МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СОВЕТ ПО СТАНДАРТИЗАЦИИ, МЕТРОЛОГИИ И СЕРТИФИКАЦИИ
(МГС)

INTERSTATE COUNCIL FOR STANDARDIZATION, METROLOGY AND CERTIFICATION
(ISC)

МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ

ГОСТ IEC/TS 60034-18-41— 2014

МАШИНЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ВРАЩАЮЩИЕСЯ

Часть 18-41

Квалификационные и типовые испытания для систем электроизоляции типа I, используемых во вращающихся электрических машинах с питанием от преобразователей источника напряжения

(IEC/TS 60034-18-41:2006, IDT)

Издание официальное

Москва
Стандартинформ
2015

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

Цели, основные принципы и основной порядок проведения работ по межгосударственной стандартизации установлены ГОСТ 1.0—92 «Межгосударственная система стандартизации. Основные положения» и ГОСТ 1.2—2009 «Межгосударственная система стандартизации. Стандарты межгосударственные, правила и рекомендации по межгосударственной стандартизации. Правила разработки, принятия, применения, обновления и отмены»

Сведения о стандарте

1 ПОДГОТОВЛЕН Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего профессионального образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ») и Федеральным государственным унитарным предприятием «Всероссийский научно-исследовательский институт стандартизации и сертификации в машиностроении» (ВНИИНМАШ) на основе собственного аутентичного перевода на русский язык англоязычной версии международного стандарта, указанного в пункте 5

2 ВНЕСЕН Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт)

3 ПРИНЯТ Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 14 ноября 2014 г. № 72-П)

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
Азербайджан	AZ	Азстандарт
Беларусь	BY	Госстандарт Республики Беларусь
Киргизия	KG	Кыргызстандарт
Молдова	MD	Молдова-Стандарт
Россия	RU	Росстандарт
Узбекистан	UZ	Узстандарт

4 Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 25 мая 2015 г. № 413-ст межгосударственный стандарт ГОСТ IEC/TS 60034-18-41—2014 введен в действие в качестве национального стандарта Российской Федерации с 1 марта 2016 г.

5 Настоящий стандарт идентичен международному документу IEC/TS 60034-18-41:2006 Rotating electrical machines — Part 18-41: Qualification and type tests for Type I electrical insulation systems used in rotating electrical machines fed from voltage converters (Машины электрические вращающиеся. Часть 18-41. Квалификационные и типовые испытания для систем электроизоляции типа I, используемых во вращающихся электрических машинах с питанием от преобразователей источника напряжения).

Международный стандарт разработан техническим комитетом по стандартизации ТС 2 «Вращающиеся машины» Международной электротехнической комиссии (IEC).

Перевод с английского языка (en).

Официальные экземпляры международного стандарта, на основе которого подготовлен настоящий межгосударственный стандарт, и международных стандартов, на которые даны ссылки, имеются в Федеральном агентстве по техническому регулированию и метрологии.

Сведения о соответствии межгосударственных стандартов ссылочным международным стандартам приведены в дополнительном приложении ДА.

Степень соответствия — идентичная (IDT)

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

© Стандартинформ, 2015

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 . . . 1
3 Термины и определения . . . 2
4 Эффекты, возникающие при работе от преобразователя частоты . . . 3
5 Напряженность электрического поля в изоляционной системе обмоток машины . . . 7
5.1 Общие положения . . . 7
5.2 Напряженность поля в межфазной изоляции . . . 8
5.3 Напряженность поля в изоляции между обмоткой и заземленными частями машины . . . 8
5.4 Напряженность поля в проводниковой и витковой изоляции . . . 8
5.5 Механизм старения изоляции . . . 9
6 Типы изоляции электрических машин . . . 9
7 Категории напряжений для изоляционных систем типа I при питании от преобразователя . . . 9
8 Квалификационные и типовые испытания для изоляционных систем типа I . . . 10
8.1 Общие положения . . . 10
8.2 Квалификационные испытания . . . 11
8.3 Типовые испытания . . . 11
9 Испытательное оборудование . . . 11
9.1 Измерение частичных разрядов на частоте сети . . . 11
9.2 Измерение частичных разрядов при импульсном напряжении . . . 11
9.3 Генераторы импульсных напряжений . . . 11
9.4 Чувствительность . . . 12
9.5 Измерение ННЧР и ННПЧР . . . 12
10 Квалификационные испытания изоляционных систем типа I . . . 12
10.1 Общие положения . . . 12
10.2 Допущения . . . 12
10.3 Подготовка испытуемых образцов . . . 13
10.4 Методы квалификационных испытаний . . . 14
10.5 Критерии прохождения квалификационных испытаний . . . 15
11 Типовые испытания изоляционных систем типа I . . . 15
11.1 Общие положения . . . 15
11.2 Методика проведения испытаний . . . 15
11.3 Критерий прохождения типовых испытаний . . . 16
12 Анализ результатов и протокол . . . 16
Приложение А (справочное) Напряжения на зажимах машины, питающейся от преобразователя . . . 17
Приложение В (справочное) Расчет испытательных напряжений для изоляционных систем типа I . . . 20
Приложение ДА (справочное) Сведения о соответствии межгосударственных стандартов ссылочным международным стандартам . . . 24
Библиография . . . 25

М Е Ж Г О С У Д А Р С Т В Е Н Н Ы Й С Т А Н Д А Р Т

МАШИНЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ВРАЩАЮЩИЕСЯ

Часть 18-41

Квалификационные и типовые испытания для систем электроизоляции типа I, используемых во вращающихся электрических машинах с питанием от преобразователей источника напряжения

Rotating electrical machines. Part 18-41. Qualification and type tests for Type I electrical insulation systems used in rotating electrical machines fed from voltage converters

Дата введения — 2016—03—01

1 Область применения

Настоящий стандарт определяет критерии для оценки изоляционных систем обмоток статора (ротора), которые подвержены в электрических приводах воздействию ШИМ. Этот технический регламент применим к статорным (роторным) обмоткам 1-фазных или многофазных электрических машин переменного тока, имеющим изоляционную систему, предназначенную для работы от преобразователя.

