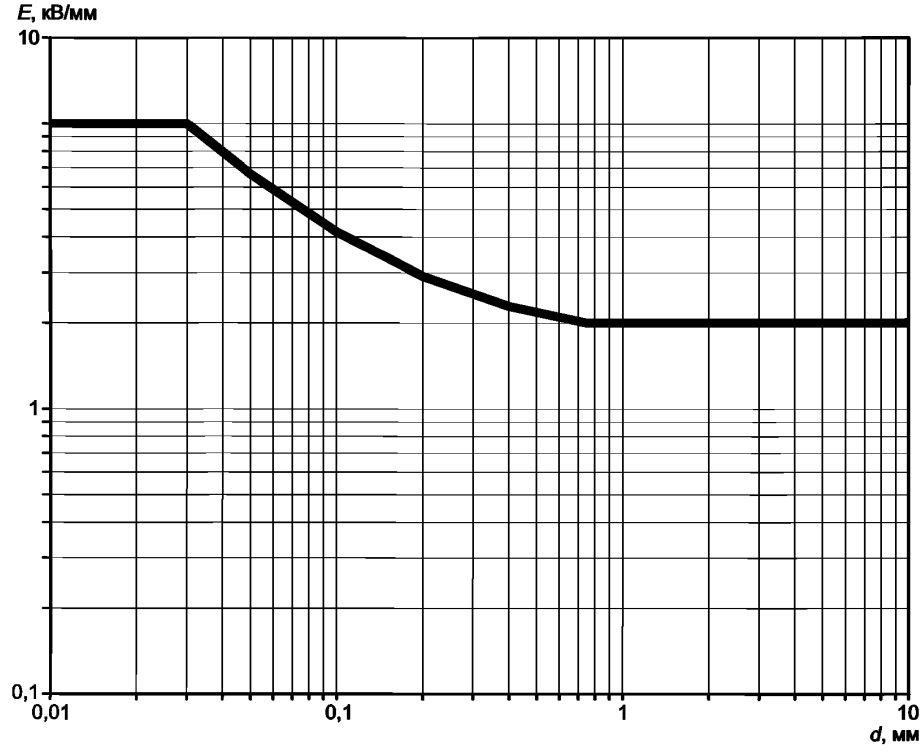



Рисунок 3 — Допустимые напряженности поля для определения размеров твердой изоляции в соответствии с формулой (3)

## 7 Высокочастотные испытания

### 7.1 Основные требования

Следующие испытания проводятся при частоте прикладываемого напряжения:

- проверка кратковременной устойчивости для воздушных зазоров и через твердую изоляцию приложением испытательного высокочастотного напряжения;
- проверка того, что отсутствуют частные пробои в условиях стабильного высокочастотного напряжения установки.

При ожидаемо большой емкостной нагрузке при высокой частоте высокочастотное испытание первоначально применяется к компонентам и сборкам. Если требуется соответствующее высоковольтное испытание комплектного оборудования, данное испытание должно проводиться в соответствии с IEC 60664-1, п. 4.1.2 при напряжении промышленной частоты.

### 7.2 Испытательное напряжение источника

Испытательное напряжение источника указано в разделе D.1 приложения D.

### 7.3 Единство условий

Если нет иных указаний технических комитетов, испытание должно быть проведено на новом испытательном образце. Условия температурной и влажностной подготовки образца состоят из:

- создания условий, наиболее приближенных к нормальным условиям применения;
- выявления возможных погрешностей, которые не представлены в новых условиях.

Метод создания единых условий, представленный в IEC 60664-1, п. 4.1.2.1, также приемлем и для высокочастотного испытания.

### 7.4 Испытание высокочастотного пробоя

#### 7.4.1 Метод испытания

На высокочастотную диэлектрическую прочность оказывают влияние температура оборудования (аппарата) и условия окружающей среды. Следовательно, испытание должно проводиться в условиях, наиболее приближенных к нормальным условиям применения, включая превышения температуры, возникающие при нормальном применении оборудования. Длительность испытания — 1 мин.

#### 7.4.2 Результат испытания

Не должно быть пробоев во время проведения испытания. После испытания не должно быть видимых повреждений (тления, следов прожига и т. п.).

### 7.5 Испытания высокочастотного частичного пробоя

#### 7.5.1 Основной анализ

Основные методы испытаний высокочастотного частичного пробоя изложены в IEC 60270. Для испытаний ЧП пробоя низковольтного оборудования применимы IEC 60664-1, п. 4.1.2.4 и IEC 60664-1, приложение С, но для испытаний при высокочастотном напряжении изменяются требования к испытательному оборудованию и методам испытаний, что оговорено в настоящем стандарте.

В порядке минимизации риска разрушения испытательного образца испытания на ЧП должны выполняться по жестким процедурам с точными измерениями и с испытательным напряжением уровня начального напряжения частичного пробоя. Для критериев оценки пробоя должны быть заданы нижние уровни ЧП, нормально ниже 10 пс. Если заданное напряжение интенсивного ЧП может быть указано с предельными допусками и подвержено влиянию соответствующими параметрами, такими как температура и влажность, которые не оговорены в процессе испытаний, напряжение интенсивного ЧП может включать коэффициент безопасности $F_1$, равный 1,2 — кратным значениям наибольших периодических пиковых напряжений (см. IEC 60664-1, п. 4.1.2.4). Для усиленной изоляции необходима оценка более жестких рисков, и для напряжения интенсивного ЧП требуется соответствующий коэффициент безопасности $F_1$ = 1,25 (см. IEC 60664-1, п. 4.1.2.4).

ЧП-испытание первоначально применяется к компонентам, но возможно и испытание оборудования. В этом случае локализация источника ЧП затруднена и измерение амплитуды напряжения ЧП должно быть функционально заложено внутри аппаратов. Во время типовых испытаний испытание ЧП должно подтверждать свойства изоляционной системы конструкции, правильность выбора изоляционных материалов и правильность процедур изготовления. Такие испытания также необходимы в процессе разработки изделий. Полнота процесса производства должна подтверждаться отбором образцов и контрольными испытаниями, что является важной основой гарантии качества.

При высокочастотных испытаниях напряжением требуется полное экранирование испытательной системы для исключения влияния находящихся в окружении других электронных устройств. Такая мера экранирования главным образом важна с точки зрения уровня влияния во время измерений ЧП.

#### 7.5.2 Метод испытания

В условиях высокого риска повреждения испытываемого образца при высокочастотном испытании подъем уровня напряжения должен быть высоким, по возможности без случаев выхода испытательного напряжения за его пределы. В основном уровень помехи во время испытания высокочастотного частичного пробоя должен быть существенно выше, чем при испытании частотой силового источника.

#### 7.5.3 Испытательное оборудование

Измерение частичного пробоя при высокочастотном напряжении является более сложным, так как испытательное напряжение и регистрация частичного пробоя имеют наложение частотного спектра, которое требует присущих методов разделения (фильтрации). Если частота испытательного напряжения может намного превысить границы спектра, требуется применение частотного полосового фильтра. Центр частоты этого фильтра должен находиться на частоте испытательного напряжения. Это еще более сложно для отделения гармоник несинусоидального испытательного напряжения из сигнала частичного пробоя; следовательно, такие испытания не рекомендованы для целей настоящего стандарта. Для измерения интенсивности частичного пробоя применяются цифровые запоминающие осциллографы совместно с ограничивающими фильтрами для подавления высокочастотного испытательного напряжения.

Примеры частных пробоев испытательных цепей высокочастотным испытательным напряжением приведены в приложении D. Регистрация частных пробоев производится цифровыми интеграторами цифровых запоминающих осциллографов с высокими характеристиками.

#### 7.5.4 Испытательная цепь

Измерение ЧП производится регистрацией тока ЧП. Для этой цели измерительный импеданс $R_m$ последовательно соединяют с испытываемым образцом. Напряжение, приложенное к этому импедансу,

прикладывают через полосовой фильтр к одному каналу цифрового запоминающего осциллографа с высокочастотной полосой пропускания (более 100 МГц) так, чтобы вместе с испытательной цепью это составляло общий элемент, обеспечивающий общую полосу пропускания 60 МГц. Полосовой фильтр ограничивает выбросы напряжения в случае емкостного характера тока испытываемого образца. При этом может быть получено время ЧП длительностью 5 пс.

Высокочастотное испытательное напряжение измеряют высокочастотным вольтметром, и вторым входом цифрового запоминающего осциллографа контролируют форму волны. Дальнейшее описание испытательной цепи приведено в D.2.2 приложения D.

**7.5.5 Требуемая полоса пропускания испытательной цепи**

В следующей формуле испытательная цепь имеет первый порядок низкочастотной переходной характеристики (характеристика $PT_1$), проявляющийся в снижении частоты полосы пропускания до нуля и выше частоты пропускания (3 дБ) $f_c$, которая равна пропускной способности канала.

Рассмотрение с учетом эффекта наличия точек резонанса или низкой частоты пропускания испытательной цепи описано в D.2 приложения D.

7.5.5.1 Минимальная полоса пропускания для значения разрешения импульса ЧП

Для высокочастотного испытательного напряжения может ожидаться высокая частота повторения импульсов ЧП. Следовательно, значение разрешения импульса ЧП может быть важно для исключения наложения импульсов. По этой причине может быть применено только измерительное оборудование, называемое «широкополосным». Это противоречит рекомендациям, данным в IEC 60664-1 по поводу испытаний напряжением с частотой силового источника (промышленной частотой).

Для исключения наложения импульсов минимальная полоса пропускания для измерений тока ЧП должна быть не менее частоты ЧП импульсов. Это является минимальным требованием для того, чтобы не было получено наложений формы волны импульсов ЧП.

Обычно достаточна частота пропускания $f_c$ испытательного тока значением выше 5-кратной частоты ЧП импульсов, детально об этом см. D.2.2.2.1 приложения D.

7.5.5.2 Минимальная полоса пропускания для анализа импульса ЧП

В порядке анализа источника сигнала ЧП и проведения анализа формы и размера пустот, произошедших от ЧП, требуется наиболее широкая полоса пропускания. Дальнейшие детали приведены в D.2.2.2.2 приложения D.

**7.5.6 Определение размеров испытательной цепи**

Точное определение размеров должно исключить наложение импульсов ЧП и позволить провести анализ формы волны импульса ЧП. Такое определение размеров требует некоторого анализа испытательной цепи, что представлено в D.2.2 приложения D.

7.5.6.1 Влияние испытательной цепи на переходные характеристики

Для адекватного воспроизведения импульсов ЧП требуется приблизительно апериодическая зависимость испытательной цепи и с высокой вероятностью повышение частоты пропускания $f_c$. Дальнейшие детали приведены в D.2.2.3.3.1 приложения D.

Для получения апериодической зависимости испытательной цепи суммарная индуктивность $L$ складывается из индуктивности проводников $L_W$ и конденсатора связи $L_{Ck}$

$$L = L_W + L_{Ck}, \tag{4}$$

которая должна быть ограничена

$$L \le \frac{R_m^2 C}{4}, \tag{5}$$

где $R_m$ — измеренный импеданс для тока ЧП. Эффективная емкость $C$ составляет

$$C = \frac{C_3 C_k}{C_3 + C_k} \tag{6}$$

с емкостью испытательного образца $C_3$.

В этом случае верхняя пропускаемая частота $f_c$ должна быть приблизительно выраженной, как для образца $RC$ цепи

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_m C}. \tag{7}$$

Нижнее значение пропускаемой частоты равно 0.

7.5.6.2 Влияние конденсатора связи на переходные характеристики

Влияние величины $C_k$ конденсатора связи (переходного конденсатора) на переходные характеристики испытательной цепи, оцененное в D.2.2.3.4 [5] приложения D, очевидно демонстрирует, что это влияние очень велико и что малая емкость конденсатора, сравнимая с емкостью испытательного образца $C_3$, неприемлема.

Переходные конденсаторы малой емкости снижают уровень измеряемого сигнала, что должно учитываться в процессе калибровки. Однако чувствительность цепи испытания ЧП также должна быть снижена. Другой проблемой является выделение измеряемого сигнала при применении переходного конденсатора малой емкости. Из D.2.2.3.4 приложения D очевидно, что минимальная емкость $C_k = C_3$. Возможно, что емкость должна быть $C_k \geq 10C_3$.

Необходимое значение емкости переходного конденсатора больше этого значения, и это значение требуется для апериодической зависимости испытательной цепи [см. 7.5.6.1, формула (5)].

### 7.6 Примеры результатов испытаний

Для низковольтного оборудования должно быть испытано множество компонентов с применением высокочастотного напряжения. Большинство данных — собственные. Некоторые основные результаты представлены в приложении D.3.

## 8 Несинусоидальные напряжения

### 8.1 Основной анализ

Настоящий стандарт рассматривает и учитывает влияние синусоидального высокочастотного напряжения на определение размеров и испытания изоляции. Практически во многих случаях реально воздействующее стрессовое напряжение далеко от синусоидальной формы. Периодические пульсации с резко меняющейся формой волны могут встречаться во многих электроустановках.

В этом случае требуется анализ гармонических составляющих импульса и определения соответствующей ему синусоидальной частоты.

Следующие рассуждения не принимают во внимание эффект, производимый формой волны напряжения, приложенного к изоляции.

### 8.2 Периодическое импульсное напряжение

Пример такого напряжения приведен на рисунке 4.

### 8.3 Анализ гармонических составляющих

В разделе E.2 приложения E приведен анализ гармонических составляющих периодических импульсных напряжений с различной формой волны. Во всех случаях доминирует спектр основной волны. Соотношение основной и наиболее важной 3-й гармоники не изменяется при перегрузке. Это также верно для сильных колебаний, которые накладываются друг на друга.

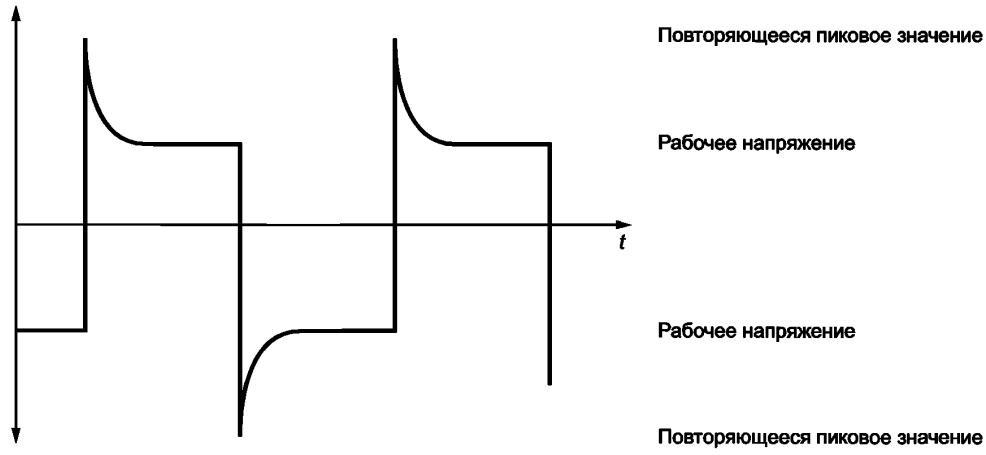



Рисунок 4 — Периодическое импульсное напряжения (см. IEC 60664-1)

Вследствие этого кажется возможным определение размеров и испытание воздушных зазоров, расстояний утечки и твердой изоляции для основной частоты импульсного напряжения. Таким образом, пиковое значение несинусоидального напряжения рассматривается в связи с оценкой установленной амплитуды основной волны к этому пиковому значению.

### 8.4 Процедура определения размеров и испытания

Для определения размеров воздушных зазоров важными являются пиковое значение несинусоидального напряжения и частота повторения пиков напряжения. Воздушные зазоры должны быть спроектированы, как для синусоидального напряжения с одинаковыми пиковым значением и частотой. Если положительные и отрицательные пиковые значения различны, принимается бóльшее из значений.

Для расстояний утечки применяют общий подход, так как частные пробои и пробои обладают одинаковыми факторами для определения размеров.

Для определения размеров твердой изоляции, как уже установлено в 6.3, требуются в основном высоковольтные испытания при высокочастотном напряжении. Из анализа гармонических составляющих, приведенного в 8.3, амплитуда основной частоты значительно больше 3-й гармоники для плоской формы волны с большими периодическими всплесками. Таким образом, амплитуда синусоидального испытательного напряжения должна соотноситься с пиковым значением оригинальной формы волны или с амплитудой первой гармоники, что больше.

Это повышение испытательного напряжения, как отнесенное к амплитуде основной волны, учитывает влияние высших гармоник, которое не оговаривается в процессе испытания.

В случае наличия максимальной частоты напряжения 10 МГц, если напряженность электрического поля примерно равномерна и нет пустот или воздушных полостей, имеющихся между твердой изоляцией, взамен испытаний может быть применена процедура определения размеров, описанная в 6.3.

## Приложение А
## (справочное)

# Изоляционные характеристики воздушных зазоров при высокочастотном напряжении

### А.1 Основная информация о пробоях воздушных зазоров

Пробои воздушных зазоров обычно происходят менее чем за 1 мкс. С учетом такой временной шкалы напряжение промышленной частоты имеет исключительно постоянную амплитуду. Для примера, при частоте 50 Гц за 1 мкс амплитуда остается на уровне 99 % своего пикового значения. Вследствие этого в течение развития предпосылок пробоя пробой инициирует пиковое значение напряжения. Для воздушных зазоров в рамках целей настоящего стандарта это результат идентификации переменного напряжения (пиковое значение) и постоянного напряжения пробоя.

У более высоких частот снижение напряжения от его пикового значения и даже изменение полярности должно быть учтено в связи с развитием пробоя. Этот эффект позволяет повышать напряжение пробоя.

Далее эффект ионизации (который исключительно позитивен), происходящий в течение начала пробоя, не должен рассматриваться. Эта ионизация происходит на гребне полуволны, и это исключительно достаточное время для переноса на электроды в течение дальнейшей части полуволны. В то же время при больших зазорах или при высокой частоте полярность может поменяться до ионизации, исходящей из воздушного зазора. Это может проявляться в искажении электрического поля и может снижать напряжение пробоя. Средняя скорость $v$ ионизации составляет приблизительно [1]

$$v = 6 \cdot 10^2 \frac{m}{s} \qquad (A.1)$$

для давления воздуха 1 бар. В течение интервала времени между гребнем волны и нулевым значением (пересечение линии волной) ионизация проходит следующее расстояние $s$ [2]

$$s = \frac{v}{2\pi f}, \qquad (A.2)$$

что составляет 1,91 м для частоты 50 Гц. Следовательно, при промышленной частоте данный аспект может быть важен только для очень больших воздушных зазоров. Однако если частота приближается к диапазону, превышающему килогерцы, для малых воздушных зазоров этот эффект становится важным.

Наложение обоих эффектов представлено результатом в типичной кривой, которая показывает минимум напряжения пробоя для определенной частоты $f_{min}$ в районе значения 3 МГц.

### А.2 Экспериментальные значения

#### А.2.1 Распределение однородного и приблизительно однородного поля

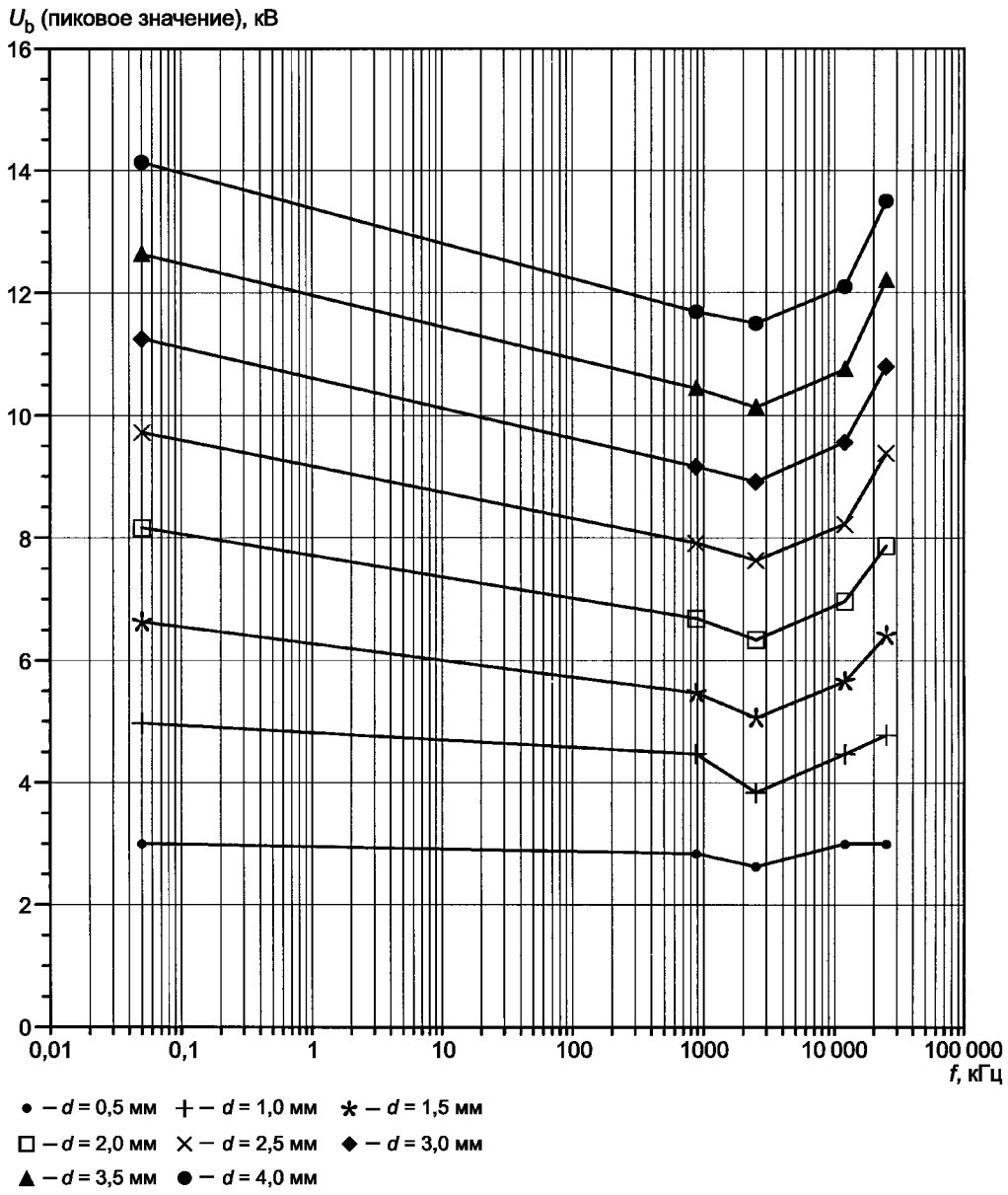
Для воздушных зазоров в распределенном однородном поле значение напряжения пробоя $U_b$ представлено на графиках рисунка А.1 [3]. Для частот в диапазоне 25 МГц напряжение пробоя приблизительно одинаково со значение для 50 Гц. График также демонстрирует, что значение воздушного зазора является важным параметром с учетом его свойств.