Стандарт описывает квалификационные и типовые испытания на представительных образцах или на машине в целом, которые должны подтверждать их пригодность для работы с преобразователями напряжения.

Настоящий стандарт не распространяется на:

- вращающиеся электрические машины, использующие преобразователь только для пуска,
- вращающиеся электрические машины с номинальным среднеквадратичным напряжением ≤ 300 В,
- электрооборудование и системы транспорта.

2 Нормативные ссылки

Для применения настоящего стандарта необходимы следующие ссылочные документы. Для датированных ссылок применяют только указанное издание ссылочного документа, для недатированных ссылок применяют последнее издание ссылочного документа (включая все его изменения).

IEC 60034-18-1:2010 Rotating electrical machines — Part 18-1: Functional evaluation of insulation systems — General guidelines (Машины электрические вращающиеся. Часть 18-1. Функциональная оценка систем изоляции. Общие руководящие указания)

IEC 60034-18-21:2012 Rotating electrical machines — Part 18-21: Functional evaluation of insulation systems — Test procedures for wire-wound windings — Thermal evaluation and classification (Машины электрические вращающиеся. Часть 18-21. Функциональная оценка систем изоляции. Методики испытаний обмоток из намотанной проволоки. Оценка тепловых характеристик и классификация)

IEC 60034-18-31:2012 Rotating electrical machines — Part 18-31: Functional evaluation of insulation systems — Test procedures for form-wound windings — Thermal evaluation and classification of insulation systems used in rotating machines (Машины электрические вращающиеся. Часть 18-31. Функциональная оценка систем изоляции. Методики испытаний шаблонных обмоток. Оценка тепловых характеристик и классификация изоляционных систем, используемых во вращательных машинах)

IEC/TS 60034-25:2007 Rotating electrical machines — Part 25: Guidance for the design and performance of a.c. motors specifically designed for converter supply (Машины электрические вращающиеся. Часть 25. Руководство по конструкции и эксплуатационным характеристикам двигателей переменного тока, специально предназначенным для электропитания через преобразователь)

Издание официальное

IEC 60172:1987 Test procedure for the determination of the temperature index of enamelled winding wires (Провода обмоточные эмалированные. Методы испытаний по определению температурного индекса)

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

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

IEC 61800-2:1998 Adjustable speed electrical power drive systems — Part 2: General requirements — Rating specifications for low voltage adjustable frequency a.c. power drive systems (Системы силовых электроприводов с регулируемой скоростью. Часть 2. Общие требования. Номинальные технические характеристики низковольтных систем силовых электроприводов переменного тока с регулируемой частотой)

IEC 61934 Electrical insulating materials and systems — Electrical measurement of partial discharges (PD) under short rise time and repetitive voltage impulses (Электроизоляционные материалы и системы. Электрическое измерение частичных разрядов кратковременно нарастающих и периодически повторяющихся импульсах напряжения)

3 Термины и определения

В настоящем стандарте применены следующие термины с соответствующими определениями:

3.1 **частичный разряд** [partial discharges (PD)]: Электрический разряд, который только частично перекрывает изоляцию между проводниками.

Примечание — Он может произойти внутри изоляции или вблизи проводника.

3.2 **начальное напряжение частичного разряда;** ННЧР [partial discharges inception voltage (PDIV)]: Минимальное напряжение, при котором в процессе испытаний возникают частичные разряды, когда напряжение, приложенное к объекту испытания, значительно возрастает от минимального уровня, при котором эти разряды не возникают.

Примечание — При синусоидальном приложенном напряжении ННЧР определяется как действующее значение напряжения. При импульсных напряжениях ННЧР определяется как межпиковое напряжение.

3.3 **напряжение затухания частичного разряда;** НЗЧР [partial discharges extinction voltage (PDEV)]: Напряжение, при котором частичные разряды регистрируются измерительной аппаратурой, когда напряжение, приложенное к объекту испытания значительно уменьшается от наибольшего значения, при котором наблюдаются эти разряды.

Примечание — При синусоидальном приложенном напряжении НЗЧР определяется как действующее значение напряжения. При импульсных напряжениях НЗЧР определяется как межпиковое напряжение.

3.4 **начальное напряжение повторяющихся частичных разрядов;** ННПЧР [repetitive partial discharges inception voltage (PDIV)]: Минимальное межпиковое напряжение, при котором частичные разряды происходят с периодичностью 1 или более на каждые два импульса напряжения, вычисленное как среднее за установленное время испытаний, в условиях, когда напряжение, приложенное к объекту испытаний, существенно увеличивается от нуля.

3.5 **униполярный импульс** (unipolar impulse): Импульс напряжения, полярность напряжения которого или положительная, или отрицательная.

Примечание — Термин «импульс» использован для описания переходного напряжения, приложенного к зажимам машины, и для описания сигнала о наличии частичного разряда.

3.6 **биполярный импульс** (bipolar impulse): Импульс напряжения, полярность которого изменяется от положительной к отрицательной или наоборот.

3.7 **частота повторяемости импульсов напряжения** (impulse voltage repetition rate), f: Величина, обратная времени между двумя последовательными импульсами одной полярности, положительными или отрицательными.

3.8 **время нарастания** (rise time), t_r: Время нарастания напряжения от 10 % до 90 % его конечного значения.

3.9 **время нарастания импульса** (impulse rise time): Время нарастания импульса от 0 % до 100 %.

Примечание — Пока не оговорено иное, это время равно 1,25 времени увеличения напряжения от 10 % до 90 %.

3.10 **скачок напряжения** (jump voltage), $U''_{pk/pk}$: Мгновенное изменение напряжения на зажимах двигателя при питании его от преобразователя.

3.11 **электроизоляционная система** (electrical insulation system): Изоляционная структура, содержащая один или более электроизоляционных материалов вместе с соответствующими проводящими частями, применяемыми в электротехническом устройстве.

[IEC 62068-1, определение 3.1]

3.12 **формета** (formette): Специальная испытательная модель, используемая для оценки электроизоляционной системы шаблонных обмоток.

3.13 **моторета** (motorette): Специальная испытательная модель, используемая для оценки электроизоляционной системы всыпных обмоток.

3.14 **электрическая напряженность** (electric stress): Напряженность электрического поля, В/мм.

3.15 **номинальное напряжение** (rated voltage): Величина, обычно определенная производителем для специфических рабочих условий машины.

3.16 **основная частота** (fundamental frequency): Частота в спектре, полученная с помощью преобразования Фурье периодической временной функции, с которой соотносятся все частоты спектра.

Примечание — Для целей настоящего стандарта под основной частотой напряжения на зажимах машины понимается частота, определяющая ее скорость вращения при питании от преобразователя.

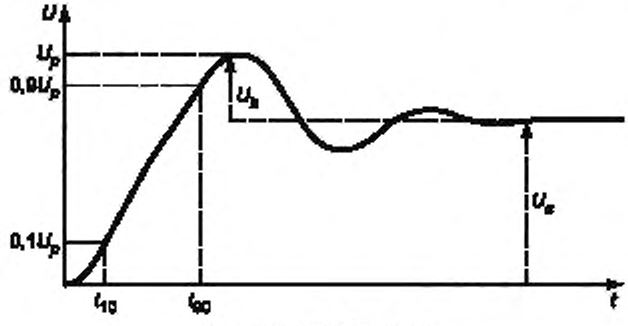
3.17 **длительность (или ширина) импульса** [impulse duration (or width)]: Время между первым и последним моментами времени, при которых мгновенные значения импульса достигают определенного промежуточного или порогового значения.

3.18 **пиковое (импульсное) напряжение** [peak (impulse) voltage], U_p: Максимальное численное значение напряжения, достигаемое униполярным импульсом (U_p на рисунке 1).

3.19 **установившееся значение импульсного напряжения** (steady state impulse voltage magnitude), U_a: Конечное значение импульса напряжения (см. рисунок 1).

3.20 **перенапряжение** (voltage overshoot), U_b: Величина пикового напряжения по отношению к установившемуся значению импульсного напряжения (см. рисунок 1).

3.21 **частота перерегулирования** (overshoot frequency): Величина, обратная четырехкратному времени нарастания импульса.



U — напряжение; t — время

Рисунок 1 — Параметры импульса напряжения

4 Эффекты, возникающие при работе от преобразователя частоты

Время нарастания выходного напряжения современных преобразователей t_r находится в пределах 50—2000 нс благодаря характеристикам полупроводниковых коммутаторов. Напряжение на зажимах машины, получающей питание от преобразователя, зависит от характеристик привода (см. IEC 61800-2), таких как:

a) рабочее линейное напряжение преобразователя,

b) архитектура и режим управления преобразователя,

c) наличие фильтров между двигателем и преобразователем,
d) длина кабеля между ними,
e) конструкция обмотки машины.

Чтобы применить настоящий стандарт к оценке и проверке изоляционной системы обмотки, необходимо установить требуемые параметры напряжения, появляющегося на зажимах машины (см. раздел 7).

Амплитуда и время нарастания напряжения на зажимах машины зависят от способа заземления, различных конструктивных особенностей кабеля, полного сопротивления двигателя и наличия любых фильтров, которые увеличивают время нарастания импульса. Общие диапазоны параметров напряжения преобразователя на зажимах двигателя приведены в таблице 1.

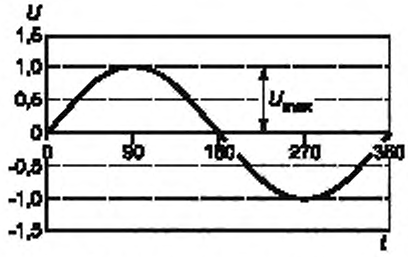
Таблица 1 — Общие диапазоны параметров напряжения на зажимах машин, получающих питание от преобразователя

Характеристика	Диапазон значений (зависит от мощности, характеристик и условий обслуживания привода)
Пиковое (импульсное) напряжение	0,5—15 кВ
Время нарастания	0,05—2,0 мкс
Частота повторения импульсов	0,1—20 кГц
Длительность (ширина) импульса	10 мкс—10 мс
Форма импульса	Прямоугольный
Полярность	Униполярный или биполярный
Основная частота	10 Гц — 1 кГц
Среднее время между импульсами	≥ 0,6 мкс

Далее используются сокращения, приведенные в таблице 2.

Таблица 2 — Определение сокращений

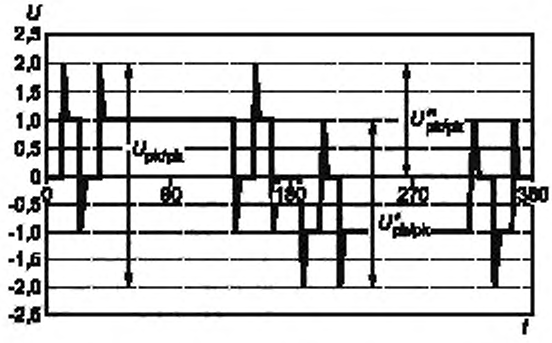
Сокращение	Параметр	Единица измерения	Способ питания
U_{line}	Линейное (номинальное) напряжение	В, действующее значение	Сеть
U_{phase}	Напряжение «фаза-нейтраль (земля)»	В, действующее значение	Сеть
$U_{max} = \sqrt{2}\, U_{phase}$	Максимальное напряжение «фаза-нейтраль (земля)»	В	Преобразователь
$U_{pk/pk}$	Межпиковое напряжение	В	Преобразователь
U_{dc}	Напряжение на шинах постоянного тока преобразователя	В	Преобразователь



U — напряжение, t — время

Рисунок 2 — Синусоидальная волна напряжения переменного тока

Система привода может генерировать повторяющиеся перенапряжения. На рисунке 2 показано напряжение, приложенное к зажимам обычной машины (по вертикали отложено относительное значение $U_{max} = U_{dc}/k$). На рисунке 3 показаны изменения межфазного напряжения на зажимах при питании от двухуровневого преобразователя (по вертикали отложено напряжение в долях U_{dc}). Этот рисунок показывает также разницу между межпиковым напряжением основной частоты, межпиковым напряжением на частоте импульсов и скачком напряжения (минимальное изменение напряжение в сигнале преобразователя).