С учетом применения представленных частот уровень начинающегося снижения напряжения пробоя с ростом частоты представляет большой интерес. Этот уровень частоты порядка 3 МГц более детально показан на графиках рисунка А.2 [4]. Эти данные важны для целей настоящего стандарта.

Как вывод, для условий однородного поля максимальное снижение напряжения пробоя $U_b$ — на 20 % ниже значения этого напряжения при частоте 50/60 Гц. Критическая частота $f_{crit}$, от которой происходит снижение напряжения пробоя [2] для значения давления воздуха 1 бар, зависит от значения воздушного зазора в следующем порядке

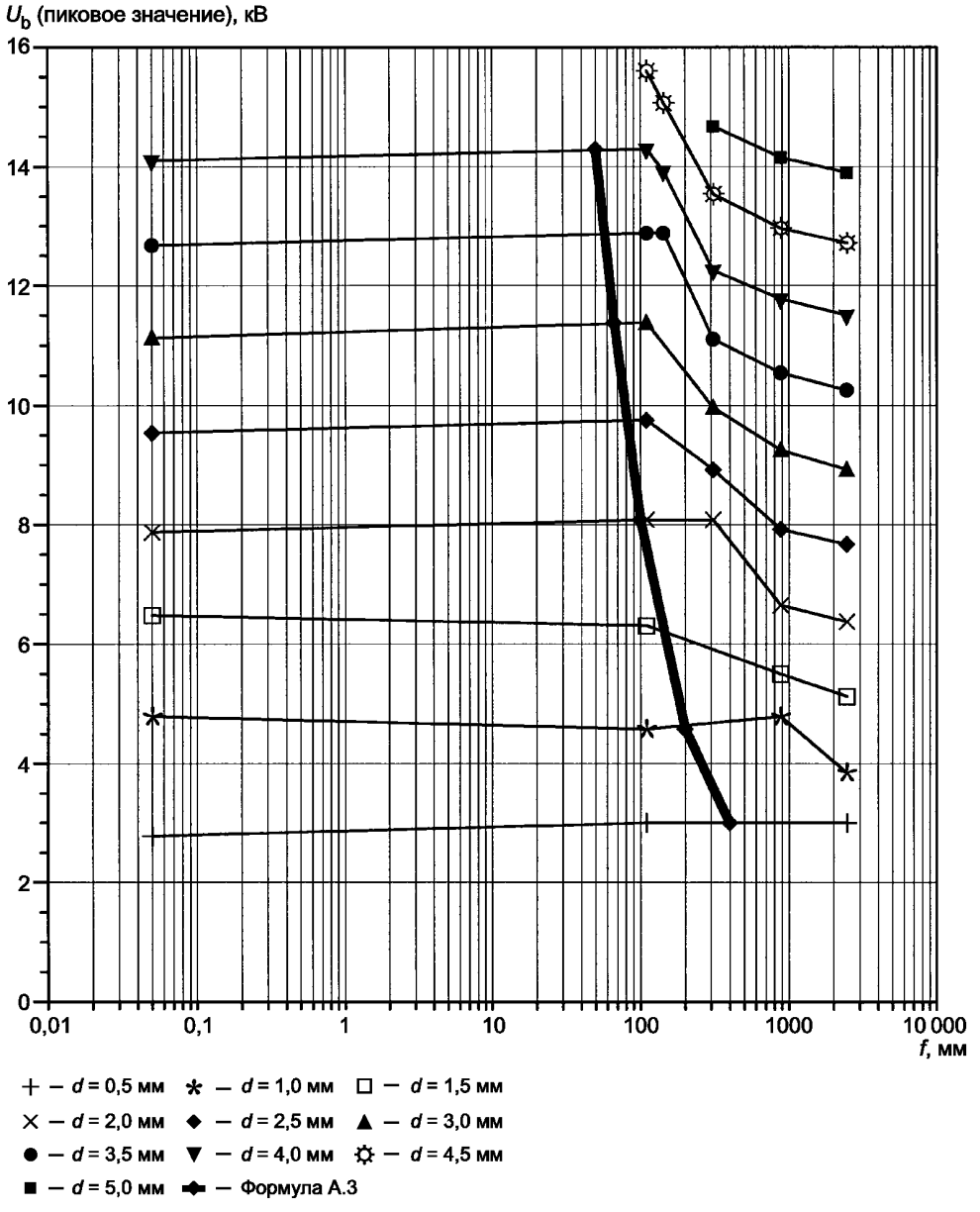
$$f_{crit} = \frac{v}{\pi d} \Rightarrow f_{crit} = \frac{0,2}{d/\text{мм}}. \qquad (A.3)$$

Как можно видеть из дополнительной кривой согласно формуле (А.3) в рисунке А.2, это есть некоторое отклонение между имеющимися экспериментальными данными и критической частотой, полученной из формулы (А.3). Если экспериментальные данные неполные и их точность неизвестна, для целей определения размеров должна применяться формула (А.3).




$U_b$ — напряжение пробоя; $d$ — воздушный зазор

Рисунок А.1 — Пробой в однородном поле при высокой частоте в воздушной среде при атмосферном давлении, диапазон частот 50 Гц — 24 МГц [3]




$U_b$ — напряжение пробоя; $d$ — воздушный зазор

Рисунок А.2 — Пробой в однородном поле при высокой частоте в воздушной среде при атмосферном давлении, диапазон частот 50 Гц — 2,5 МГц [4]

**А.2.2 Распределение неоднородного поля**

Для условий неоднородного поля при стрессовом высоковольтном напряжении, если повышается напряжение частичного пробоя (короны), невооруженным взглядом можно видеть световой эффект пробоя, близкого к игольчатому типу. После дальнейшего повышения напряжения в этой области этот канал начинает переносить по направлению к противоположному электроду возникающий пробой. Таким образом, очень вероятна деградация игольчатого типа. Это продемонстрировано на рисунке 3.

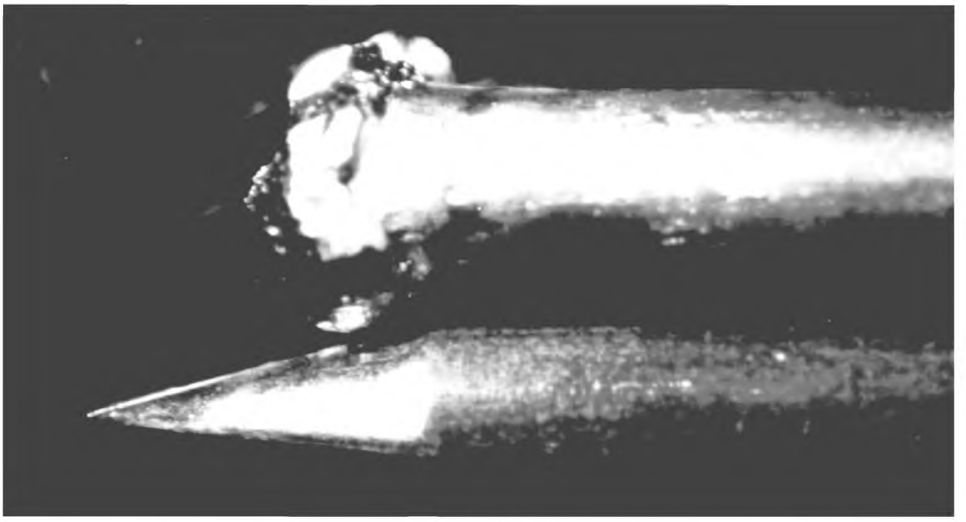


Рисунок А.3 — Пробой игольчатого типа до (вверху) и после (внизу) пробоя

Для условий неоднородного поля критическая частота $f_{crit}$ может по-прежнему быть приближенной к значению формулы (А.3). Выше частоты $f_{crit}$ влияние частоты на напряжение пробоя более важно по отношению к условиям однородного поля. Снижение напряжения пробоя по сравнению с частотой 50 Гц может быть более 50 % [1].

В последнее время были выполнены более детальные измерения ЧП начальным напряжением и напряжением пробоя неоднородных полостей (точечными электродами) в воздухе при атмосферном давлении [5] и [6]. Так как точки игл древовидно проводящих электродов (Ogura) имеют радиусы 5, 30 и 100 мкм и трубки с однонаправленным течением, в соответствии с ISO 7864 [7] могут быть применены игольчатые электроды с радиусом приблизительно 5 мкм. Применяются преимущественно более поздние электроды, называемые ВВ-иглами.

В основном игольчатые электроды могут применяться для моделирования неоднородного поля, если эффективная длина иглы приблизительно составляет трехкратный воздушный зазор [8]. Следовательно ВВ-иглы с эффективной длиной иглы, приблизительно равной 20 мм, могут применяться для максимальных воздушных зазоров 7 мм.

Сравнение результатов измерений на рисунке А.4, которые выполнены при частоте 100 кГц, демонстрируют, что нет значительной разницы в поведении трех игл (Ogura, 30 и 8 мкм) и ВВ-иглами (приблизительно 5 мкм). В соответствии с рисунком А.4 меньшие значения получены ВВ-иглами.

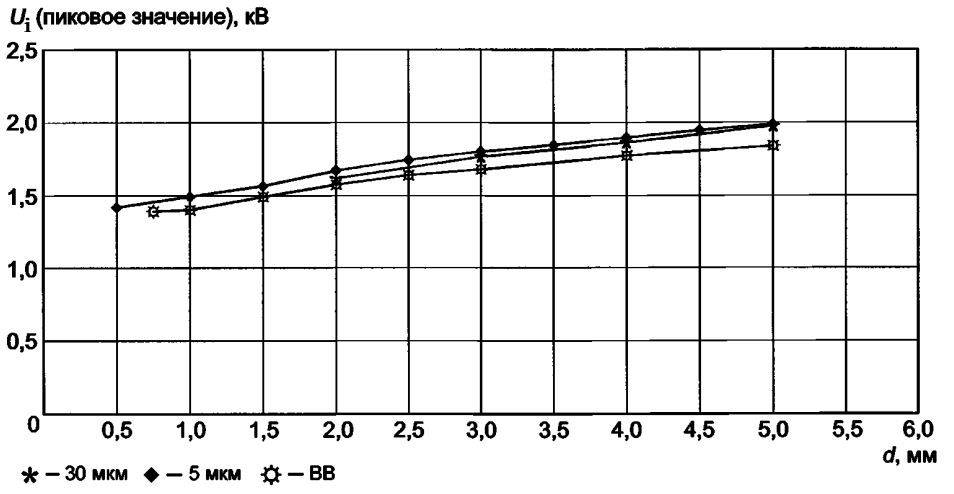
Так как затухающее напряжение ЧП много больше репродуцирует, это должно быть предусмотрено. Это имеет существенное значение для определения размеров, так как ЧП может начаться при кратковременных перенапряжениях и может не затухнуть при ином стабильном напряжении (см. IEC 60664-1, п. 4.1.2.4).

Из этого измерения затухающего напряжения ЧП для частоты 460 кГц на рисунке А.5 [6] вместе с напряжением пробоя произведена и представлена оценка. Применяются последние испытания, ограниченные максимальным испытательным напряжением источника.

Дальнейшие испытания должны быть проведены для частоты 1 МГц. Как результат, на рисунке А.6 показаны напряжения затухания ЧП и напряжения пробоя [6]. Для воздушных зазоров менее 1 мм начальный ЧП близко совпадает с пробоем, так что невозможно их различить.

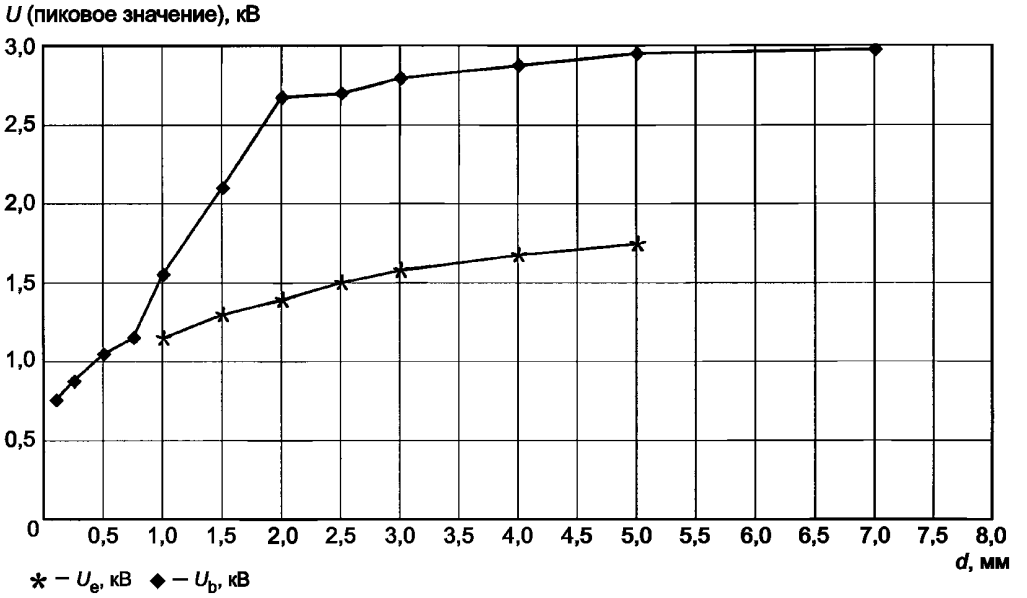
Для частоты 3 МГц могут быть проведены ограниченные эксперименты с получением некоторых не вполне достоверных данных. Эти данные приблизительно одинаковые с данными, полученными при частоте 1 МГц. Следовательно, рассматриваемые данные, показанные на рисунке А.6, уместны для определения размеров для целей настоящего стандарта.

Следует отметить, что уровень подъема испытательного напряжения в некоторой степени влияет на результаты измерений напряжения начала ЧП.



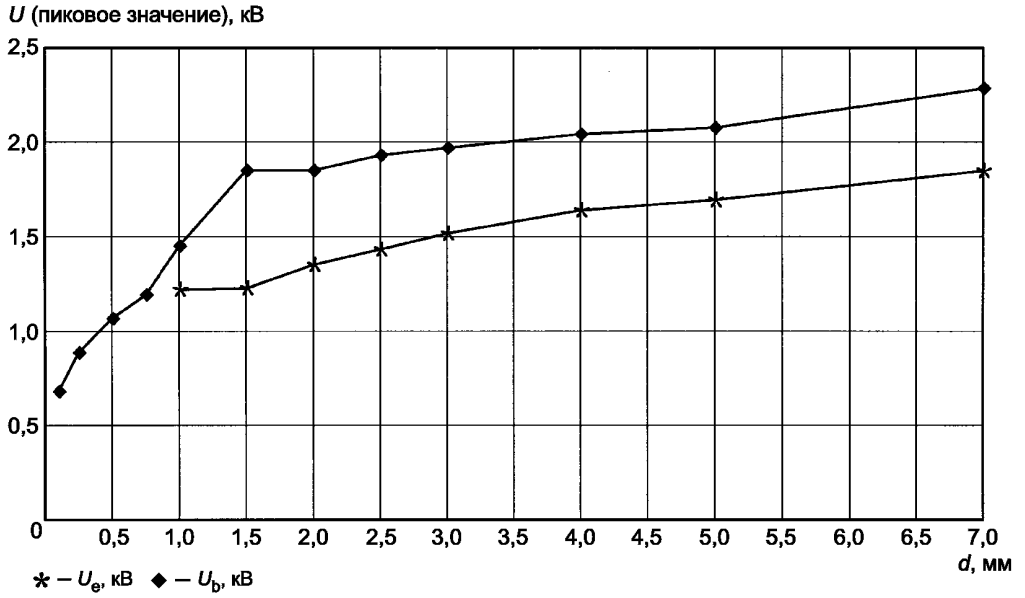

$U_i$ — начальное напряжение ЧП; $d$ — воздушный зазор

Рисунок А.4 — Начальное напряжение ЧП в воздухе при атмосферном давлении для частоты 100 кГц, точечные электроды с различными радиусами точки




$U_e$ — напряжение затухания ЧП; $U_b$ — напряжение пробоя; $d$ — воздушный зазор

Рисунок А.5 — Напряжения затухания ЧП и напряжения пробоя в воздухе при атмосферном давлении для частоты 460 кГц, точечные электроды с ВВ-иглами [6]




$U_e$ — напряжение затухания ЧП; $U_b$ — напряжение пробоя; $d$ — воздушный зазор

Рисунок А.6 — Напряжения затухания ЧП и напряжения пробоя в воздухе при атмосферном давлении для частоты 1 МГц, точечные электроды с ВВ-иглами [6]

## Приложение В
(справочное)

## Изоляционные характеристики расстояний утечки при высокочастотном напряжении

### В.1 Характеристики изоляционной стойкости расстояний утечки

В IEC 60664-1 трекинг рассматривается только как явление, требующее учета при определении размеров расстояний утечки. Однако последние данные [9] дают доказательства того, что для жестких условий окружающей среды и если применяется не стойкий к трекингу материал, только это применимо (см. IEC 60112). В более благоприятных условиях окружающей среды трекинг менее важен для определения размеров. В этом случае, особенно для малых расстояний менее 2 мм, напряжение пробоя, приложенное к поверхности изоляционного материала, снижается вследствие загрязнений, и это должно учитываться при определении размеров (см. IEC 60664-5).

Для незначительных загрязнений, и особенно малых размеров, пробой по поверхности изоляции представляется важным для определения размеров, и должно рассматриваться влияние частоты на напряжения пробоя.

### В.2 Условия эксперимента

Испытательный образец для измерений характеристик изоляционной стойкости небольших расстояний утечки представлен на рисунке В.1. Материалы, которые включены в исследование, указаны в таблице В.1. Применялись изготовленные по стандартной промышленной технологии проводники печатного монтажа. Образцы были чистые и без покрытия. Каждая сторона имела 15 измерительных точек между параллельными проводниками. На рисунке В.1 также показаны нормальные расстояния электродов. Измерялись оба напряжения ЧП и напряжение пробоя.

Для измерения напряжений ЧП и напряжения пробоя уровень подъема испытательного напряжения выбирали приблизительно 300 В/с. Таким образом, это гарантировало, что не будет значительных повреждений испытательного образца во время испытания. Если для высокочастотного испытательного напряжения уровень подъема значительно более низкий (примерно 10 В/с), во время испытания может произойти повреждение основного материала. Этот результат измерений напряжений пробоя снижается на величину порядка 10 %.