$U_{pk/pk}$ — межпиковое напряжение основной частоты; $U'_{pk/pk}$ — межпиковое напряжением на частоте импульсов; $U''_{pk/pk}$ — скачок напряжения

Рисунок 3 — Напряжение на зажимах двигателя, питающегося от двухуровневого преобразователя

На рисунке 4 показано напряжение на зажимах двигателя при питании от трехуровнего преобразователя (обозначения те же, что на рисунке 3). На рисунке 5 приведены осциллограммы напряжений для типичного частотного привода.

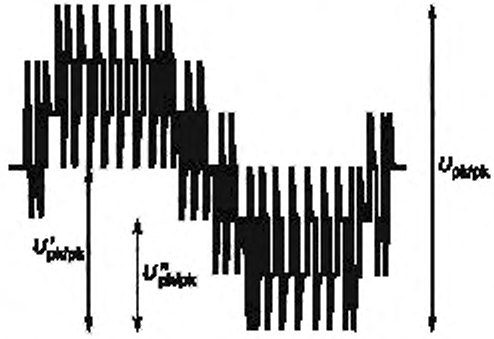
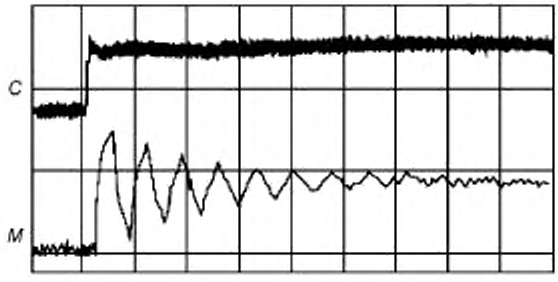


Рисунок 4 — Напряжение на зажимах двигателя при питании от трехуровнего преобразователя



C — напряжение преобразователя; M — напряжение двигателя

Рисунок 5 — Типичные осциллограммы напряжений «фаза-земля» на зажимах двигателя для случая быстро нарастающих импульсов (1мкс/деление)

В случае двухуровневых или других преобразователей напряжения в зависимости от времени нарастания импульса напряжения на выходе преобразователя, от длины кабеля и входного сопротивления двигателя на зажимах последнего генерируются перенапряжения (обычно до 2 U_{dc} для межфазных напряжений). Эти перенапряжения создаются отраженными волнами, возникающими между соединениями кабеля с зажимами машины или преобразователя из-за рассогласования их сопротивлений. Это явление полностью объясняется с помощью теории волновых процессов в длинной линии.

Для *n*-уровневого преобразователя линейное напряжение можно определить следующим образом:

- межпиковое напряжение основной частоты равно

$$U_{pk/pk} = 2(U_{dc} + U_b), \quad (1)$$

- межпиковое напряжение на частоте импульсов равно

$$U'_{pk/pk} = U_{dc}/(n - 1) + 2U_b.$$

Значение напряжения «фаза-земля» рассчитывается следующим образом:

- межпиковое напряжение основной частоты равно

$$U_{phase\ pk/pk} = 0{,}7 \cdot 2(U_{dc} + U_b), \quad (2)$$

- межпиковое напряжение на частоте импульсов равно

$$U'_{phase\ pk/pk} = 0{,}7[U_{dc}/(n - 1) + 2U_b].$$

Скачок напряжения задается как

$$U''_{pk/pk} = 0{,}7[U_{dc}/(n - 1) + U_b]. \quad (3)$$

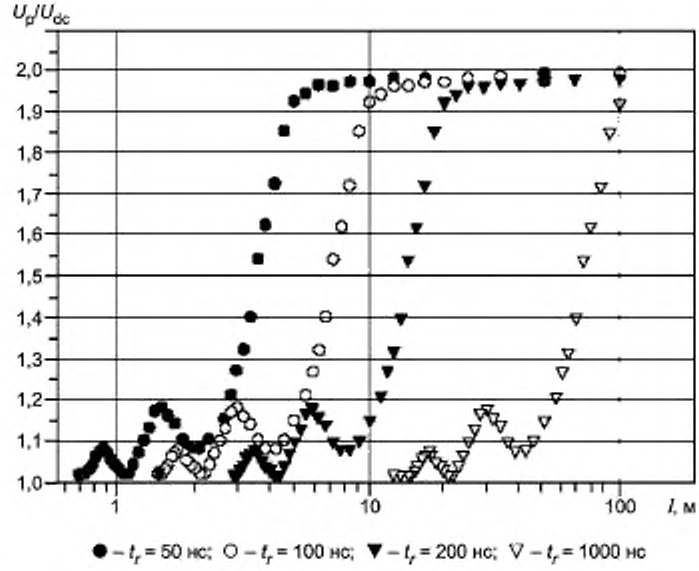
Долю скачка напряжения, приходящегося на первый виток, можно определить используя рисунок 9.

Значение U_b в этих формулах соответствует показанному на рисунке 1 для межфазного напряжения на зажимах машины. Значение напряжений «фаза-земля», полученное по этим формулам, на практике может быть больше или меньше в зависимости от системы заземления, от режима управления преобразователем и от других факторов. Коэффициент 0,7, введенный в некоторые из этих уравнений, учитывает возможность внезапного роста потенциала точки заземления с учетом потенциала нулевой точки цепи постоянного тока преобразователя. Теоретический рост потенциала через емкость определяется как 1/3, что дает в остатке около 0,7. Это соответствует экспериментальным значениям, полученным на представительных приводах.

Примеры увеличения напряжения на зажимах двигателя для различного времени нарастания напряжения и длины кабеля для двухуровневого преобразователя приведены на рисунке 6. В этом случае рост напряжения незначителен при времени нарастания импульса 1000 нс и длине кабеля до 15 м. Рост превышает 1,2 только при длине кабеля более 50 м.

Напряжения свыше $2U_{dc}$ может наблюдаться на зажимах машины в приводах с двойным переключением при питании от преобразователя, алгоритм управления которым не позволяет минимизировать время между последовательными импульсами. Двойное переключение наблюдается, например, когда одна фаза включается от минуса на плюс напряжения шин постоянного тока в тот же момент, когда другая фаза включается с плюса на минус. Это приводит к генерированию волны напряжения в $2U_{dc}$, которая движется к машине и может затем увеличиваться при отражении от зажимов машины. Если отсутствует управление минимальным временем между импульсами и если это время совпадает с постоянной времени кабеля, то на зажимах машины могут генерироваться напряжения свыше $2U_{dc}$. Эффект отражения может быть уменьшен или сведен к нулю при использовании фильтра, установленного в преобразователе или на машине, или в обеих точках сразу.

В случае замыкания на землю одной из фаз системы, у которой нулевая точка звезды не заземлена, производитель может разрешить дальнейшую работу в течение нескольких часов до отключения для ремонта. В этом случае напряжение на других фазах относительно земли будут возрастать.



U_p/U_{dc} — отношение пиковых напряжений на зажимах машины и преобразователя

Рисунок 6 — Увеличение напряжения на зажимах двигателя в функции длины кабеля l при различном времени нарастания импульса

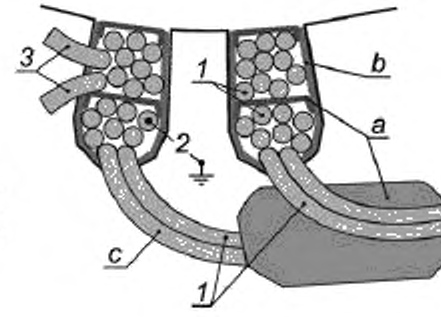
5 Напряженность электрического поля в изоляционной системе обмоток машины

5.1 Общие положения

Если обмотка подвергается воздействию импульсов напряжения со значительной амплитудой и малым временем нарастания, большие электрические напряженности могут появиться в следующих местах (см. рисунки 7, 8):

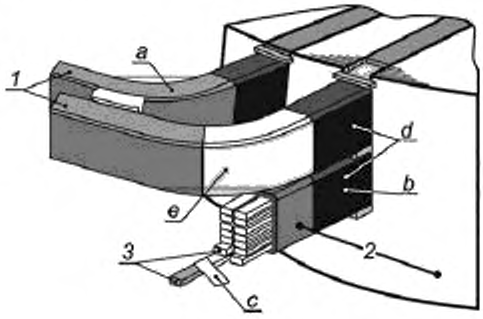
- между проводниками различных фаз,
- между проводником и заземленными элементами конструкции,
- между соседними проводниками, находящимися около линейного ввода обмотки.

Поскольку в отдельных частях изоляции возникают объемные и поверхностные разряды, электрическая напряженность определяется не только мгновенным значением напряжения, но также пиковыми напряжениями, приложенными ранее. Обычно, как показала практика, в определенных пределах, имеющих место в электроприводах, напряженность определяется межпиковым напряжением. Это связано с тем, что униполярные напряжения вызывают те же напряженности, что и биполярные при одинаковых межпиковых напряжениях.



a — изоляция фазы (межкатушечная изоляция); *b* — пазовая изоляция (от заземленных деталей); *c* — витковая изоляция; *1* — межфазная изоляция; *2* — изоляция между обмоткой и заземленными частями машины; *3* — межвитковая изоляция

Рисунок 7 — Пример всыпной обмотки



a — изоляция фазы (межкатушечная изоляция), *b* — пазовая изоляция (от заземленных деталей); *c* — витковая изоляция; *d* — защитный слой от короны в пазу; *e* — то же для лобовой части обмотки; *1* — межфазная изоляция; *2* — изоляция между обмоткой и заземленными частями машины, *3* — межвитковая изоляция

Рисунок 8 — Пример шаблонной обмотки

5.2 Напряженность поля в межфазной изоляции

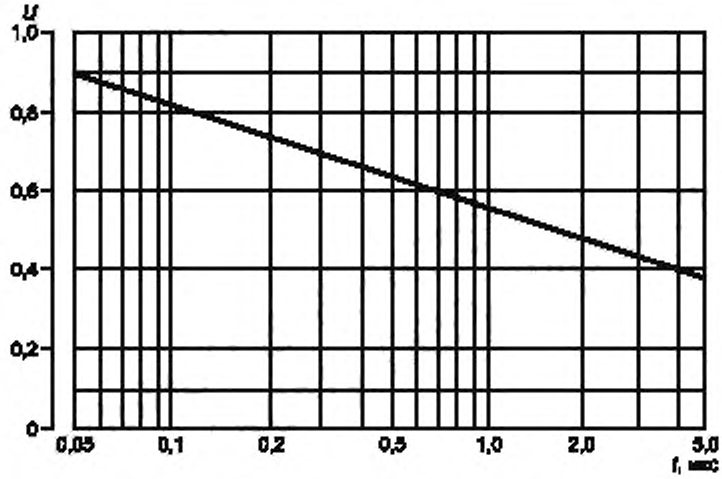
Максимальные напряженности в межфазной изоляции зависят от конструкции обмотки и характеристик приложенного напряжения.

5.3 Напряженность поля в изоляции между обмоткой и заземленными частями машины

Максимальные напряженности между фазой и землей зависят от конструкции обмотки и характеристик напряжения «фаза-земля».

5.4 Напряженность поля в проводниковой и витковой изоляции

Электрическая напряженность внутри изоляции обмотки определяется величиной скачка напряжения «фаза-земля» и временем нарастания импульса этого напряжения на зажимах машины. Для всыпных обмоток распределение переходного напряжения зависит от местоположения индивидуальных витков в пазах. Импульсы с малым временем нарастания приводят к тому, что наибольшие напряжения приходятся на первую катушку или катушки (в зависимости от типа обмотки) каждой фазы обмотки. На практике первый и последний виток могут быть расположены рядом, и межвитковое напряжение может оказаться почти равным напряжению катушки. На рисунке 9 показан худший случай распределения напряжения вдоль первой катушки в зависимости от времени нарастания импульса напряжения. Напряжение на рисунке 9 приведено в долях от скачка напряжения «фаза-земля». Эти результаты получены путем обработки данных, приведенных в [1], [2].