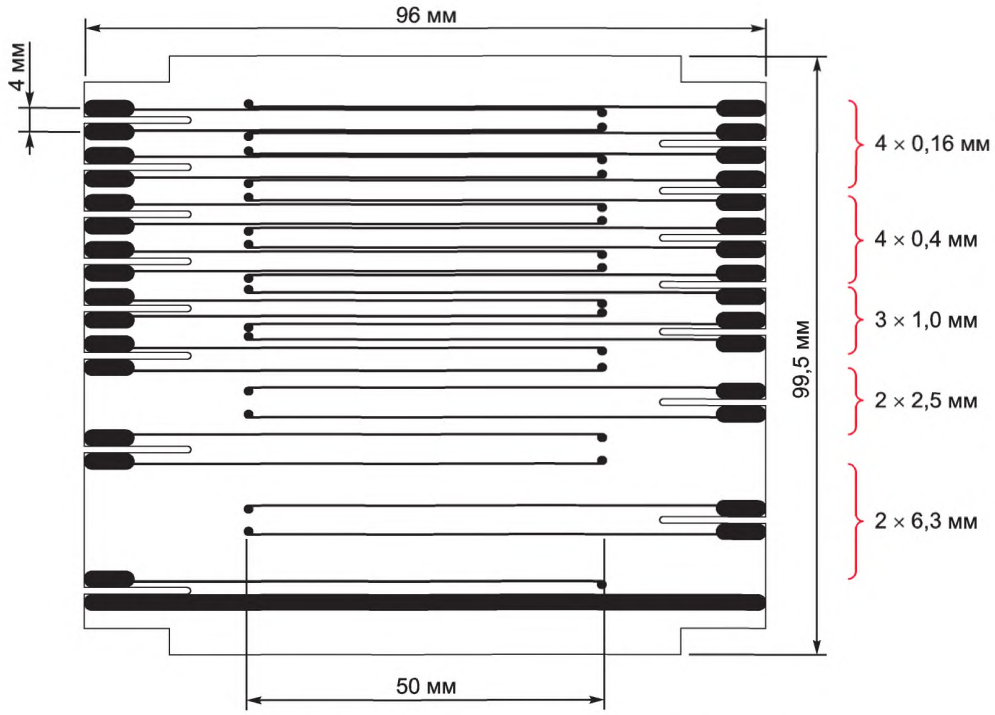


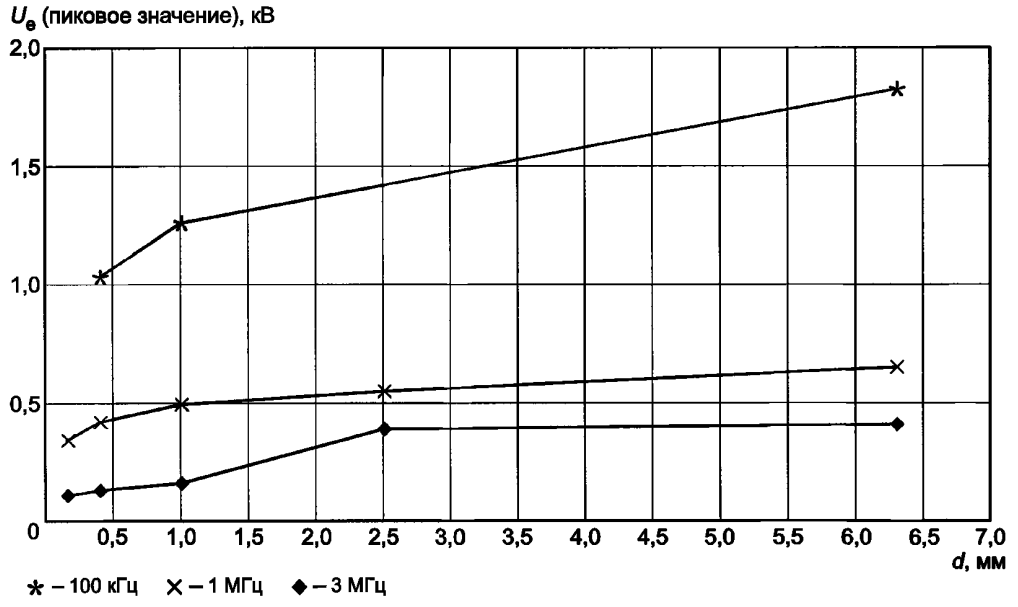

Рисунок В.1 — Испытательный образец для измерений напряжений ЧП и выдерживаемого напряжения пробоя расстояний утечки не более 6,3 мм

Таблица B.1 — Материалы, примененные в исследовании

| Классификация материалов | Описанные материалы |
|---|---|
| B | Стекло-эпоксидный ламинат FR4 |
| C | Полиэстеровая резина (термореактивная), тип 802 |
| D | Фенольная резина, тип 31,5 |
| E | Полиамидная пленка ламинированная стекло-эпоксидным ламинатом FR4 |
| G | Полиэстеровый ламинат GPO III |
| H | Меламиновая резина, тип 150 |

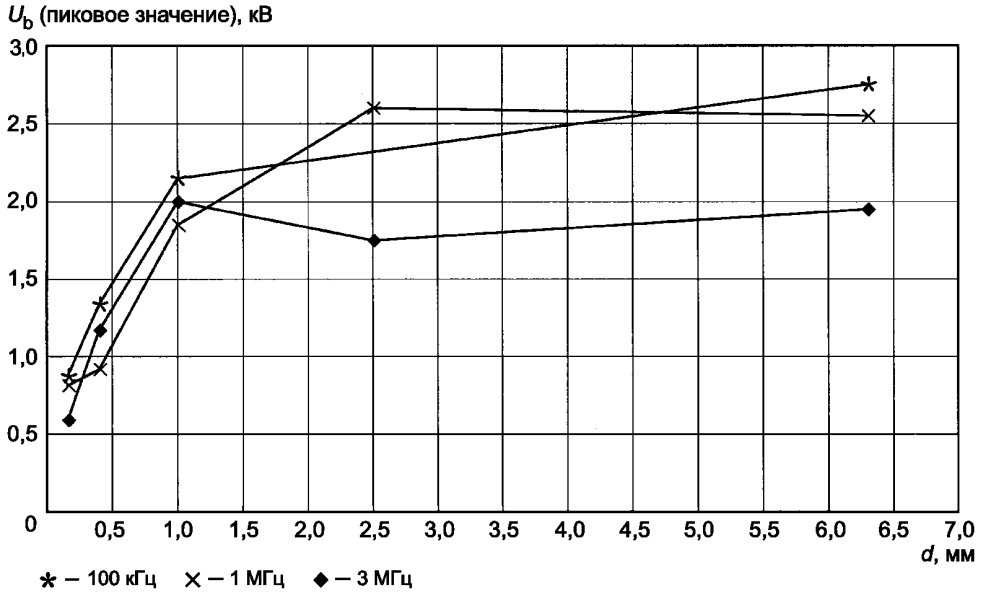
### B.3 Экспериментальные данные

Результаты испытания показаны на рисунках B.2 и B.3; более детальное описание приведено в [5]. При сравнении частот 100 кГц и 1 МГц приблизительное отличие напряжений начального частичного пробоя (ЧП) 66 %. При частоте 3 МГц эти значения далее снижены приблизительно на 30 %, так что необходимо обеспечить специфичные критерии определения размеров, зависимые от частоты напряжения.




*d* — расстояние утечки

Рисунок B.2 — Результаты испытания напряжения затухания ЧП $U_e$ при расстояниях утечки не более 6,3 мм




*d* — расстояние утечки

Рисунок В.3 — Результаты испытания напряжения пробоя $U_b$ при расстояниях утечки не более 6,3 мм

Напряжение пробоя менее зависит от частоты напряжения. Тем не менее эффект насыщения, который наблюдался для воздушных зазоров, так силен, что почти нет никакого увеличения напряжение пробоя, которое может быть получено изменением расстояния на уровне нескольких миллиметров.

Во время измерений напряжения пробоя у многих испытательных образцов базовый материал и/или электроды повреждаются. Источником этого повреждения бывает проводимость изоляционного материала, связанная с двумя механизмами разрушения. Один из них — расплавление материала электродов во время пробоя вследствие большой энергии разряда. Другое явление встречается во время ЧП, перед пробоем, и является результатом деградации основного материала.

**Приложение С**
**(справочное)**

## Изоляционные характеристики твердой изоляции при высокочастотном напряжении

### С.1 Механизм деградации твердой изоляции

В сравнении с характеристиками изоляционных промежутков в воздушной среде твердая изоляция может обеспечить, по крайней мере на порядок, более высокую амплитуду напряжения стойкости поля к пробою изоляции. Тем не менее эта стойкость поля к пробою оказывает большое влияние на параметры, такие как толщина изоляции, температура изоляционного материала и длительность электрического стрессового воздействия [10]. Должно быть также рассмотрено специфическое влияние, связанное с композициями и технологией производства материалов. Относительно малых толщин изоляции (< 0,1 мм) и кратковременных стрессовых воздействий в основном можно сказать, что очень большая стойкость поля к пробою порядка 100 кВ/мм может быть получена при промышленной частоте.

Тем не менее в практическом применении большая стойкость поля к пробою твердой изоляции далеко не всегда используется. В случае полостей в материале или воздушных пузырей между слоями изоляционных систем ЧП может произойти при напряжении ниже напряжения пробоя. Таким образом, газ внутри полостей на короткий период времени становится проводящим; изоляция тем не менее не прекращает сопротивляться остающимися частями твердой изоляции. Затем в течение частичного пробоя происходят пробои в полостях, заполненных воздухом (или аналогичными газами), при относительно низкой приложенной напряженности поля. Дальнейшему усугублению результатов способствует тот факт, что для стрессового переменного напряжения характерен емкостный характер напряжения сети, и согласно сравнительно высокой диэлектрической постоянной твердой изоляции большие фрагменты падения напряжения прикладываются к заполненным газом полостям. Таким образом, изолирующий газ еще более подчеркивает снижение стойкости поля к пробою.

В реальных изоляционных системах частичный пробой может встречаться при напряжениях ниже напряжения пробоя. При длительном воздействии это ведет к деструкции близко расположенных изоляционных материалов [11]. Как показано на следующем примере, длительность времени до пробоя изоляции в неблагоприятных условиях так мала, что даже в течение высоковольтных испытаний напряжением промышленной частоты возможно повреждение твердой изоляции.

Например, печатные платы, покрытые изоляционными пленками [12], рассматриваются, когда напряжение приложено между проводниками и прилегающими местами пайки, нормально расположенными на номинальном расстоянии 0,4 мм. Когда приложено высокое напряжение, стойкость частичного пробоя определяется ниже изоляционной пленки (покрытия), как финальный результат деструкции испытательного образца. Это показано на рисунке С.1 для постоянного значения испытательного напряжения промышленной частоты $U_t$, равного 3,15 кВ (действующее значение). Это испытательное напряжение уже на 45 % выше значения начального напряжения ЧП, равного 2,2 кВ (действующее значение). Испытательные образцы из изоляционные материалов надлежащего качества способны выдерживать это воздействие приблизительно 37 мин с жесткостью стойкости ЧП $q$ в диапазоне кулонов.

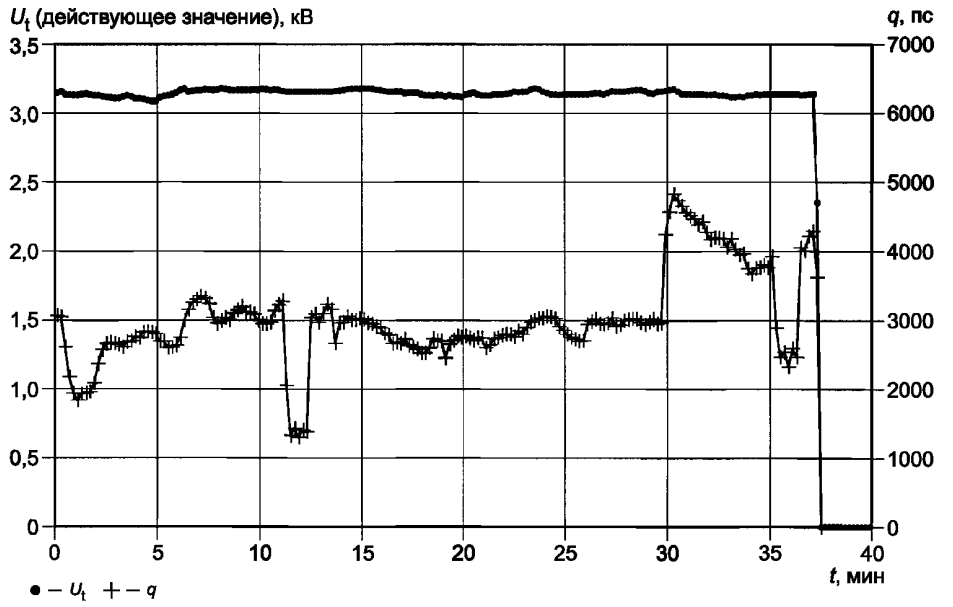



Рисунок С.1 — Изоляционная стойкость покрытий к ЧП, постоянное испытательное напряжение $U_t$ ($f$ = 50 Гц) [12]

На рисунке С.2 испытательный образец подвержен воздействию приблизительно линейно повышающегося испытательного напряжения $U_t$ промышленной частоты с темпом роста приблизительно 4 кВ в 1 мин. Начальный ЧП с напряжением 2,2 кВ (действующее значение) отчетливо виден. Типичным для этого испытательного образца является немедленное проявление ЧП очень высокой интенсивности. Интенсивность ЧП и уровень импульса ЧП приблизительно пропорциональны значению испытательного напряжения. Образец, вероятно, способен выдержать более высокое напряжение только после 7 мин. Этот пример ясно показывает, что для напряжения промышленной частоты сглаженные частные пробои могут потенциально привести к большой деструкции в течение относительно короткого периода времени.

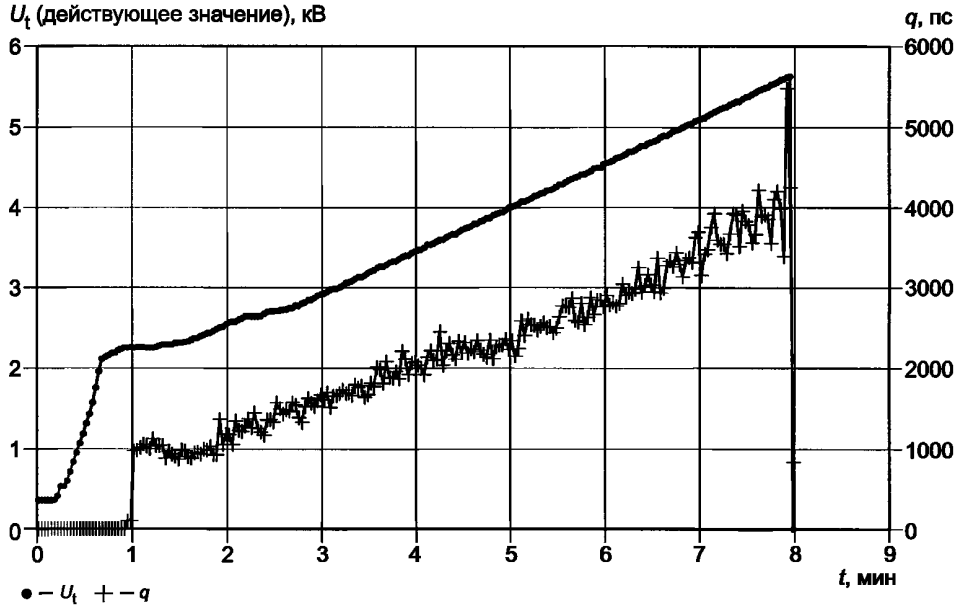



Рисунок С.2 — Изоляционная стойкость покрытий к ЧП; линейно нарастающее испытательное напряжение $U_t$ ($f$ = 50 Гц) [12]

В дополнение одновременно были рассмотрены пять реальных электроустановок, и установлено, что все стрессовые воздействия и соответствующие разрушительные эффекты, произошедшие во время эксплуатации электрооборудования, накопленные. Предварительно накладывались электрические, тепловые [13] и также механические стрессовые воздействия согласно малоизученным методикам. Моделирование этих длительных тепловых воздействий в течение соответствующих кратковременных испытаний — очень сложная задача. Это может быть достигнуто только комбинированием электрических испытаний и соответствующих условий для испытательного образца. Применимые обусловленные методы приведены в IEC 60664-1, п. 4.1.2.1.

Эти стрессовые воздействия распространяют частные пробои [14], и их разрушительный эффект, комбинируясь с диэлектрическим нагревом, приводит к резкому снижению стойкости к пробою [15]. Это гарантирует разрушительный эффект происходящими частными пробоями с возрастанием частоты напряжения, что уже продемонстрировано ускоренными по времени испытаниями [16].

Более правильно, что ускорение времени возможно для целей тепловых воздействий (закон Аррениуса, [17]). Тем не менее даже это может быть только смоделировано, если это случай химической коррозии. Однако если механизм ухудшения меняется (например, ослабление/смягчение во время резкого роста температуры) во время усиления стрессового воздействия, метод ускорения времени допустим ненадолго. В случае теплового стрессового воздействия это может быть легко предвидено и устранено. Тем не менее, когда прикладывается возрастающее электрическое стрессовое воздействие для достижения ускорения времени, можно встретить изменение механизма ухудшения [18].

Обычно важны два механизма повреждения твердой изоляции. Один механизм повреждения является результатом диэлектрических потерь от высокого электрического стрессового воздействия. Встречающийся рост нагрева может приводить к тепловой нестабильности и тепловому пробою. Это обычно имеет место в течение нескольких минут и может быть легко подтверждено. Дополнительно твердая изоляция может включать газовые полости или пустоты, образованные различными слоями изоляции, границами между изолирующими и проводящими частями или некачественным изготовлением изоляционных материалов. В случае малых полостей частные пробои могут приводить к окончательным пробоям твердой изоляции, даже если диэлектрическое стрессовое воздействие существенно ниже, чего нет при тепловом пробое.

Для твердой изоляции частота напряжения является очень важным влияющим фактором. Диэлектрические потери, полученные от частоты, выражаются следующей формулой

$$P_v = 2\pi P_v f U^2 C \tan\delta, \quad (C.1)$$

где $P_v$ — мощность рассеивания;

$f$ — частота напряжения;

$U$ — действующее значение напряжения, приложенного у изоляции;

$C$ — емкость изолирующего устройства;

$\tan\delta$ — диэлектрический коэффициент потерь (тангенс потерь) изоляционного материала.

Надлежащая зависимость диэлектрического коэффициента потерь $\tan\delta$, влияние частоты на диэлектрические потери могут быть выше и ниже ожидаемой линейной зависимости. Результатом могут являться большая вероятность теплового пробоя и снижение кратковременной диэлектрической стойкости.

Не представляется возможным смоделировать эффект высокочастотного стрессового воздействия напряжения на твердую изоляцию. Так что наличие высокого уровня такого воздействия в основном требует проведения испытаний твердой изоляции высокочастотным напряжением. Следующие экспериментальные результаты могут дать некоторую информацию о значениях напряженности электрического поля, которое представляет высокое стрессовое воздействие специфичной частоты, требующейся для высокочастотных испытаний.

### С.2 Экспериментальные результаты

Характеристики высокочастотного пробоя были изучены на различных изоляционных материалах [15]. Наиболее важные результаты представлены на рисунке С.3. Для частоты 1 МГц напряженность кратковременного пробоя поля составляет только 10 % значения для промышленной частоты. Напряженность пробоя поля не достигает нижнего предела, даже если частота ниже 100 МГц.

Диэлектрическая стойкость твердой изоляции является основной, особенно при высокочастотном напряжении, далее она снижается за счет воздействий влажности и температуры.

Длительное накапливающее воздействие условий высокой влажности на стойкость поля твердой изоляции к пробою при высокочастотном напряжении приведено на рисунке С.4 [19]. Снижение стойкости к пробою наполненного слюдой фенола экстраординарно высоко. Это также важная проблема высокой частоты, которая и далее приводит к ухудшению изоляционной стойкости с ростом частоты.

Слабое представление о наполненном слюдой феноле, вызванное его сравнительно высокой способностью абсорбировать воду, которое дает основание считать весомость этого на уровне 1 %, — в ряду таких условий.

В подобных условиях абсорбционная способность ламината из кремниевого стекла составляет только 0,3 % весомости.

Диэлектрическая стойкость твердой изоляции является функцией толщины материала, и много тонких пленок имеют диэлектрическую стойкость с размахом амплитуды на один порядок выше, чем у испытательного образца толщиной 0,75 мм. Это продемонстрировано на рисунке С.5 [20]. Однако с ростом частоты это также и резкое снижение значений. При частоте 1 МГц значения пробоя были приблизительно равны только 10 % значения при частоте 50 Гц. Это снижение сравнивалось на образцах, имеющих приблизительную толщину 1 мм. Таким образом, другие размеры, соответствующие толщине твердой изоляции, могут браться в соответствии с оценкой зависимости диэлектрической стойкости от толщины изоляции.

Влияние температуры на напряжение пробоя приведено на рисунке С.6 [20]. Из него следует, что температура является важным влияющим фактором, который должен учитываться в связи с определением размеров и испытаниями.

Детальные результаты относительно характеристик частных пробоев при высокочастотном напряжении доступны для частот немного выше нескольких кГц [16] и [21]. При этом диапазоне было установлено, что время аварии, происходящей при частичном пробое, обратно пропорционально частоте. Эта зависимость может применяться для ускоренных испытаний. Таким образом, особенно при высокой частоте напряжения, приемлемый срок службы твердой изоляции не может быть ожидаем в условиях частных пробоев.