U = 1 соответствует пиковому скачку напряжения «фаза-земля» на зажимах машины

Рисунок 9 — Худший случай распределения напряжений в межвитковой изоляции разнообразных всыпных обмоток статора в функции времени нарастания импульса

5.5 Механизм старения изоляции

При низких напряжениях питания применяются проводники с тонкой изоляцией для всыпных или шаблонных обмоток, а вокруг проводников часто присутствует воздух. Кроме того у всыпной обмотки первый и последний витки одной или нескольких катушек могут располагаться рядом друг с другом. При достаточном напряжении между витками или между витком и заземленным элементом машины, или между витком и другой фазой воздушный промежуток может пробиться (произойдет искровой разряд). Поскольку в целом изоляция остается неповрежденной, это явление называется частичным разрядом (ЧР). Электроны и ионы, образовавшиеся в результате ЧР, будут воздействовать на сам проводник и его изоляцию.

Во всыпных обмотках изоляция проводника представляет тонкую органическую пленку. При воздействии ЧР эта пленка подвергается эрозии, что приводит к повреждению изоляции и короткому замыканию в катушке. При работе машины внешне ЧР проявляются в виде вмятин в изоляции и белого порошкообразного налета. В высоковольтных обмотках изоляция также может быть подвержена ЧР, но конструктор может применить изоляционные материалы, которые противостоят разрушению изоляции.

Другим фактором, который может повлиять на срок службы изоляции, является ее нагрев из-за повышенных диэлектрических потерь, вызванных высокими частотами, связанными с формой напряжения преобразователя. Как частота повторения импульсов, так время его нарастания, приводят к дополнительному нагреву из-за роста диэлектрических потерь в изоляционных материалах. Наиболее опасными с этой точки зрения являются пазовая и межслойная изоляция.

6 Типы изоляции электрических машин

Типы изоляционных систем определены стандартом IEC 60034-18-41 и IEC 60034-18-42. Для изоляционной системы типа I в течение срока службы не ожидается воздействия ЧР (см. рисунок 8). Для изоляционной системы типа II желательно так выбирать материалы, чтобы она смогла в течение срока службы противостоять воздействию ЧР (см. рисунок 9). Машины с номинальным действующим напряжением не выше 700 В могут иметь изоляцию типа I или II. При напряжениях свыше 700 В обычно применяют изоляцию типа II. Производители обычно назначают номинальное напряжение, исходя из частоты сети, что предполагает частоту 50 или 60 Гц при синусоидальной форме напряжения. В случае питания машины от преобразователя обычное определение номинального напряжения неприменимо, хотя производители все еще могут назначать номинальное напряжение для частоты 50 или 60 Гц, записывая его на табличке машины. Номинал при работе от преобразователя должен определяться для изоляционной системы с использованием классификационных параметров, по которым проводятся испытания. Номинальное напряжение при частоте сети, которое устанавливает производитель, непригодно при питании машины от преобразователя. Классификация изоляции типа I определяет отсутствие ЧР при проведении испытаний, описанных в настоящем стандарте.

7 Категории напряжений для изоляционных систем типа I при питании от преобразователя

Разработчик электропривода должен установить для разработчика двигателя значение напряжения, которое может появиться на зажимах машины. Эти данные должны быть включены в закупочную спецификацию наряду с традиционными данными, такими как номинальное напряжение, класс нагревостойкости изоляции, влажность и др. Особо должны быть отмечены следующие предельные значения параметров напряжения на зажимах машины (частота повторения импульсов не считается критическим параметром для изоляционной системы типа I):

a) пиковое (импульсное) напряжение U_p, которое может появиться на зажимах машины. Для машин со всыпными обмотками по умолчанию значениями U_p могут служить пиковые напряжения, приведенные в IEC 60034-25 на рисунке 18;

b) время нарастания импульса t_r.

В таблице 3 приведена степень влияния параметров, характеризующих форму напряжения инвертора, на элементы изоляционной системы I. Отметим, что критическое влияние на межвитковую изоляцию оказывает комбинация времени нарастания импульса и имеющий место скачок напряжения.

Таблица 3 — Влияние особенностей напряжения на зажимах машины на элементы изоляционной системы типа I

Элементы изоляции	Основная частота	Частота повторения импульсов	Межпиковое импульсное напряжение (основная частота)	Межпиковое импульсное напряжение (на частоте импульсов)	Скачок напряжения	Время нарастания импульса
Межвитковая изоляция	○	○	○	○	●	●
Пазовая изоляция	○	○	●	●	○	○
Межфазовая изоляция	○	○	●	●	○	○
Примечание — ○ — менее важный, ● — более важный						

Существует множество возможных комбинаций этих независимых факторов, которые могут устанавливать покупатели, но опыт показывает, что для изоляционной системы типа I существует их приемлемая оптимальная комбинация. Имеется в виду, что путем выбора частных комбинаций из этих факторов производитель будет способен создать конструкцию машины, удовлетворяющую требованиям рынка. Эти категории воздействия для изоляционных систем типа I приведены в таблице 4.

Таблица 4 — Категории воздействия на изоляционные системы типа I в случае использования двухуровневых преобразователей

Категория воздействия	Коэффициент перенапряжения U_p/U_{dc}	Время нарастания импульса t_r, мкс
A — незначительная	≤ 1,1	≥ 1
B — умеренная	≤ 1,5	≥ 0,3
C — жесткая	≤ 2,0	≥ 0,1
D — экстремальная	≤ 2,5	≥ 0,05

Коэффициент перенапряжений для незначительного воздействия относится к случаю, когда преобразователь соединен с двигателем непосредственно или через короткий кабель, как показано в примере в таблице А.1. Однако на практике теоретический уровень U_p/U_{dc} = 1,0 практически не встречается, хотя казалось бы при непосредственном подключении преобразователя к двигателю перенапряжений быть не должно. Для учета этих практических соображений значение перенапряжений для категории воздействия А увеличен на 10 % до значения 1,1. Уровень перенапряжений, равный 2, вытекает из условий, описанных в таблице А.1, при которых преобразователь соединен с двигателем через длинный кабель. Диапазон перенапряжений от 1,1 до 2,0 разбит на две части для практических целей. Предел перенапряжений, равный 2,5 применим для наиболее экстремальных условий, которые могут встретиться в эксплуатации.