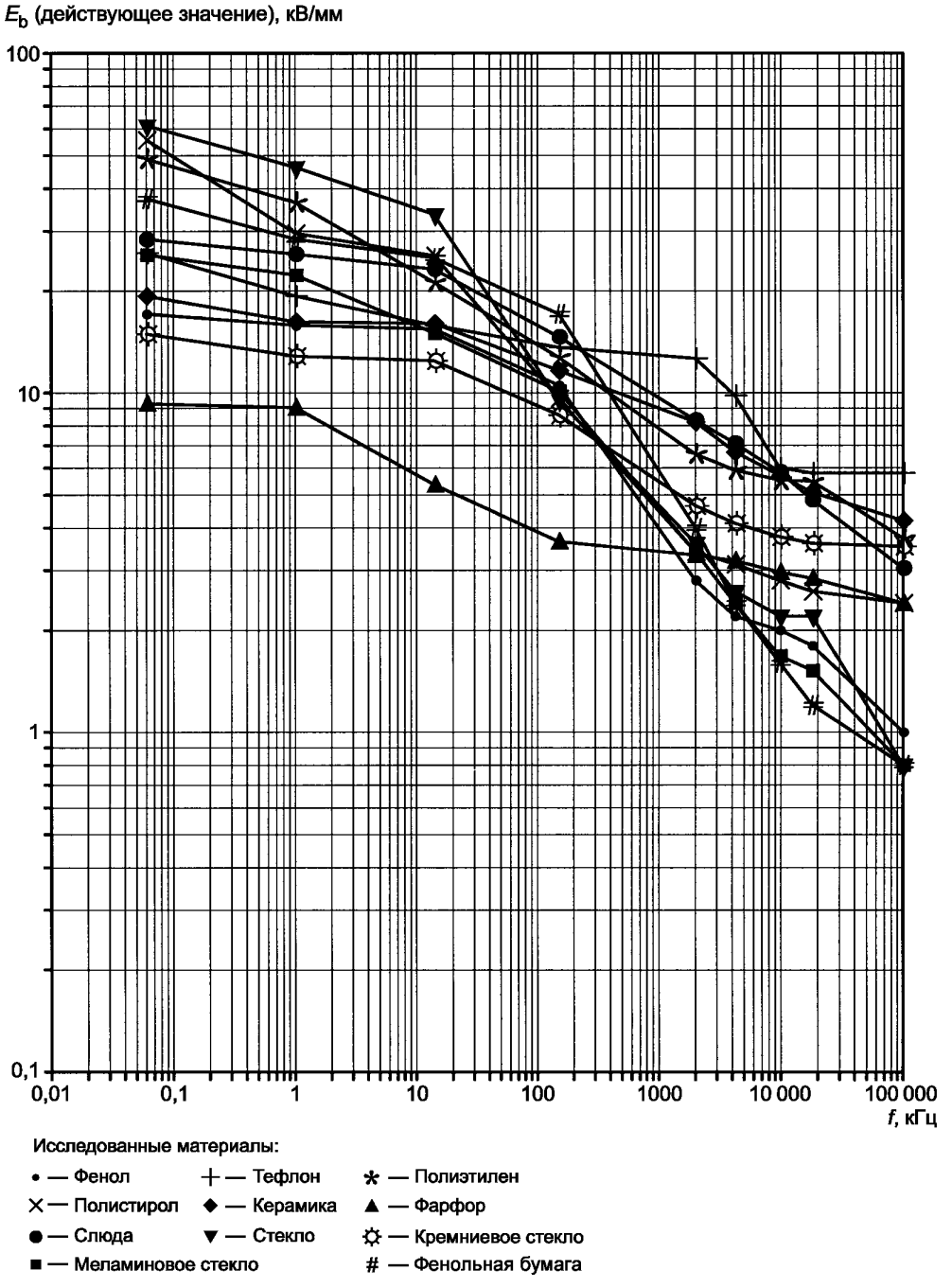



Рисунок С.3 — Высокочастотный пробой твердой изоляции: $d$ = 0,75 мм [15]

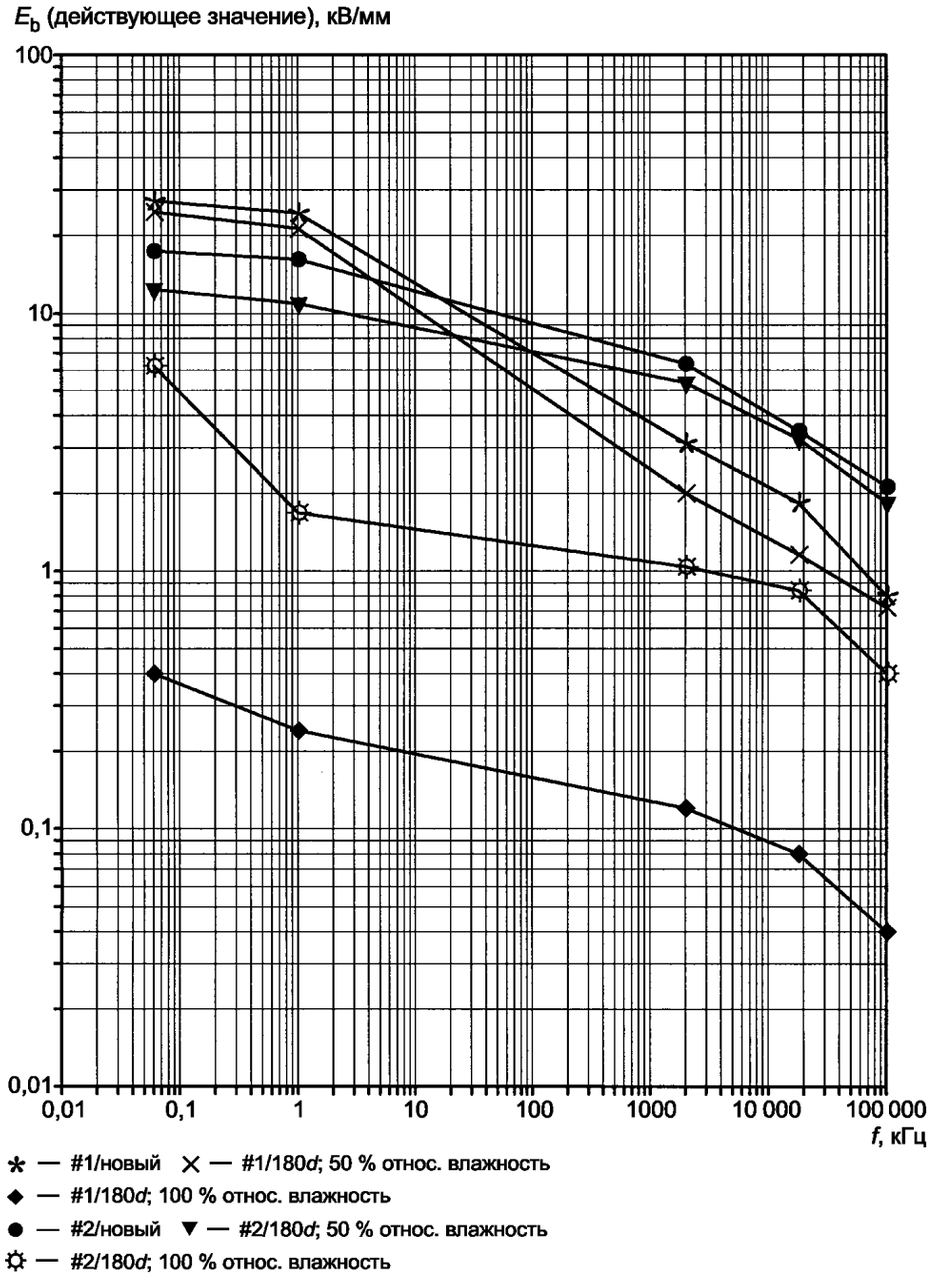



Рисунок С.4 — Высокочастотный пробой твердой изоляции, влияние влажности; условия при 50 °С: #1: наполненный слюдой фенол, $d$ = 0,75 мм; #2: ламинат из кремниевого стекла, $d$ = 0,75 мм [19]

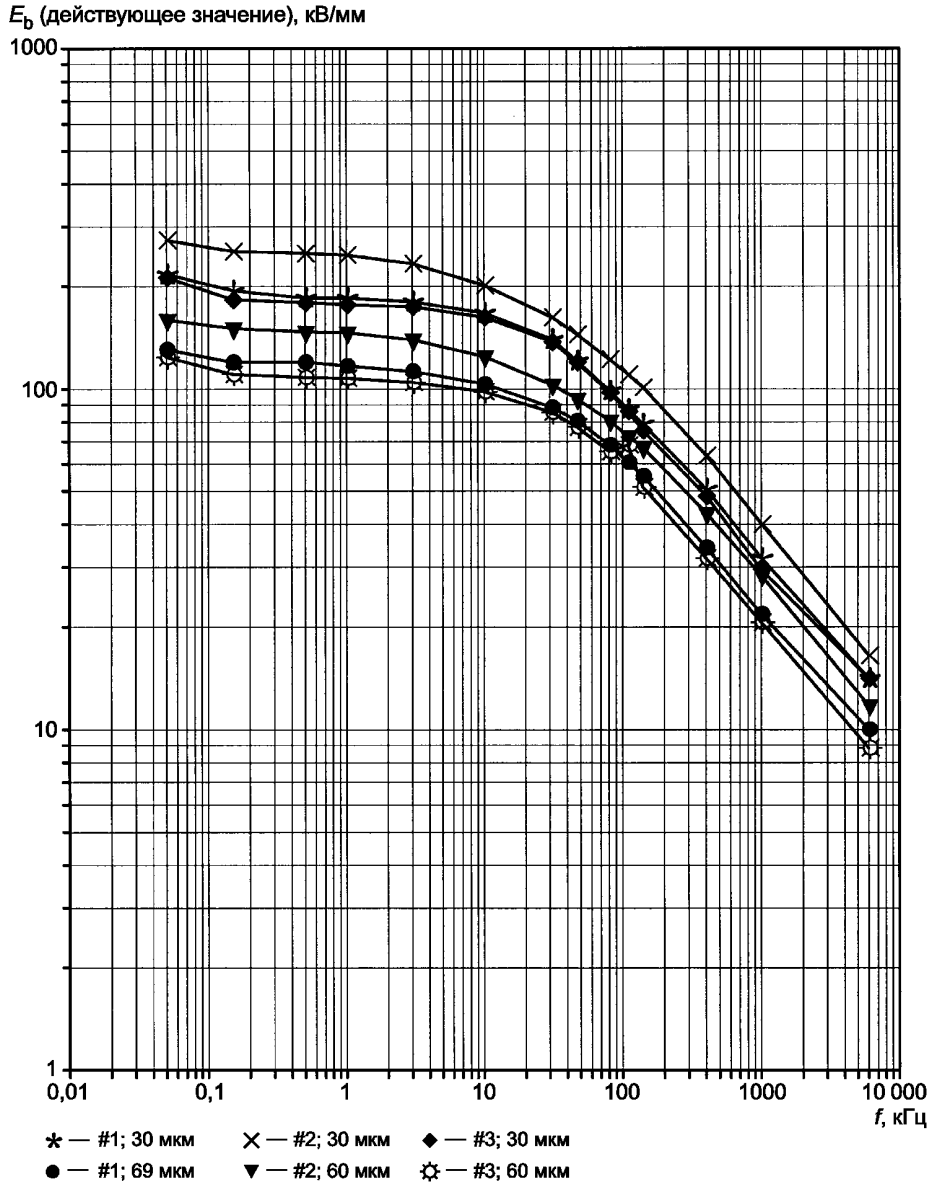



Рисунок С.5 — Высокочастотный пробой изолирующих пленок; #1 — ацетобутиратная целлюлоза; #2 — поликарбонат; #3 — триацетатная целлюлоза

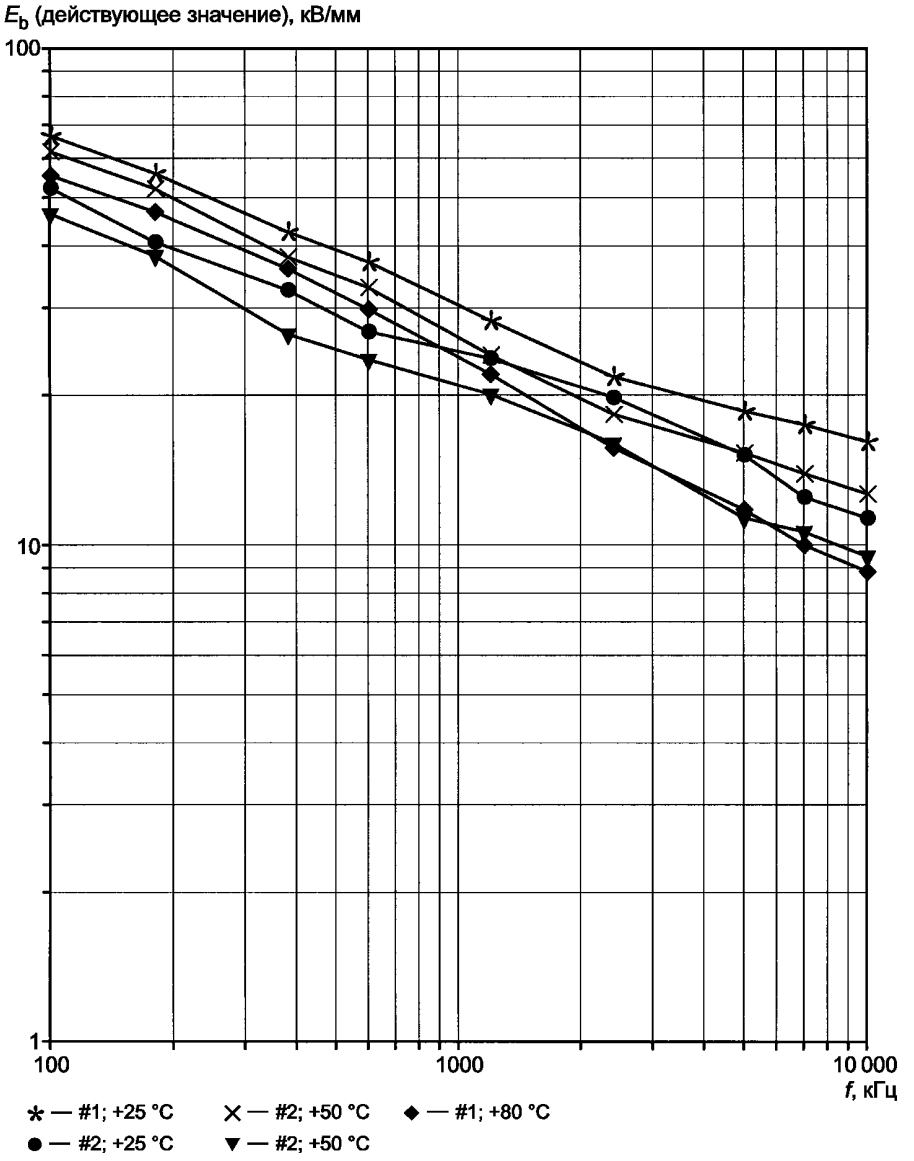



Рисунок С.6 — Высокочастотный пробой изолирующих пленок; #1 — полистирол, $d$ = 80 мкм; #2 — полиэтилен, $d$ = 50 мкм [20]

**Приложение D**
**(обязательное)**

## Испытания изоляции высокочастотными напряжениями

### D.1 Помехи испытательного напряжения

Признавая важность других высоковольтных испытаний, вопрос помех испытательных напряжений, предназначенных для соответствующих испытаний при частотах много больших, чем промышленная частота, является фундаментальным.

Высокочастотный резонансный трансформатор может быть применен в комбинации с низковольтным высокочастотным генератором [22]. Проблемы этого метода продемонстрированы в примере, приведенном на рисунке D.1. В порядке получения высокой резонансной частоты число витков во вторичной обмотке трансформатора должно снижаться, как показано на рисунке D.1. Следовательно, должно также снижаться и необходимое выходное напряжение.

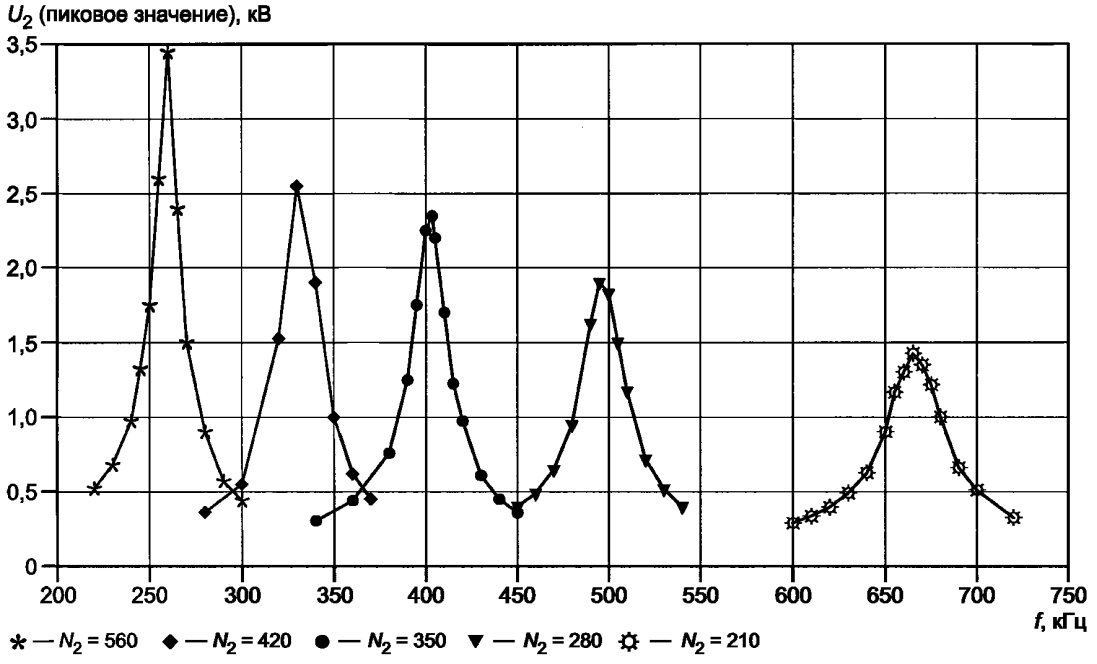



Рисунок D.1 — Высокочастотный резонансный трансформатор; влияние числа витков вторичной обмотки $N_2$ на выходное напряжение $U_2$; $N_2$ = 210/280/350/420/560 [22]

В порядке охвата всего диапазона частоты требуется некоторый резонанс трансформаторов. Дополнительной проблемой источника испытательного напряжения является сильная реакция между импедансом испытательного образца и частотой и амплитудой испытательного напряжения.

Как альтернатива, в качестве источника испытательного напряжения может быть применен мощный высокочастотный генератор (трансмиттер) [5], [6] и [20]. На рисунке D.2 показан пример. Выходное напряжение данного источника составляет приблизительно 4 кВ (пиковое значение) при максимальной частоте 5 МГц (см. таблицу D.1).

Способность источника испытательного напряжения питать большую емкостную нагрузку — одна из наиболее важных проблем источника. Так, конденсатор связи ЧП должен быть больше, чем емкость испытательного образца, данный конденсатор обычно определяет емкостную нагрузку.

Таблица D.1 представила некоторые типичные значения для мощного источника испытательного напряжения, который применяли в [5] и [6]. Выходное напряжение, генерируемое вакуумным тетродом, питает мощный источник испытательного напряжения (4 кВ, 400 мА). Последовательная резонансная цепь, формируемая индуктивностью анода и общей емкостью нагрузки, настраивается на частоту, необходимую для применения. Максимальное испытательное напряжение и максимальная емкость нагрузки (главным образом емкость накопительного конденсатора ЧП) приведены в таблице D.1. Общие гармонические искажения этого испытательного напряжения, составляющие менее 2 %, являются результатом действия резонанса.

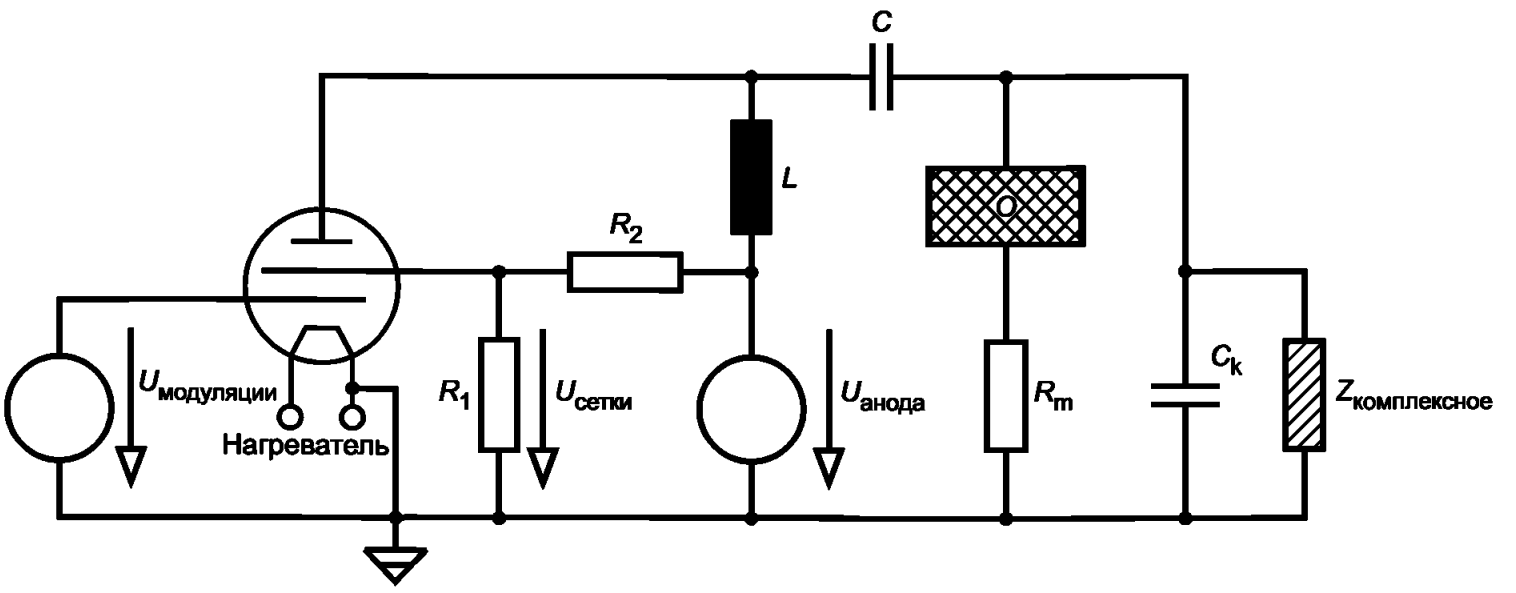



Рисунок D.2 — Высокочастотный генератор большой мощности [5] и [6]

Таблица D.1 — Данные источника испытательного напряжения [5] и [6]

| Частота, МГц | Емкость накопительного конденсатора, пФ | Максимальное испытательное напряжение, кВ | Требующийся испытательный ток, А |
|---|---|---|---|
| 0,1 | 1100 | 2,7 | 1,9 |
| 0,2 | 1100 | 4,0 | 5,5 |
| 0,5 | 450 | 3,4 | 4,8 |
| 1,0 | 520 | 2,7 | 8,8 |
| 3,0 | 320 | 1,0 | 6,0 |

### D.2 Испытание высокочастотного частичного пробоя

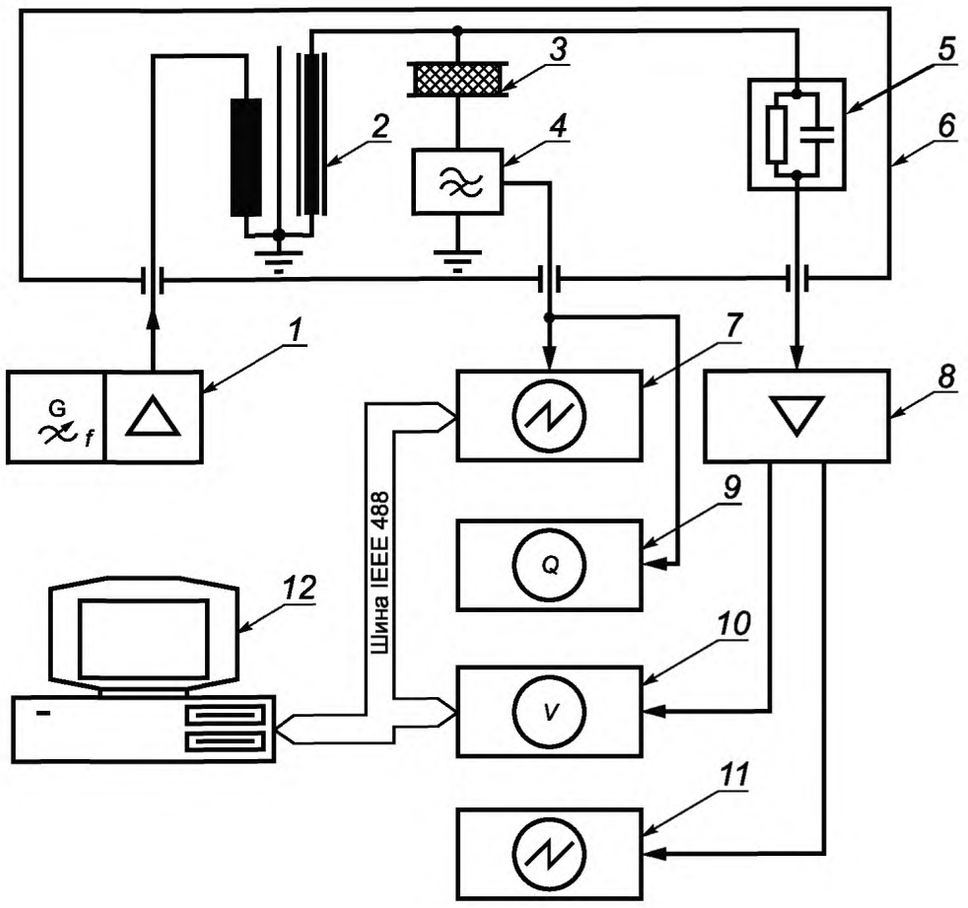
#### D.2.1 Испытательное оборудование

Встречаются некоторые дополнительные проблемы, если требуется провести испытание ЧП высокочастотным напряжением нестандартным измерительным оборудованием ЧП. Тем не менее предпочтительным является в основном цифровой запоминающий осциллограф в комбинации с частями для подавления высокочастотного испытательного напряжения.

Много отчетов измерений ЧП при высокочастотном испытательном напряжении демонстрируют испытательный ток, показанный на рисунке D.3 [24]. Регистрация частичного пробоя выполняется цифровым интегратором цифрового запоминающего осциллографа с высоким уровнем избирательности.

Эта цепь на рисунке D.3 базируется на высокочастотном резонансном трансформаторе (2), который питает высокочастотный усилитель (1) [22]. Возможной альтернативой является применение резонанса мощного высокочастотного генератора, как показано на рисунке D.2.

Такое допущение генерирования значительно высокой частоты [5] и [8], пока поддерживаются низкие гармонические искажения, желаемо для того, чтобы уменьшить отклонения испытательного напряжения в течение измерения ЧП.




*1* — высокочастотный генератор и усилитель; *2* — высокочастотный резонансный трансформатор; *3* — испытательный образец; *4* — полосовой фильтр; *5* — высоковольтный разрядник; *6* — экранирующая оболочка; *7* — быстродействующий цифровой запоминающий осциллограф; *8* — разделительный усилитель; *9* — средство измерения ЧП (узкого диапазона, только для целей контроля); *10* — цифровой вольтметр; *11* — аналоговый осциллограф; *12* — компьютер для регистрации и контроля

Рисунок D.3 — Испытательная цепь ЧП при испытаниях высокочастотным напряжением [22]

**D.2.2 Испытательная цепь**

D.2.2.1 Основной анализ

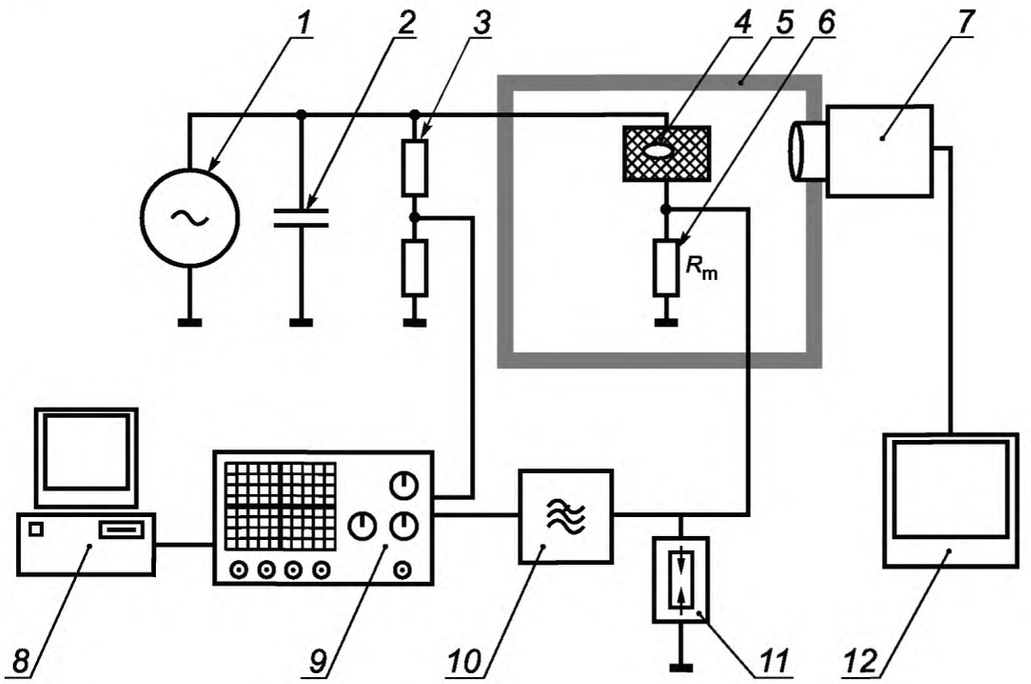
Измерение ЧП производится регистрацией тока ЧП. Для этой цели измерительный импеданс $R_m$ соединяют последовательно с испытательным образцом. Напряжение, падающее на измерительном импедансе, приложено через трехуровневый полосовой фильтр к одному из каналов цифрового запоминающего осциллографа с высокой полосой пропускания (по крайней мере, 100 МГц) так, что вместе с испытательной цепью, в целом содержащей общие элементы, может быть получена полоса пропускания 60 МГц. Полосовой фильтр отделяет падение напряжения, вызванное емкостным током, питающим испытательный образец. Этой технологией может быть получена чувствительность ЧП 5 пК.

Высокочастотное испытательное напряжение измеряют высокочастотным вольтметром и по второму каналу контролируют цифровым запоминающим осциллографом. Если в ряде случаев испытательный образец не виден (например, расположенный в климатической камере), то в целях контроля внешних проявлений пробоя или горения дуги применяют видеокамеру. Испытательный ток контролируют (регистрируют) компьютером посредством шины IEEE 488. Схематическое расположение испытательных цепей установки представлено на рисунке D.4 [5] и [6].

Для испытаний образцов эта технология не представляет сложности, видеокамера также дает возможность визуального определения ЧП. Однако, как правило, она не позволяет повторить электрических измерений, так как порог чувствительности этой технологии даже при высокочастотном напряжении очень низок. Применение фотоумножающей трубки (ФЭУ) для регистрации световых эмиссий кратковременного тока образца позволяет получить прекрасную чувствительность ЧП-регистратора, но не позволяет производить калибровку амплитуды ЧП. Тем не менее применение ФЭУ в качестве триггера осциллографа дает результат значительного улучшения регистрации ЧП, поскольку позволяет включать раньше электрических толчков (всплесков).

D.2.2.2 Требующаяся полоса пропускания испытательного тока

В следующей оценке испытательный ток имеет 1-й уровень низкочастотной переходной характеристики (характеристика $PT_1$), получающейся при нижней частоте среза, равной 0, и верхней частоте среза (3 дБ) $f_c$, что составляет полосу пропускания.




*1* — источник испытательного напряжения; *2* — конденсатор связи; *3* — делитель напряжения; *4* — испытательный образец; *5* — климатическая камера; *6* — измерительный импеданс $R_m$; *7* — видеокамера; *8* — компьютер; *9* — цифровой запоминающий осциллограф; *10* — полосовой фильтр; *11* — защита от перенапряжений; *12* — монитор

Рисунок D.4 — Схема испытательной цепи [5] и [6]

Рассмотрение с учетом эффекта наличия возможной точки резонанса или низкой частоты среза испытательного тока представлено в D.2.2.3.

D.2.2.2.1 Минимальная полоса пропускания разрешения сигнала импульса ЧП

Для высокочастотных испытательных напряжений может быть ожидаема высокая частота повторяемости импульсов ЧП. Следовательно, разрешение важно для исключения наложения импульсов ЧП. Для этого может быть применено только измерительное оборудование, называемое «широкополосным» [23]. Таким образом, для регистрации ЧП обычно применяют широкополосный осциллограф. Сложно определить точное значение полосы пропускания испытательного тока. Для отрезка с частотой испытательного напряжения 100 кГц в поверхностных зазорах образующаяся частота импульсов ЧП составляет до 1 МГц. Для сдвоенных линий [25], где ЧП может происходить одновременно в нескольких местах, может наблюдаться частота импульсов ЧП, превышающая 10 МГц.

В порядке исключения наложения импульсов минимальная полоса пропускания измеряемого тока ЧП должна быть не уже частоты импульсов ЧП. Этот требуемый абсолютный минимум не дает возможности воспроизведения волны импульсов ЧП.

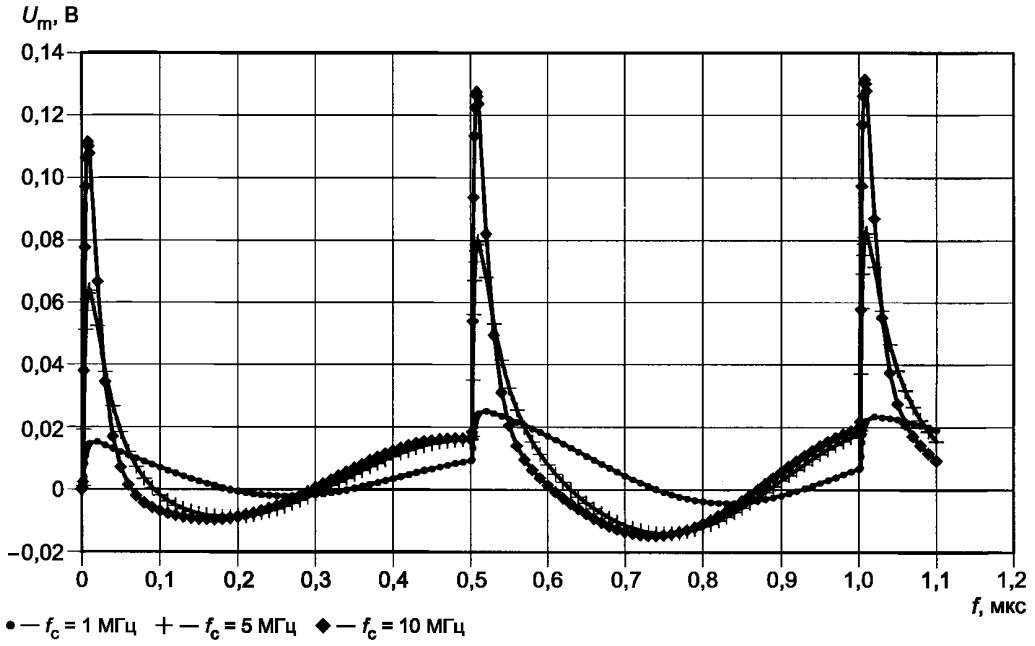



Рисунок D.5 — Характеристика импульсов ЧП для гарантированной частоты 2 МГц при различной верхней частоте среза $f_c$ испытательного тока; здесь включены [5] и [6]

Обычно для верхней частота среза $f_c$ испытательного тока достаточно пятикратного значения частоты импульсов ЧП. Это условие вместе с другими примерами верхнего значения частот среза представлено на рисунке D.5 для предполагаемой частоты импульсов ЧП 2 МГц. Для упрощения сделано допущение наличия только положительных импульсов ЧП.

Это соотношение также обеспечивает обоснованную полосу пропускания в районе частоты воздействия полосового фильтра для хорошей чувствительности детектора ЧП. Пример, приведенный на рисунке D.5, основан на применении трехуровневого полосового фильтра с частотой $f_{centre}$ = 1 МГц.

D.2.2.2.2 Минимальная полоса пропускания для анализов импульсов ЧП

В порядке анализа источника сигнала ЧП и проведения некоторых анализов формы и размера полостей, являющихся источником ЧП, требуется более широкая полоса пропускания. В случае ЧП типа «Streamer-like» с временем нарастания ≤ 1 нс [26] для реагирования на импульс должна быть необходима полоса пропускания на уровне 1 ГГц.

Такая широкая полоса пропускания обычно может быть получена только коаксиальными токовыми цепями, т. е. в лабораторных условиях [26] и [27]. При совместном расположении элементов полоса пропускания на уровне 50 МГц легко достижима. Таким образом, импульс ЧП с очень коротким временем нарастания может быть воспроизведен с временем нарастания приблизительно 7 нс. Этого достаточно для установления различий между ЧП типа «Streamer-like» (типичное время нарастания 1 нс) и ЧП типа «Townsend-like» (типичное время нарастания 20 нс) [26].

D.2.2.3 Определение размеров испытательной цепи

Соответствующее определение размеров должно обеспечить избежание наложения импульсов ЧП и должно позволять проводить некоторый анализ формы волны ЧП.

D.2.2.3.1 Анализ испытательной цепи ЧП

Коаксиальные цепи применяются только для лабораторных экспериментов и не рассматриваются в данном контексте. Испытуемые цепи, состоящие из совместно соединенных элементов (RLC), могут быть представлены эквивалентной цепью, приведенной на рисунке D.6 [5].

Индуктивные компоненты (индуктивность проводников $L_W$, индуктивности источника $L_S$ и конденсатора связи $L_{Ck}$) испытательной цепи ЧП в основном не должны исключаться из рассмотрения. Совместно с емкостными компонентами (конденсатор связи $C_k$, емкость испытуемого образца $C_3$) может образоваться точка резонанса в переходной характеристике испытательного тока ЧП, оказывающая большое влияние на повторение импульсов ЧП. Из этого следует большая вероятность появления апериодической ответной реакции испытательного тока выше точки частоты отсечки $f_c$.