Время нарастания импульса не зависит от коэффициента перенапряжения. Например, для некоторых изоляционных систем высокий коэффициент перенапряжений может сочетаться с умеренным временем нарастания импульса. Эти значения выбираются по данным, характеризующим возможности современных технологий. Экстремальная категория ожидается лишь в редких практических случаях. Квалификационные испытания для конкретной комбинации воздействующих факторов следует проводить при наиболее неблагоприятных их значениях.

8 Квалификационные и типовые испытания изоляционных систем типа I

8.1 Общие положения

Существуют два этапа испытаний электрической изоляции машин, получающих питание от преобразователей напряжения. Первый этап — проверка соответствия материалов, правил проектирования и технологии изготовления. Для изоляционных систем типа I это соответствие проверяется с использованием моторет или формет, которые подвергаются циклическим термическим испытаниям и диагностике,

включающей механические и высоковольтные испытания, испытания на повышенную влажность и другие, с целью проверки на отсутствие ЧР. Вторая ступень — специальные испытания изоляции (типовые испытания). Изоляционные системы типа I испытываются на готовых обмотках или на машине в сборе.

8.2 Квалификационные испытания

В настоящем стандарте квалификационные испытания служат для изучения способности изоляции противостоять различным внешним воздействиям. Для изоляционных систем типа I они основаны на измерении ННЧР до и после циклических тепловых и других испытаний, описанных в IEC 60034-18-21 и 60034-18-31, а также по влиянию приложенного напряжения по одной из категорий воздействия, описанной в разделе 7, умноженному на коэффициент безопасности, приведенный в В.2 приложения В. Для испытания в настоящем стандарте необходимо осуществить термическое старение изоляции при меньшей из трех температур, указанных в IEC 60034-18-21 и 60034-18-31.

8.3 Типовые испытания

Для изоляционных систем типа I измеряется ННЧР, чтобы убедиться в отсутствии ЧР, когда укомплектованная обмотка или машина в сборе подвергается воздействию напряжения, соответствующего выбранному уровню воздействия и повышенному коэффициенту безопасности, равному 1,3 (см. приложение С).

9 Испытательное оборудование

9.1 Измерение частичных разрядов на частоте сети

Когда приложенное к объекту испытаний напряжение имеет синусоидальную форму и частоту 50 или 60 Гц, для измерения начального напряжения и напряжения затухания ЧР используются обычные лабораторные приборы для измерения ЧР с использованием высоковольтного конденсатора связи или радиочастотного трансформатора тока. Состав испытательного оборудования, методы испытаний и калибровка представлены в IEC 60270.

Использование приложенного напряжения частотой 50 или 60 Гц вместе с методами измерения ЧР, описанными в IEC 60270, следует использовать для определения емкостных параметров отдельных катушек, формет и моторет. Основным результатом испытаний является действующее значение ННЧР «фаза-земля».

9.2 Измерение частичных разрядов при импульсном напряжении

Приборы для измерения ЧР на частоте 50 или 60 Гц, аналогичные описанным в IEC 60270, обычно нельзя использовать, если приложенное напряжение представляет импульсы с коротким временем нарастания. При времени нарастания импульса 100 нс, спектр гармонических составляющих может содержать частоты свыше 3 МГц. Это означает, что импульсы напряжения будут содержать составляющие, лежащие внутри полосы пропускания большинства датчиков, приведенных в IEC 60270.

Поэтому импульсы от ЧР будет трудно отличить от высокочастотных составляющих импульсов приложенного напряжения. Кроме того, импульсы напряжения могут иметь большую амплитуду, что приведет к повреждению датчика ЧР. Чтобы отличить ЧР от составляющих импульсов приложенного напряжения, необходим другой тип датчиков. Датчик должен уменьшать все частотные составляющие напряжения до уровня, меньшего высокочастотных составляющих, связанных с ЧР. Дисплей может быть стандартным осциллографом или амплитудным анализатором гармоник. Руководство по методам измерений и измерительному оборудованию приведено в IEC 61934. При измерении ЧР, вызванных импульсами с коротким временем нарастания, может потребоваться определенный опыт, чтобы отличить ЧР от составляющих импульсного напряжения.

Без такого опыта объект испытаний может быть классифицирован как объект, имеющий более низкое, чем в действительности ННЧР. Иными словами, может быть не зафиксировано различие между удаленным ЧР и ЧР датчика. Поэтому определение ЧР при таких испытаниях следует проводить с особой тщательностью.

9.3 Генераторы импульсных напряжений

Для получения импульсов в соответствующей категории воздействия эти генераторы должны иметь соответствующее ей время нарастания импульса. Кроме того генератор должен иметь на выходе импульс, регулируемый по амплитуде от нуля до наибольшего напряжения, соответствующего номинальному напряжению обмотки статора.

Основным результатом является получения величины ННПЧР. В результате должны быть обеспечены следующие параметры импульса:

a) межликовое напряжение на выходе генератора, униполярное или биполярное, как это предусмотрено критическими параметрами;

b) время нарастания импульса;

c) время спада импульса, оно должно быть не менее пятикратного времени нарастания импульса.

9.4 Чувствительность

В общем, чувствительность датчика ЧР уменьшается при уменьшении полного сопротивления нагрузки (или увеличения его емкостной составляющей). В качестве руководства принимается, что чувствительность при квалификационных и типовых испытаниях, соответствующих настоящему стандарту, должна быть 1 пКл на 1 нФ емкостной нагрузки при частоте 50 или 60 Гц при минимальной чувствительности 1 пКл. Измерительная система с таким уровнем чувствительности считается достаточно чувствительной для проведения измерений ННЧР на индуктивных нагрузках, когда полные сопротивления уравновешены.