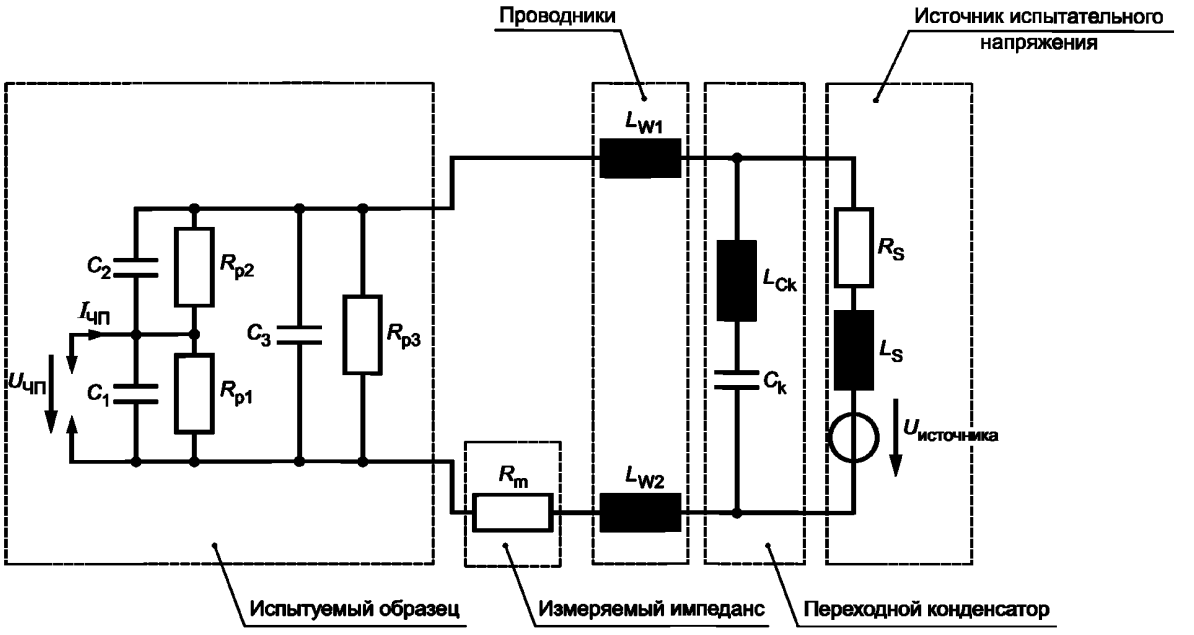
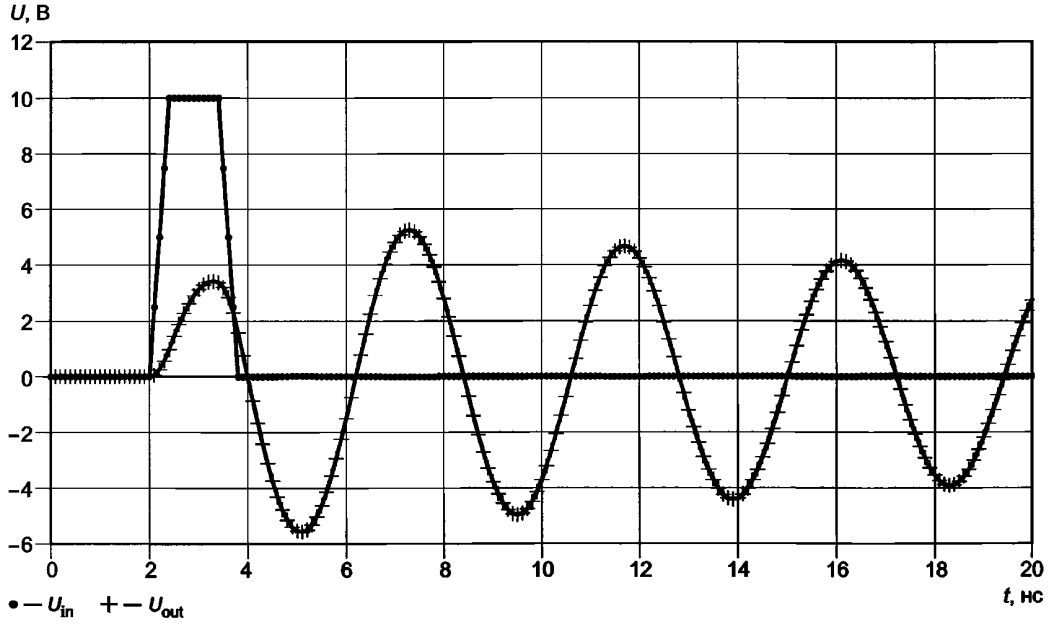



Рисунок D.6 — Эквивалентная цепь испытания тока ЧП с общими элементами

D.2.2.3.2 Источник напряжения ЧП в сравнении с источником тока ЧП

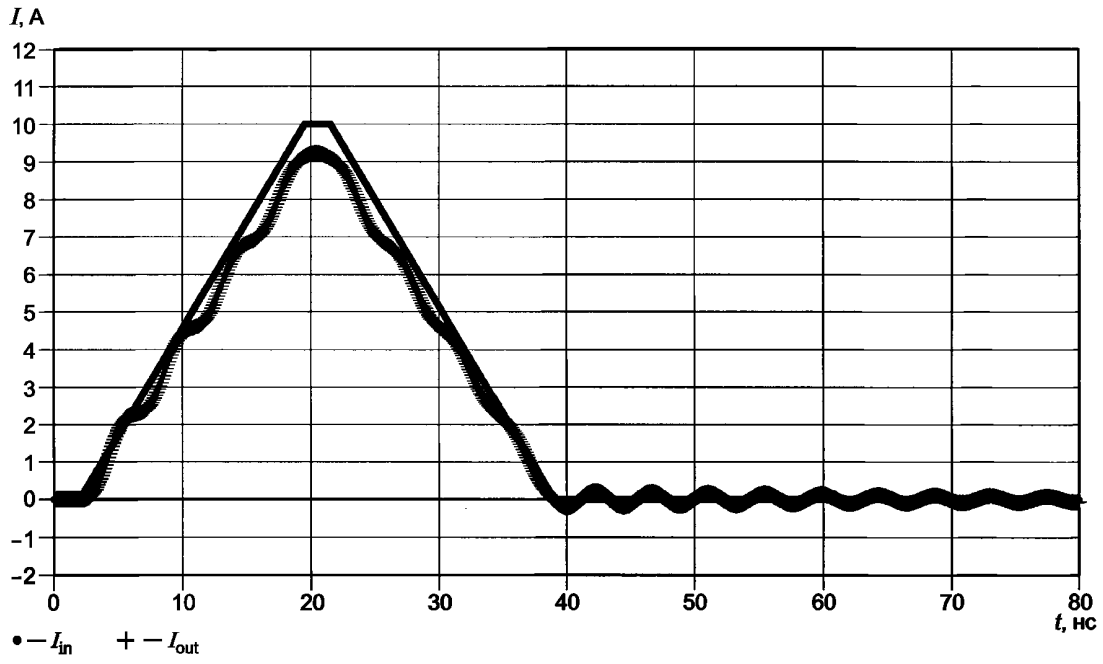
Наиболее подходящей моделью источника импульсов ЧП представляется источник тока. В порядке применения настоящего стандарта для испытания ЧП [23] для калибровки испытательного тока может применяться источник напряжения. Может быть видно, что переходная характеристика испытательного тока ЧП в основном зависит от импульсов источника ЧП, примененного для калибровки.

На рисунке D.7, a использован источник импульсного напряжения ЧП, который не допускает присущих повторений сигнала ЧП. Если в той же самой испытательной цепи применяется импульсный источник тока ЧП (см. рисунок D.7, b), то ему присущи переходные характеристики. Более детальная информация о переходных характеристиках испытательного тока имеется в источнике [5].




*a* — Импульс ЧП источника напряжения

Рисунок D.7, лист 1 — Сравнение переходных характеристик испытательных токов ЧП при использовании источника импульса напряжения ЧП и источника импульса тока ЧП




*b* — Импульс ЧП источника тока

Рисунок D.7, лист 2

В дальнейшем только источник импульсного тока ЧП может рассматриваться в порядке обеспечения соответствующих переходных характеристик. Конечно, это не решает конфликта в случае, когда для калибровки испытательного тока ЧП применяется стандартный импульсный источник напряжения [23].

D.2.2.3.3 Анализ испытательного тока ЧП

Переходные характеристики испытательного тока могут быть подвергнуты анализу применением эквивалентной цепи, приведенной на рисунке D.6. Это может быть сделано сетевым анализом или моделированием схемы, используя соответствующее программное обеспечение.

D.2.2.3.3.1 Сетевой анализ

Для источника импульсного тока ЧП анализ выполняется применением емкостного эквивалента цепи испытуемого образца (см. рисунок D.6). Сравнением различных индуктивностей $L_S$ для вычисления последовательных резонансных частот можно пренебречь. $L_{W1}$ и $L_{W2}$ составляют $L_W$. Совместно с $L_{Ck}$, где конденсатор связи $C_k$ большой индуктивности или имеет проводники большого сечения, общая индуктивность $L$ равна

$$L = L_W + L_{Ck}. \tag{D.1}$$

Вследствие отношения

$$C_3 \succ\succ C_1 \succ\succ C_2 \tag{D.2}$$

емкость испытуемого образца может быть приблизительно равной $C_3$. Следовательно, эффективная емкость источника импульсного тока ЧП равна

$$C = \frac{C_3 C_k}{C_3 + C_k} \tag{D.3}$$

и резонансная частота равна

$$f_r = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{LC}}. \tag{D.4}$$

На практике снижение этого последовательного резонансного тока происходит исключительно за счет $R_m$. Поправочный коэффициент $d$ вычисляют по формуле

$$d = \frac{R_m}{\sqrt{\frac{L}{C}}}. \tag{D.5}$$

Для апериодической реакции поправочный коэффициент должен быть равным

$$d \geq 2. \tag{D.6}$$

Следовательно, индуктивность должна быть ограничена согласно формуле

$$L \leq \frac{R_m^2 C}{4}. \tag{D.7}$$

В этом случае верхняя частота среза $f_c$ может быть приближена к получаемой простой *RC*-цепью согласно формуле

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_m C}. \tag{D.8}$$

Нижняя частота среза равна нулю.

D.2.2.3.3.2 Симуляция цепи

Более детальный анализ испытательного тока возможен частичной симуляцией цепи, применением подходящего кода (PSPICE) [28]. Эта технология может также применяться в порядке получения результатов, описанных в D.2.2.2.1. Первоначально это применяют для того, чтобы оценить влияние размера конденсатора связи на переходные характеристики испытательного тока.

D.2.2.3.4 Влияние конденсатора связи на переходные характеристики

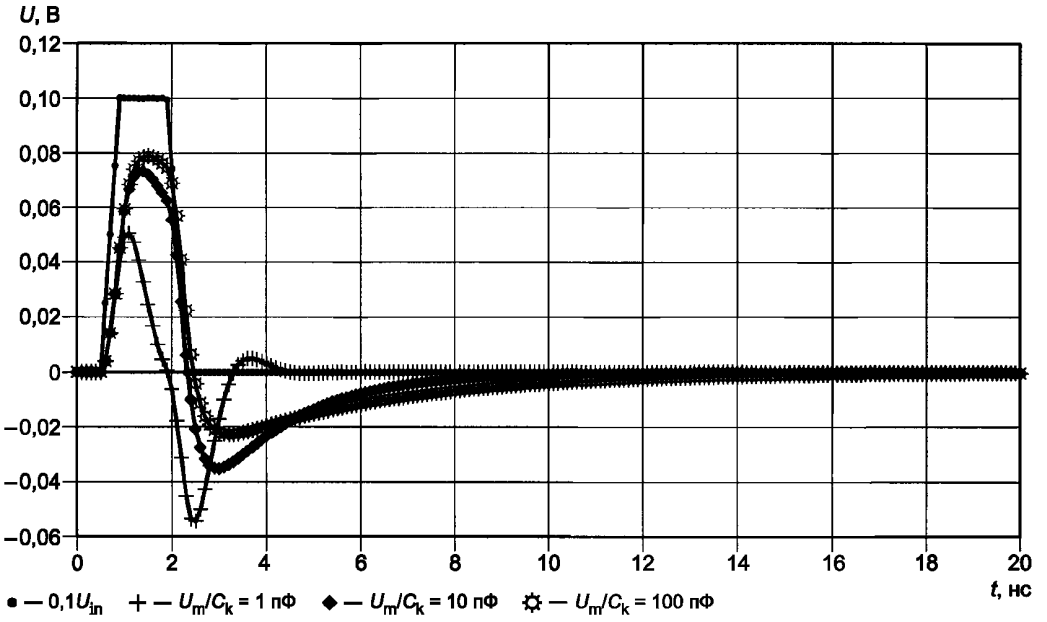



Рисунок D.8 — Входной сигнал $U_{in}$ и измеряемый сигнал $U_m$, зависящие от емкости конденсатора связи $C_k$ (емкость испытуемого образца $C_3$ = 10 пФ) [5]

Влияние размера конденсатора связи $C_k$ на переходные характеристики, показанное на рисунке D.8 [5], ясно демонстрирует, что это влияние очень резкое и что малые емкости конденсаторов связи, сравнимые с емкостью $C_3$ испытуемого образца, не приемлемы [29].

Маленькие конденсаторы связи снижают измеряемый сигнал, что должно быть учтено при калибровке. Тем не менее чувствительность испытательного тока ЧП также будет снижена. Другой проблемой применения маленьких конденсаторов является выделение измеряемого сигнала. Из рисунка D.8 видно, что минимальная емкость находится на уровне $C_k = C_3$. Предпочтительная емкость $C_k \geq 10C_3$.

Необходимое значение емкости для конденсатора связи больше этого значения, и емкость может быть снижена для апериодической реакции испытательного тока [см. формулу (D.7) D.2.2.3.3.1].

Это не является теоретическим верхним пределом размера конденсатора связи. На практике он может быть ограничен жесткой реакцией источника напряжения, особенно при верхних частотах испытательного напряжения. Эта специфичная проблема описана в [29]. Некоторые практические значения приведены в таблице D.1.

**D.3 Примеры результатов испытаний**

Множество компонентов для низковольтного оборудования могут быть испытаны с применением высокочастотного испытательного напряжения. Большая часть данных является коммерческой информацией. Некоторые основные результаты публикуются открыто [30] и представлены в настоящем стандарте.

Как видно из рисунка D.9 [30], для оптронов может быть существенно снижено напряжение ЧП. Еще более важным является резкое снижение напряженности ЧП со снижением частоты напряжения, которое приводит к чрезвычайно высокому стрессовому воздействию на изоляцию.

Для импульсных трансформаторов важным влияющим фактором является частота напряжения. За счет увеличения частоты выше промышленной характеристики ЧП существенно снижаются. Как показано на рисунке D.10 [30], напряжение начала ЧП снижается. Интенсивность ЧП не особенно высока, но частота повторения импульсов ЧП возрастает пропорционально испытательной частоте, что приводит к увеличению потенциала деградации.

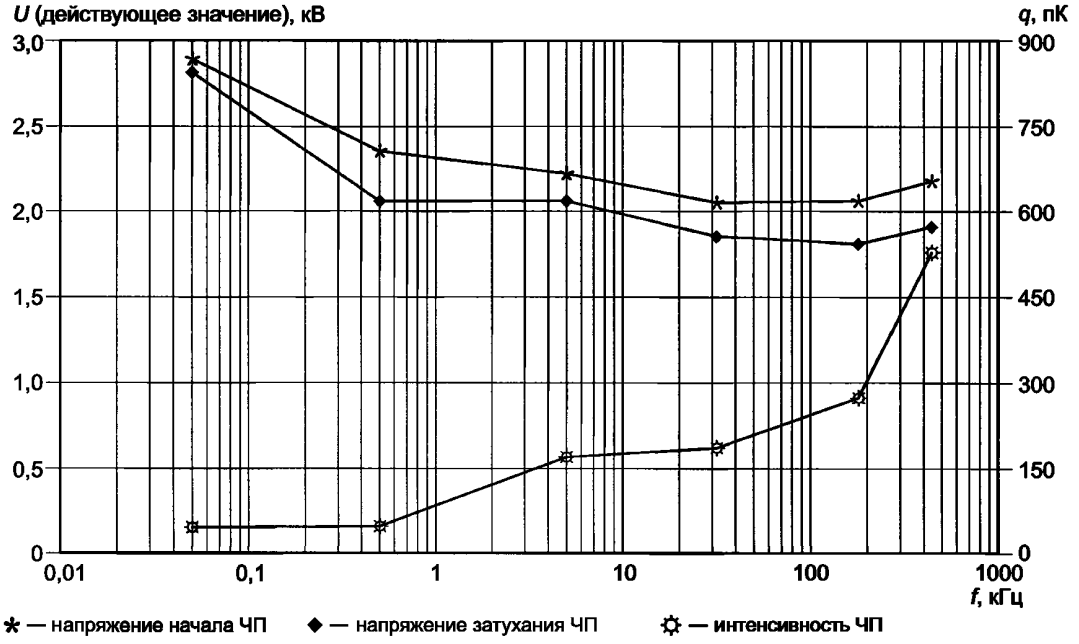



Рисунок D.9 — Испытание ЧП оптрона при высокочастотном напряжении [30]

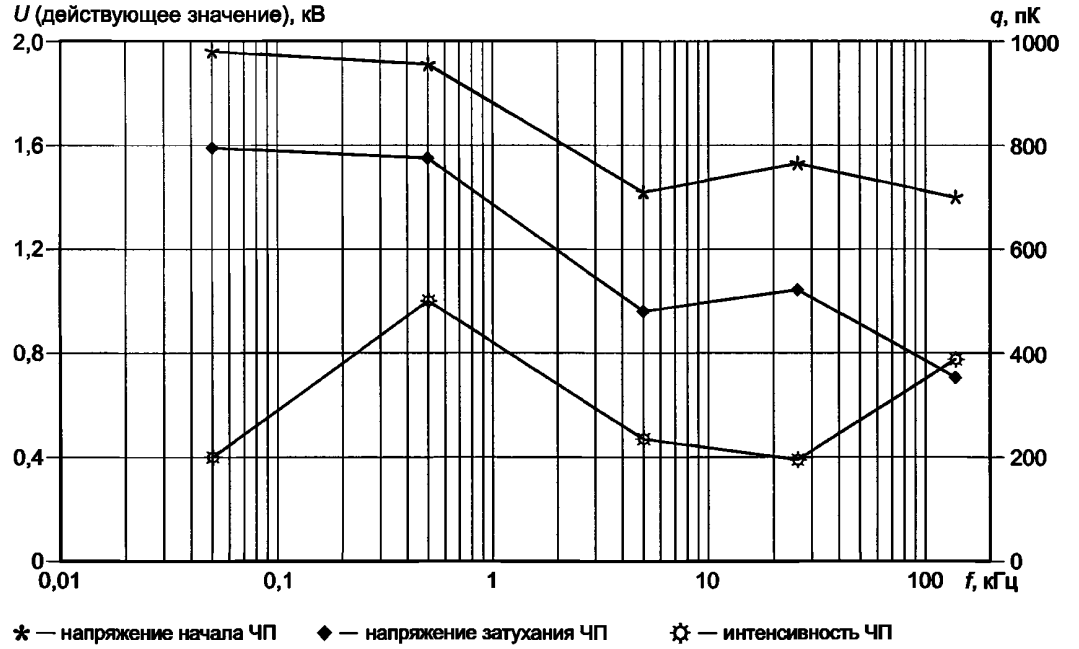
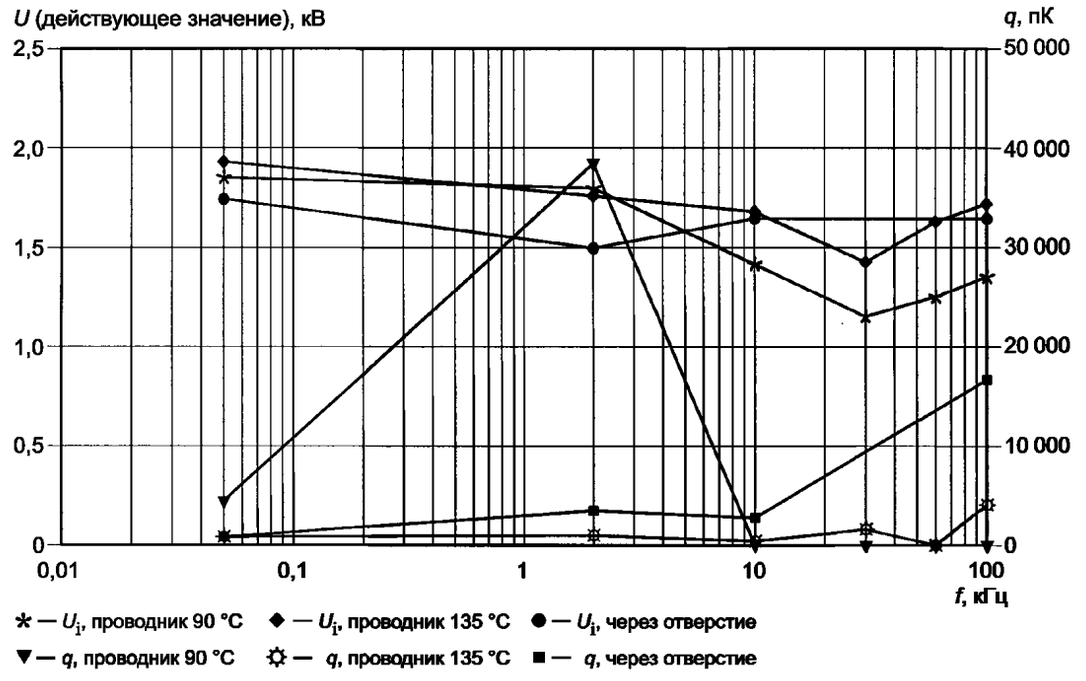



Рисунок D.10 — Испытание ЧП импульсных трансформаторов; влияние частоты напряжения [30]

Для покрытых печатных плат изоляционные характеристики не так сильно зависимы от частоты напряжения. Как видно из рисунка D.11, для проводников разных видов конфигураций начальное напряжение ЧП слегка снижается с ростом частоты напряжения. Тем не менее при высокой интенсивности ЧП и высокой частоте напряжения можно ожидать только кратковременную устойчивость к ЧП. Следовательно, каждое испытание ЧП, которое обычно считается неразрушающим, может серьезно повредить испытуемый образец.

Некоторые выводы о жизненном цикле $t$ изолирующих пленок в случае ЧП при высокочастотном напряжении могут быть получены из рисунка D.12 [31]. Несмотря на то что напряжение только на 10 % выше начального напряжения ЧП, жизненный цикл может быть в пределах 1 мин или менее, так что данный образец не может выдержать даже минутного воздействия высоковольтного высокочастотного испытательного напряжения.




$U_i$ — начальное напряжение ЧП; $d$ — воздушный зазор

Рисунок D.11 — Испытание ЧП покрытых печатных плат; $U_i$, $d$ = 0,2 мм [30]

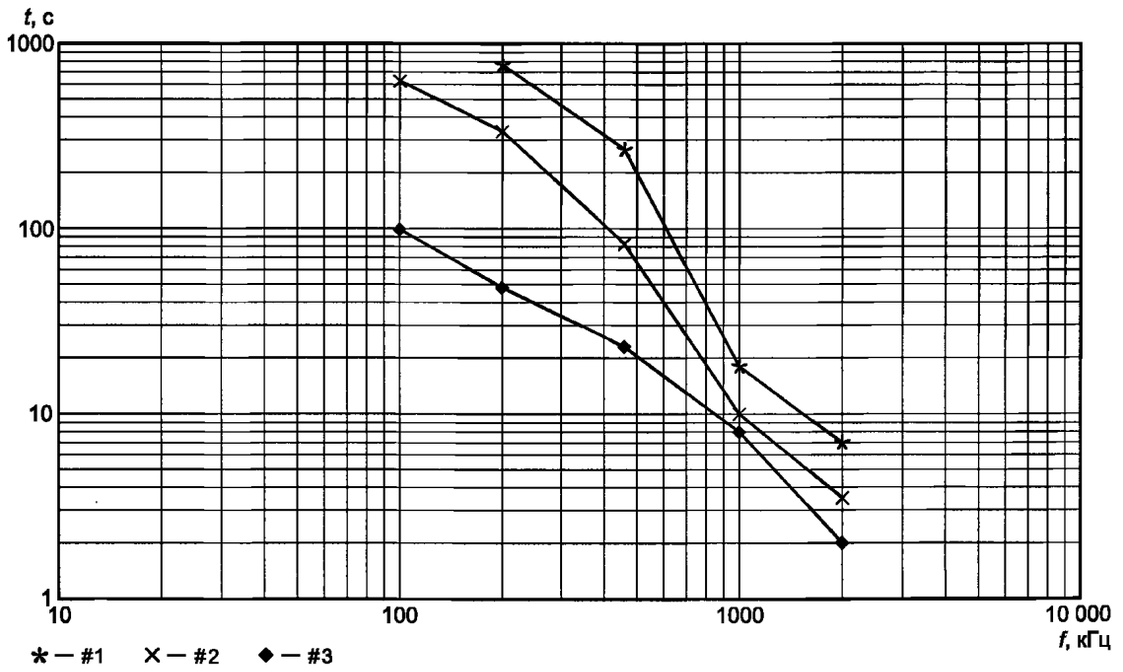



Рисунок D.12 — Жизненный цикл $t$ проводов, покрытых эмалью (витые пары); стрессовое воздействие напряжением на 10 % выше начального напряжения ЧП [31]

## Приложение Е
## (справочное)

# Стрессовые воздействия на изоляцию высокочастотными несинусоидальными напряжениями

### Е.1 Цель настоящего приложения

В настоящем стандарте рассматриваются воздействие синусоидальных высокочастотных напряжений, испытание изоляции и определение размеров, исходя из этого воздействия. Во многих практических случаях реальные воздействующие напряжения далеко не всегда синусоидальны. Периодические пульсации с большим искажением формы синусоиды могут встречаться во многих электроустановках.

В этом случае необходимы частотный анализ формы волны импульса и идентификация частот основных составляющих синусоид.

Следующий анализ не учитывает эффект влияния формы волны напряжения на распределение напряжения на изоляции обмоток.

### Е.2 Частотный анализ

На рисунках Е.1—Е.8 представлены частотные анализы периодических импульсов напряжения. На рисунках Е.1 и Е.2 симметричная прямоугольная форма волны анализируется только для целей сравнения. На рисунках Е.3 и Е.4 анализируется более практический случай, взятый из IEC 60664-1, изменение 2. Эта форма волны также представлена на рисунке 4.

В обоих случаях в соответствии с рисунками Е.2 и Е.4 в спектре доминирует основная частота. Соотношение между основной и более важной третьей гармоникой не сильно меняется при перерегулировании.

Это также верно, если в соответствии с рисунками Е.5 и Е.6 искажение формы волны аналогичным перерегулированием предполагается, как на рисунке Е.3. В этом случае третья гармоника даже снижается, но из-за девятой и одиннадцатой гармоник частота 1 МГц существенно повышается.

Даже если выброс значительно увеличивается, как видно на рисунках 7 и 8, результат один и тот же. Следует отметить, что этот пример на практике редко встречается.

В спектре частот доминирует основная частота. Соотношение между основной частотой и третьей гармоникой не сильно меняется при перерегулировании. Поэтому представляется возможным проектирование и испытание твердой изоляции проводить при основной (доминирующей) частоте импульса напряжения. В дополнение пиковое значение несинусоидального напряжения рассматривается в связи с настройкой амплитуды основной волны этим пиковым значением.

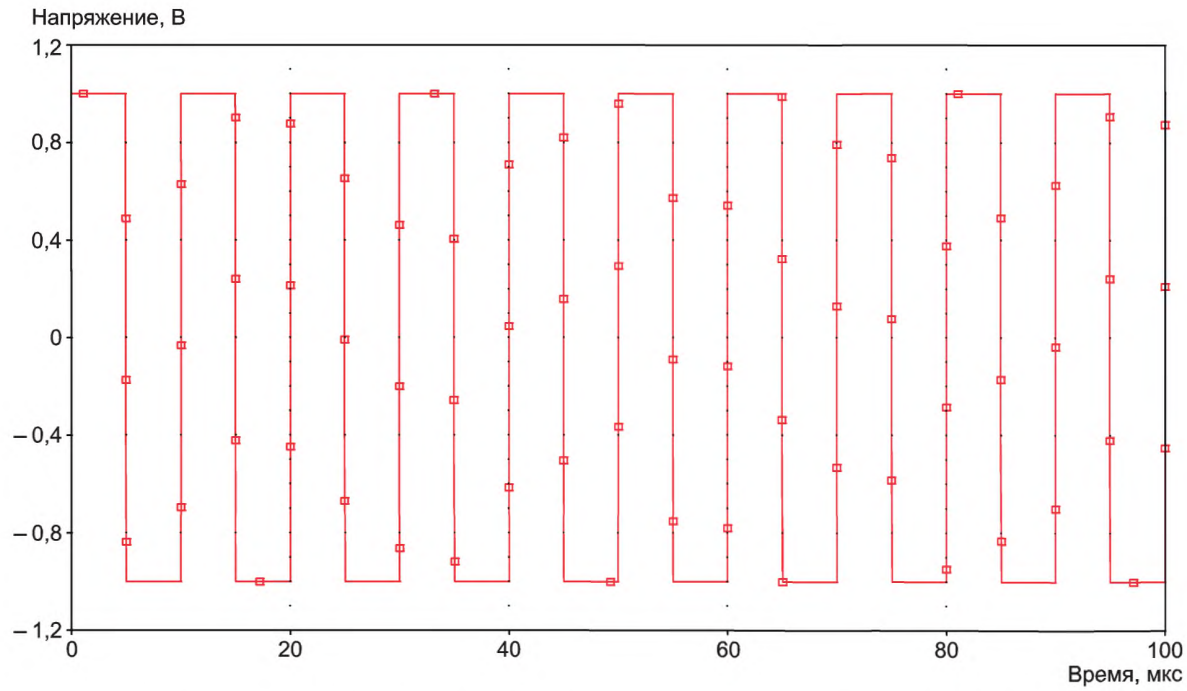



Рисунок Е.1 — Периодические импульсы напряжения, прямоугольная форма волны

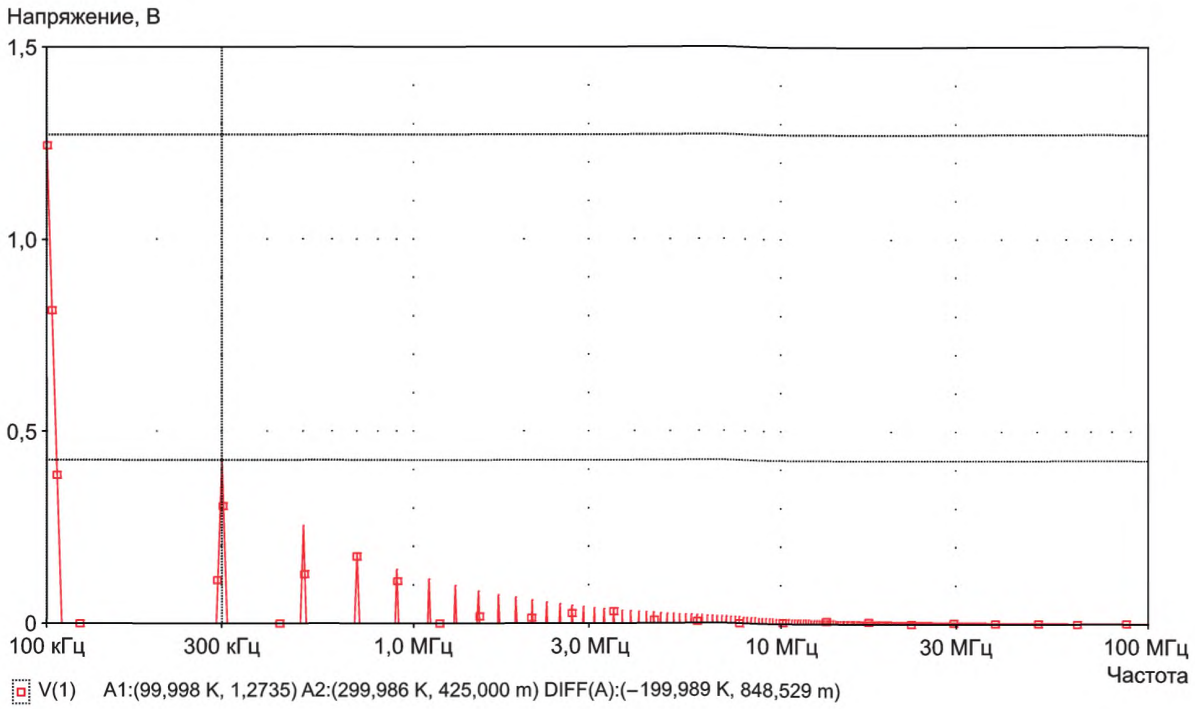



Рисунок Е.2 — Периодические импульсы напряжения, прямоугольная форма волны, анализ спектра частот

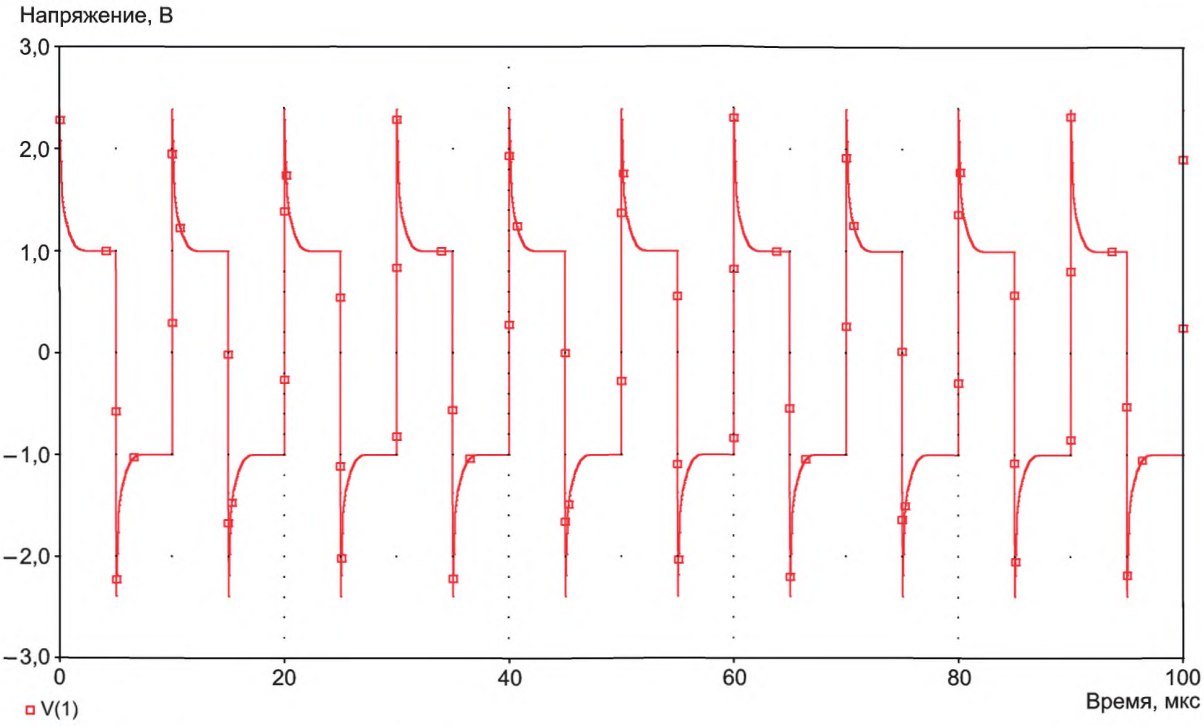



Рисунок Е.3 — Периодические импульсы напряжения, прямоугольная форма волны с всплесками (см. рисунок 4)

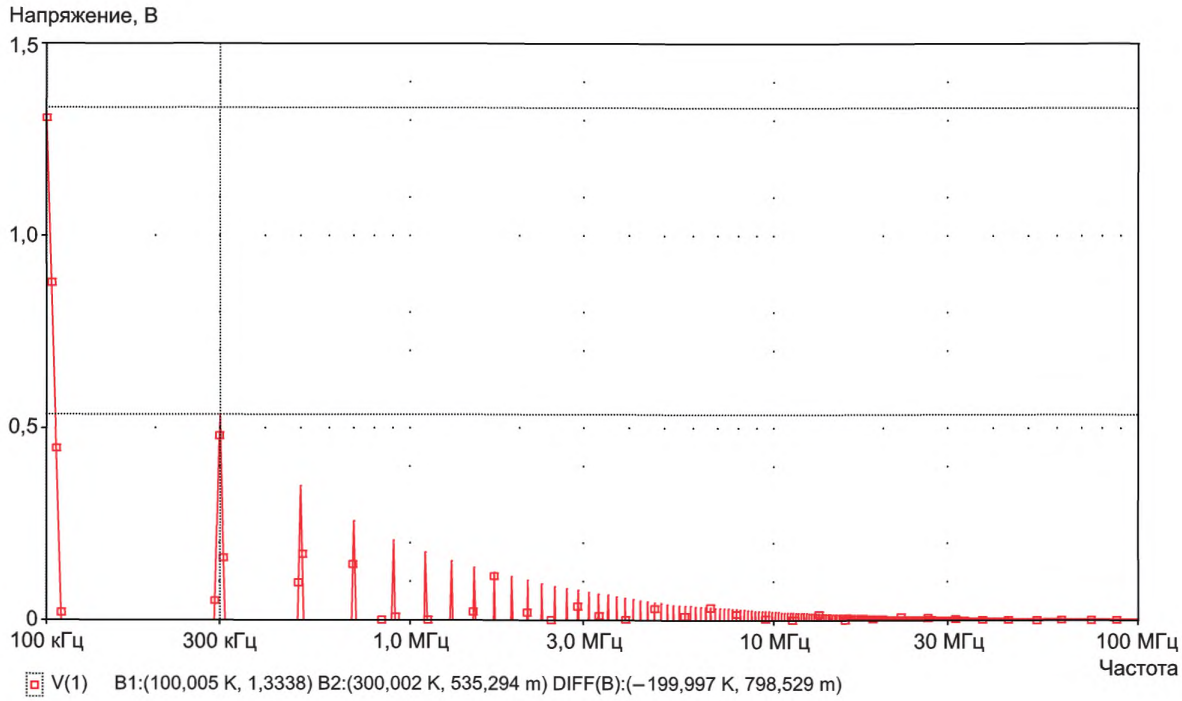



Рисунок Е.4 — Периодические импульсы напряжения, прямоугольная форма волны с всплесками, анализ спектра частот

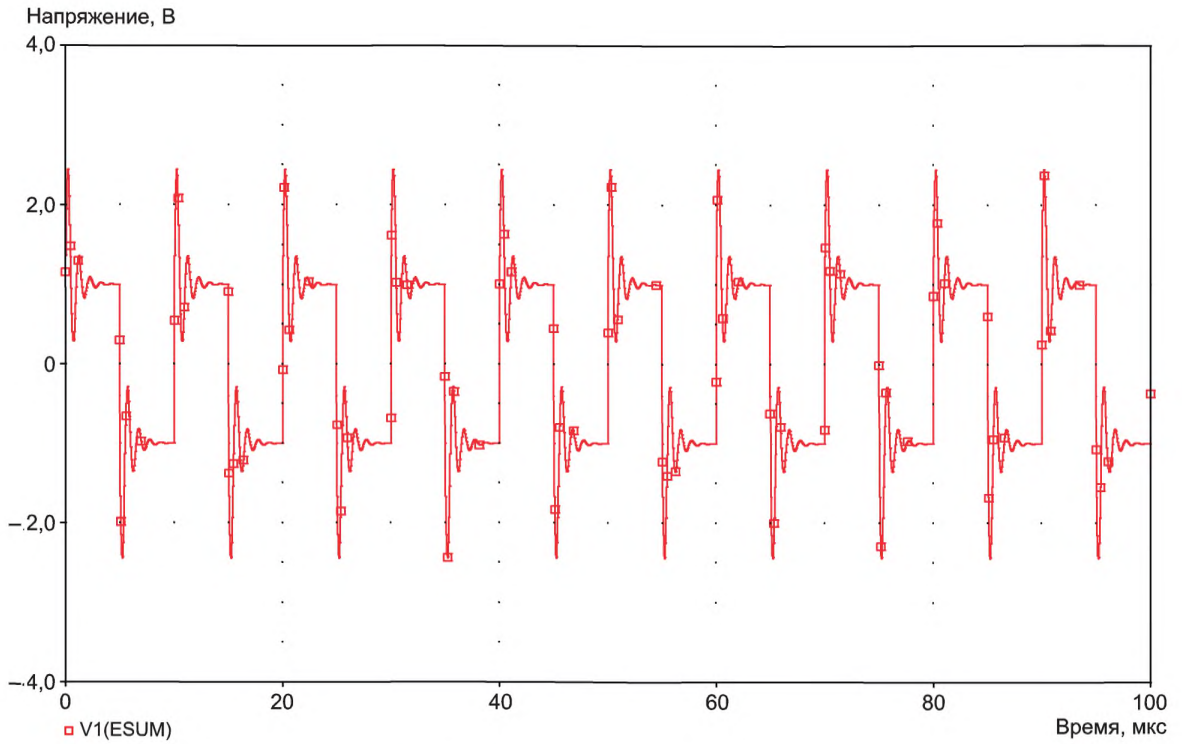



Рисунок Е.5 — Периодические импульсы напряжения, прямоугольная форма волны с всплесками (частота 1 МГц)

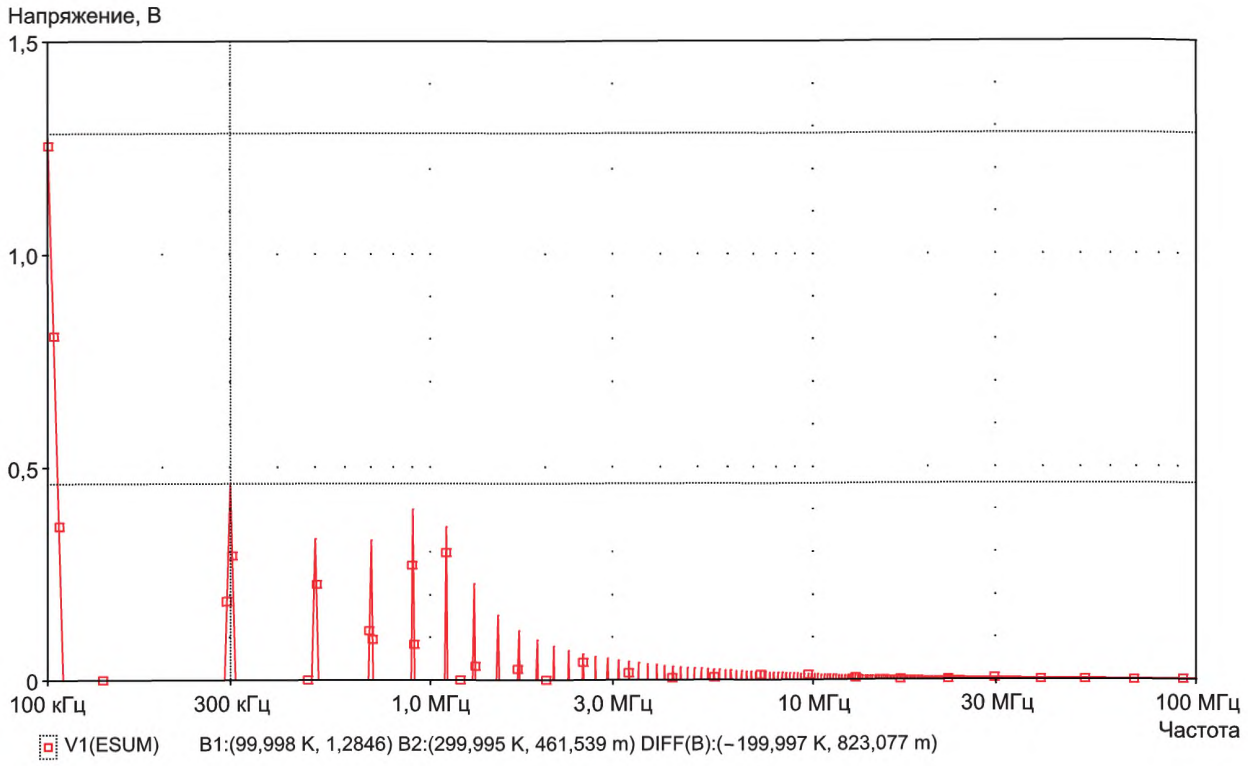



Рисунок Е.6 — Периодические импульсы напряжения, прямоугольная форма волны с всплесками (частота 1 МГц), анализ спектра частот

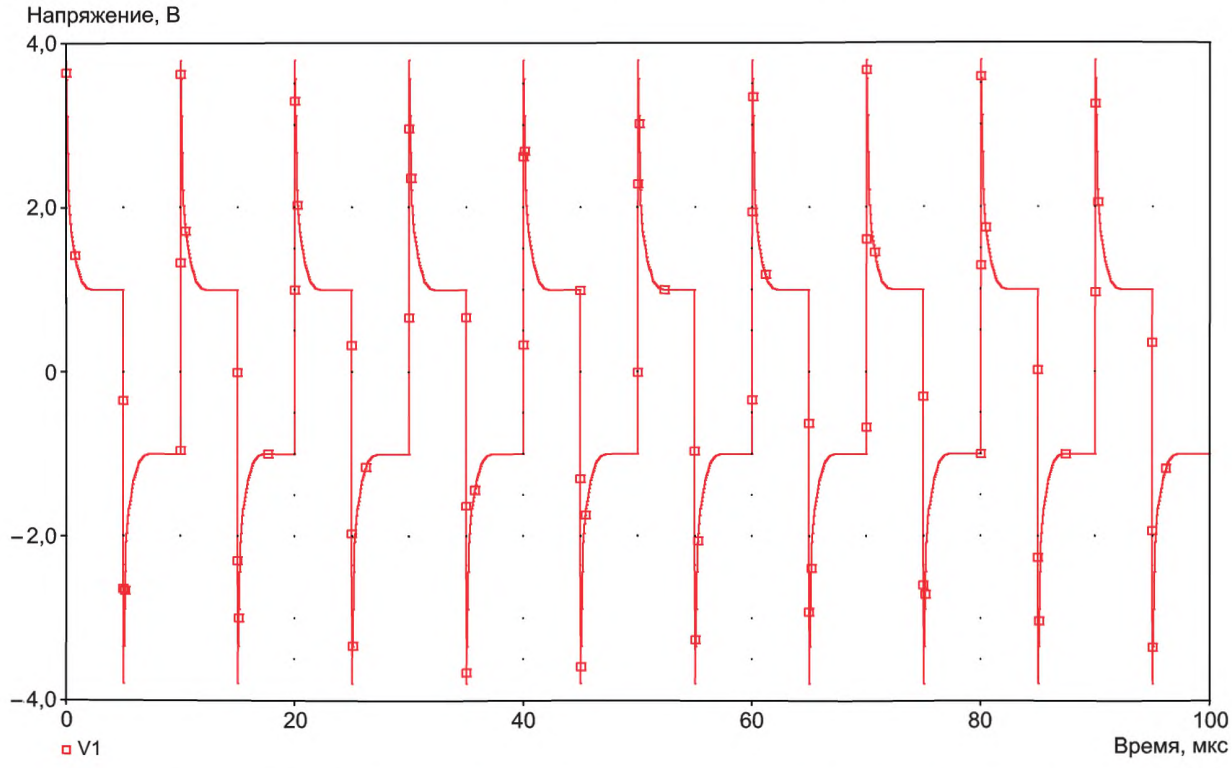



Рисунок Е.7 — Периодические импульсы напряжения, прямоугольная форма волны со значительными всплесками

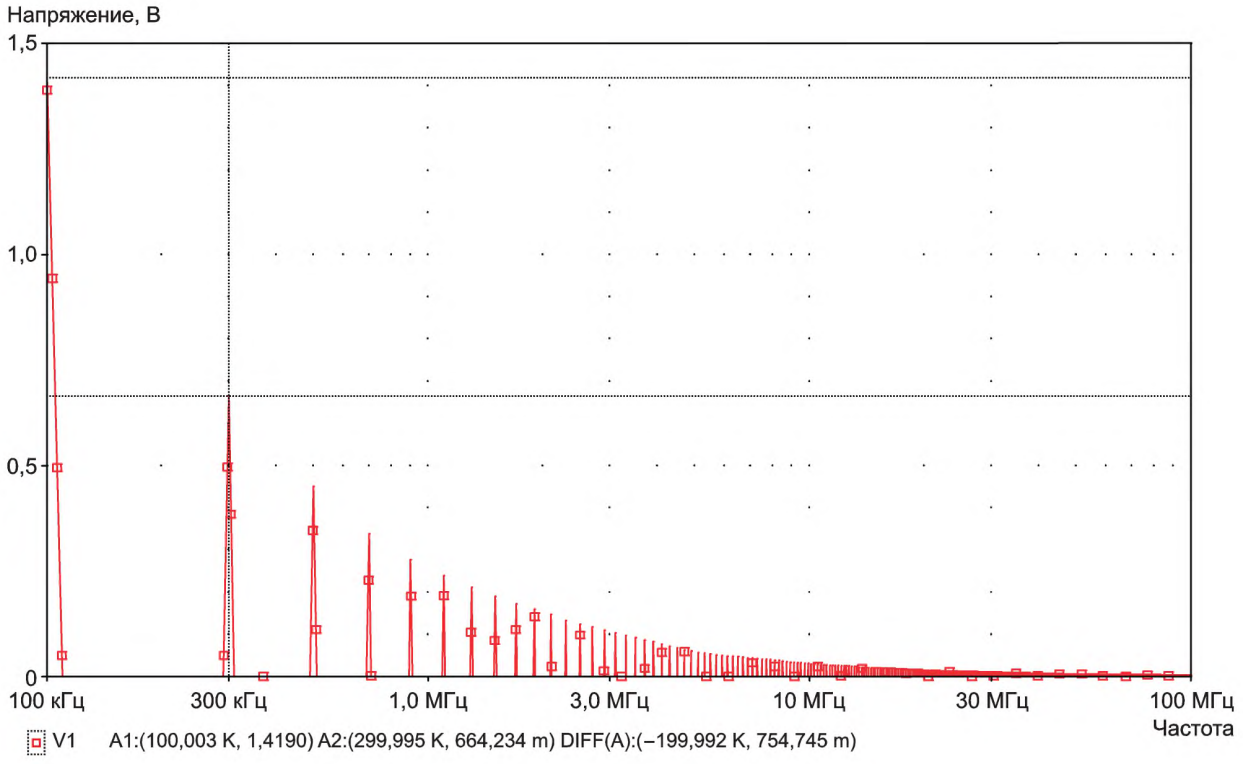


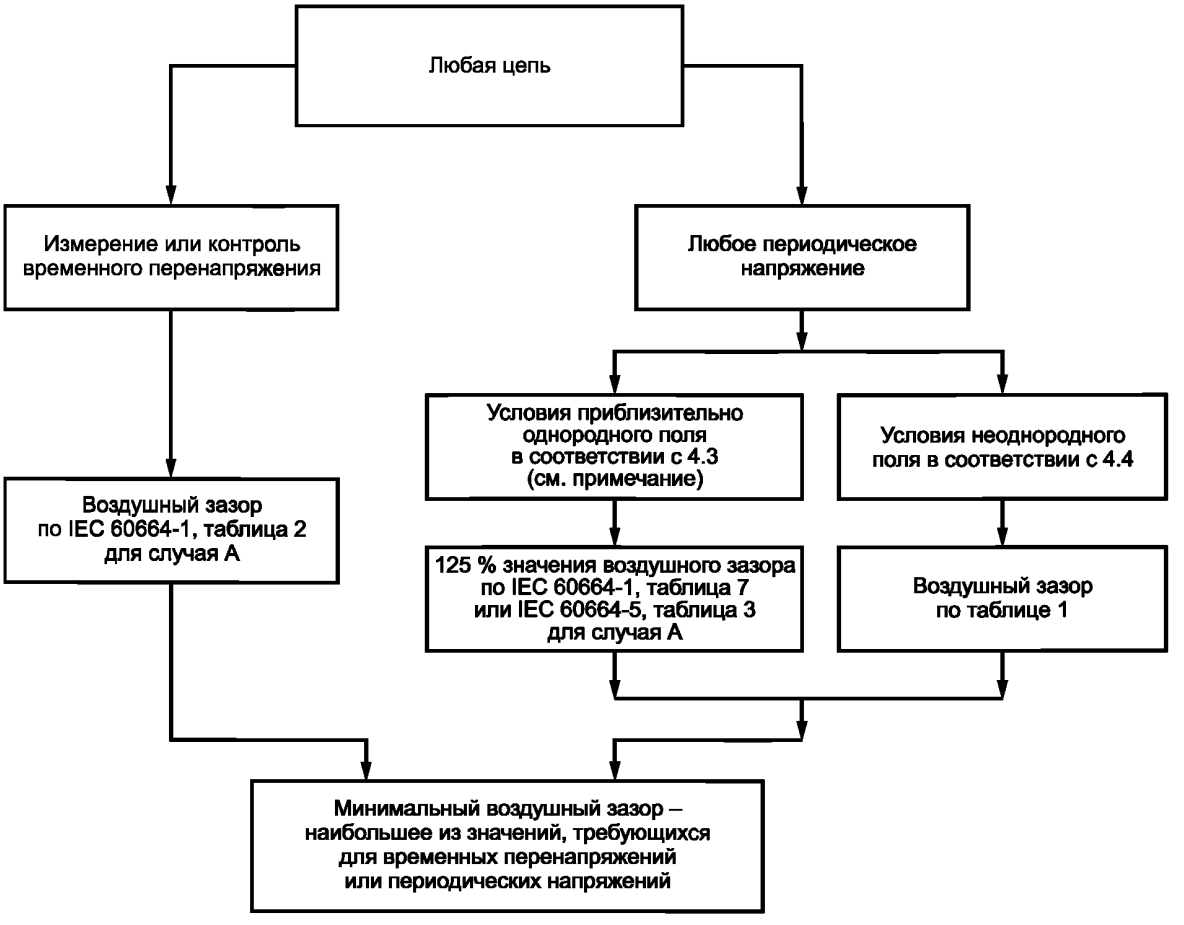

Рисунок Е.8 — Периодические импульсы напряжения, прямоугольная форма волны со значительными всплесками, анализ спектра частот

**Приложение F**
**(справочное)**

## Диаграммы определения размеров

Следующие диаграммы (см. рисунки F.1 и F.2) демонстрируют зависимости между влияющими факторами определения размеров воздушных зазоров и расстояний утечки для координации изоляции. Диаграммы выделяют основные факторы и не предназначены для подмены полного обзора соответствующих разделов стандарта. В частности, они не предназначены для рассмотрения более точных размеров воздушных зазоров в ситуациях однородного поля (значения случая B) для частот между $f_{crit}$ и $f_{min}$ и определения размеров твердой изоляции в порядке исключения испытаний высокочастотными напряжениями.

Процедуры определения размеров воздушных зазоров и расстояний утечки независимы. Следовательно, там, где воздушные зазоры и расстояния утечки назначаются над одной и той же поверхностью изоляции, должно быть принято наибольшее из их значений.




Примечание — Для частот, превышающих 30 МГц, приблизительно однородные поля считаются существующими, когда радиусы окружностей проводящих частей равны или превышают 20 % значений воздушных зазоров. Необходимые радиусы окружностей могут быть определены только в конце процедуры определения размеров.

Рисунок F.1 — Диаграмма определения воздушных зазоров

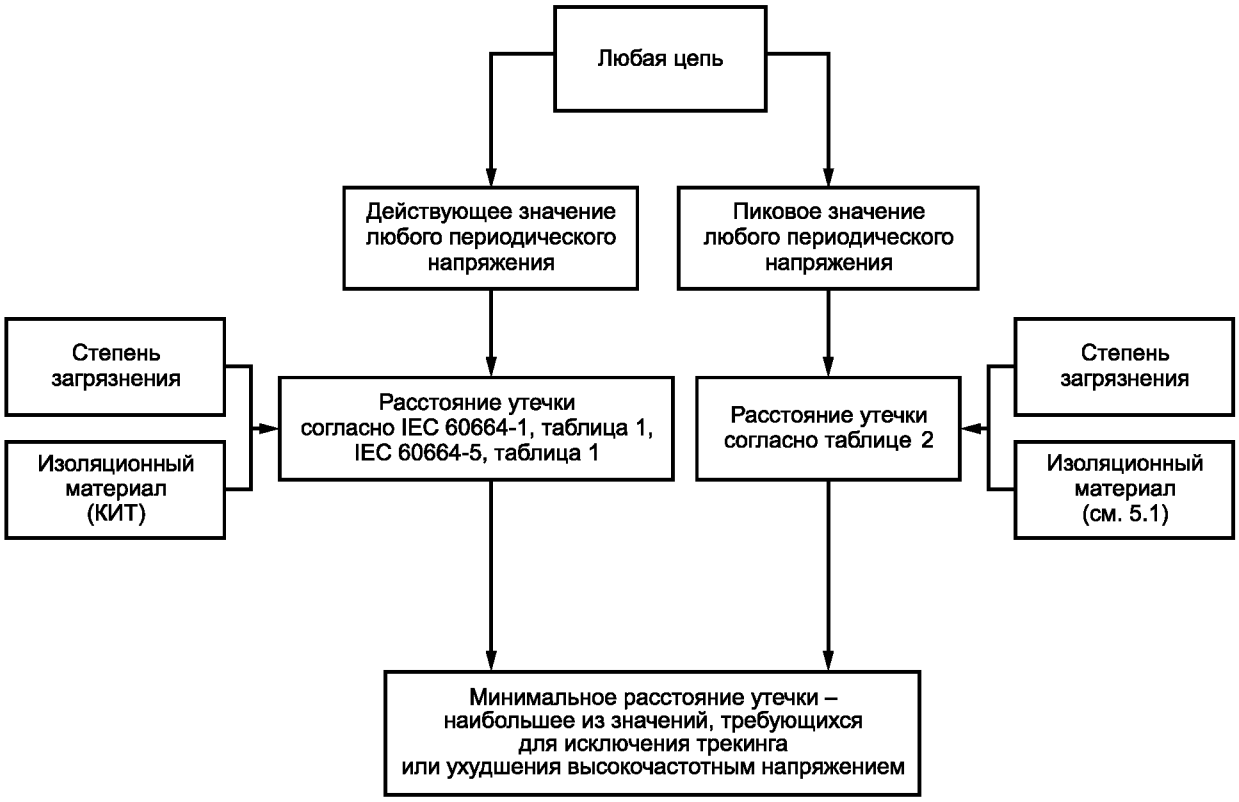



Рисунок F.2 — Диаграмма определения расстояний утечки

**Приложение ДА**
**(справочное)**

## Сведения о соответствии ссылочных международных стандартов межгосударственным стандартам

Таблица ДА.1

| Обозначение ссылочного международного стандарта | Степень соответствия | Обозначение и наименование соответствующего межгосударственного стандарта |
|---|---|---|
| IEC 60112:2003 | — | * |
| IEC 60664-1:1992 | — | * |
| IEC 60664-5 | IDT | ГОСТ IEC 60664-5—2013 «Координация изоляции для оборудования в низковольтных системах. Часть 5. Комплексный метод определения зазоров и путей утечки, равных или менее 2 мм» |
| IEC Guide 104:1997 | — | * |

* Соответствующий межгосударственный стандарт отсутствует. До его принятия рекомендуется использовать перевод на русский язык данного международного стандарта.

Примечание — В настоящей таблице использовано следующее условное обозначение степени соответствия стандарта:

- IDT — идентичный стандарт.

## Библиография


[1] Ganger B. Electrical breakdown of gases (in German). Springer Verlag, Berlin/Gëttingen/Heidelberg, 1953, pp. 422—450

[2] Boeck W., Pfeiffer W. Conduction and Breakdown in Gases: in Vol. 4 of the «Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering» John Wiley, New York, 2000

[3] Müller F. Electrical breakdown or air at very high frequency (in German). Archiv für Elektrotechnik — Vol. 28 — pp. 341—348, 1934

[4] Lassen H. Frequency dependence of the breakdown voltage in air (in German) Archiv für Elektrotechnik. Vol. 25, pp. 322—332, 1931

[5] Plessow R. Requirements and possibilities of PD measuring techniques at high-trequency voltage, Application for clearances and creepage distances (in German), Dissertation, TU Darmstadt, 1997

[6] Paede M., Pfeiffer W. Investigation of the insulation characteristics of clearances and creepage distances for high-frequency voltage stress (in German) Final Report to the German Research Foundation, 1999

[7] ISO 7864:1993 Иглы инъекционные стерильные однократного применения

[8] Pfeiffer W., Plessow R., Kolev N., Darjanov P., Darjanova D. About the dimensioning of a needle plane electrode arrangement for comparative investigations of partial discharges in air Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference — 1997 — pp. 301—307

[9] Uhlemann F. Evaluation of new dimensioning criteria for creepage distances in low-voltage equipment» (in German) Dissertation, TH Darmstadt, 1990

[10] Roth A. High-voltage engineering, Springer Verlag, Wien, 1959

[11] Tanaka T. Internal partial discharge and material degradation IEEE Transactions on Electrical Insulation — Vol. 21(1986) — pp. 599—905

[12] Koch H., Pfeiffer W. Computer aided partial discharge testing of thin solid insulation systems ETEP — Vol. 2(1992) — pp. 51—57

[13] Simoni L. A general approach to the endurance of electrical insulation under temperature and voltage IEEE Transactions on Electrical Insulation — Vol. 16(1981) — pp. 277—289

[14] Pfeiffer W., Plessow R. Analysis of the insulation material degradation process in correlation to the temporal course of the partial discharge phenomena at high frequency voltage stress, 1997. Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Minneapolis, pp. 554—557

[15] Chapman J.J., Frisco L.J. Dielectric strength of solid insulation Electrical Manufacturing — Vol. 51(1954) — pp. 136—143

[16] Wichrnann A., Grünewald P. Lifetime evaluation of high-voltage insulation by acceleration with the frequency or the test voltage (in German) ETZ-A — Vol. 95(1974) — pp. 318—322

[17] Daniels F., Alberty R.A. Physical Chemistry, Wiley, New York

[18] Endicott H.S., Hatch B.D., Sohmer R.G. Application of the Eyring model to capacitor ageing data IEEE Transactions on Component Parts — Vol. 12(1965) — pp. 34—41

[19] Chapman J.J., Frisco L.J., Smith J.S. Dielectric failure of volume and surface types AIEE Trans. — Vol. 74 — pp. 349—354, 1955

[20] Suhr H. Evaluation of the influencing factors on the breakdown voltage of thin insulating films (in German) Dissertation, Technische Universitat Berlin, 1961

[21] Ikeda Y., Tanaka T. Frequency acceleration characteristics in internal discharge endurance tests by a glass-covered electrode system IEEE Trans. Electric. Insulation — Vol. 17 — pp. 64—69, 1982

[22] Scheuerer F. Investigation ol the insulation characteristics of solid insulation at high periodic voltage stress (in German) Dissertation, TH Darmstadt, 1993

[23] IEC 60270:2000 High-voltage test techniques. Partial discharge measurements (Методы испытаний высоким напряжением. Измерения частичных разрядов)

[24] Hund R., Pleiffer W., Reinhard H. and Scheuerer F. Partial discharge testing of components for low-voltage equipment at high frequencies Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1990, pp. 261—266

[25] IEC 60851-1:1996 Winding wires. Test methods. Part 1: General (Провода обмоточные. Методы испытаний. Часть 1. Общие положения)

[26] Morshuis P.H.F. Partial Discharge Mechanisms, Mechanisms Leading to Breakdown. Analyzed by Fast Electrical and Optical Measurements Dissertation, Delft University of Technology, 1993

[27] Brosche T. Extended partial discharge measuring techniques by inclusion of new impulse parameters (in German) Dissertation. TU Darmstadt, 1998

[28] Pfeiffer W. Simulation of measuring circuits — calculation of practical examples with PSPICE (in German) Springer Verlag; Berlin, Heidelberg, New York, 1994

[29] Pfeiffer W., Piessow R. The influence of the coupling capacitance and the frequency of the voltage stress with respect to a partial discharge Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1997, pp. 558—561

[30] Pfeiffer W. Dielectric testing of solid insulation with respect to insulation coordination of low-voltage equipment IEEE Electrical Insulation Magazine — Vol. 17(2001) — pp. 34—47

[31] Paede M., Pfeiffer W. About the influence of the frequency on the partial discharge characteristics of enamelled wires Eiectricai Insuiation Conference 1999, pp. 485—488

УДК 621.3.002.5.027.2:006.354 МКС 29.035.01 IDT

Ключевые слова: высокочастотное напряжение, пробой изоляции, частичный пробой

БЗ 9—2017/26

Редактор *Н.А. Аргунова*
Технический редактор *В.Н. Прусакова*
Корректор *Е.Р. Ароян*
Компьютерная верстка *Ю.В. Поповой*

Сдано в набор 13.11.2018. Подписано в печать 24.12.2018. Формат 60 × 84 1/8. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 6,05. Уч.-изд. л. 5,47.

Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

ИД «Юриспруденция», 115419, Москва, ул. Орджоникидзе, 11.
gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru

Создано в единичном исполнении ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ»
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