Когда измеряются ЧР при подаче импульсных напряжений на объекты испытаний фоновый шум следует измерять в мВ согласно описанной в IEC 61934 методике.

9.5 Измерение ННЧР и ННПЧР

9.5.1 Измерение ННЧР при напряжении промышленной частоты

Для настоящего стандарта свободные ЧР определены равными менее 5 пКл для образцов «виток-виток» и для моторет и формет, когда измерения проводятся при частоте 50 или 60 Гц. Эти значения определяют также максимальные допустимые уровни шума при измерениях. ННЧР измеряется по методике, изложенной в IEC 60270.

9.5.2 ННПЧР при импульсном возбуждении

ННПЧР определяется согласно IEC 61934. Фоновый уровень шума дается в мВ. Фоновый уровень шума и чувствительность приводятся в соответствии с IEC 61934.

10 Квалификационные испытания изоляционных систем типа I

10.1 Общие положения

Испытания изоляционных систем типа I не преследуют цель вызвать повреждение изоляции вследствие ее электрического пробоя. Испытуемые образцы подвергаются циклическим тепловым и механическим испытаниям, описанным в IEC 60034-18-1, 60034-18-21 и 60034-18-31, и различным испытаниям на электрическую прочность. После каждого цикла испытуемые образцы подвергаются диагностическим испытаниям по определению ЧР и повреждений, встречающихся в случае, если ННЧР оказывается в 1,3 раза меньше чем испытательное напряжение для заданной категории воздействия. С другой стороны ННЧР может превышать значения, полученные в эталонных системах с положительным опытом эксплуатации, которые были испытаны при тех же условиях, что приведены в 10.4. Начальное напряжение определяется как наименьшее напряжение, при котором наблюдаются ЧР внутри пределов чувствительности, описанных в 9.4.

Известно, что на практике в ряде случаев успешно работают отдельные приводы «преобразователь — электрическая машина». Только для этих конкретных машин производитель может использовать этот практический опыт как альтернативу квалификационным испытаниям. Это условие должно быть согласовано между производителем и потребителем.

10.2 Допущения

10.2.1 Общие положения

Изоляционные системы типа I предназначены к использованию в условиях отсутствия ЧР во время всего срока службы. Существенным является измерение начального напряжения возникновения ЧР при специальных испытательных напряжениях, приведенных в Приложении В, умноженным на коэффициент безопасности. Требуемая форма приложенного напряжения для составляющих изоляционной системы приведена в таблице 5.

Испытуемые образцы должны быть изготовлены из тех же материалов и по тем же технологиям, что и готовые промышленные изделия. Они могут соответствовать части изоляционной системы или системе в целом.

Таблица 5 — Требуемая форма приложенного напряжения для испытания составляющих изоляционной системы

Вид испытуемой изоляции	Витая пара проводов или их эквивалент		Моторета или формета		Статор в сборе	
	Синусоидальное	Импульсное	Синусоидальное	Импульсное	Синусоидальное	Импульсное
Виток-виток	да	да	*	да	*	да
Фаза-фаза	нет	нет	да	да	да	да
Фаза-земля	нет	нет	да	да	да	да

* Необходим специальный образец, в котором межвитковая изоляция моделируется по крайней мере двумя электрически изолированными проводниками, намотанными в параллель. Один из них заземлен, а к другому подводится напряжение.

10.2.2 Витая пара проводов или их эквивалент

Витая пара проводов или параллельные рядом расположенные проводники в случае их прямоугольного сечения могут использоваться для испытаний изоляции «виток-виток», чтобы установить уровень воздействующего напряжения, приложенного к параллельным проводникам при испытаниях моторет/формет. Синусоидальное и импульсное напряжения дают эквивалентные результаты в терминах ННЧР, поскольку экспериментальное распределение напряжения в целой обмотке в этом случае не может быть получено. Для этих объектов испытаний достаточно измерить ННЧР при синусоидальной форме напряжения. Витковые напряжения должны быть больше их средних значений, ожидаемых на практике, если принять во внимание явления, описанные в 5.4. Уровни испытательных межпиковых напряжений приведены в В.3 приложения В.

10.2.3 Моторета (всыпная обмотка) или формета (шаблонная обмотка)

Эти модели можно использовать для контроля изоляции «фаза-фаза» и «фаза-земля». Межвитковая изоляция также может быть представлена в случае применения параллельно расположенных проводников. Эту модель следует испытывать в соответствии с рекомендациями таблицы 5. Распределение напряжения, возникающего в модели, воспроизводит распределение, имеющееся в реальной машине. Испытания следует проводить на пропитанных образцах, если обмотки машины также подлежат пропитке.

10.2.4 Готовая обмотка

В этом случае можно испытывать изоляцию «фаза-фаза» и «фаза-земля». Межвитковую изоляцию в обычных обмотках следует испытывать импульсным напряжением. Преимуществом импульсной формы напряжения является то, что все части обмотки подвергаются адекватному воздействию, даже при ее соединении по схеме «звезда». Тем не менее, важно иметь в виду распределение напряжения внутри катушек статорной обмотки. Испытания следует проводить на пропитанных образцах, если в промышленном производстве применяются пропитанные обмотки.

Измерение ЧР при синусоидальной форме приложенного напряжения допускается в случае изготовления специальной обмотки, в которой использованы пары проводов и максимальное напряжение ожидается между двумя соседними витками. Случаи, когда следует использовать синусоидальное и импульсное напряжение, приведены в таблице 5.

10.3 Подготовка испытуемых образцов

10.3.1 Общие положения

Испытуемые образцы конструктивно должны быть максимально приближены к описанным в IEC 60034-18-21 всыпным обмоткам и IEC 60034-18-31 шаблонным обмоткам или к промышленным статорным обмоткам.

10.3.2 Образцы для испытания межвитковой изоляции

При испытании межвитковой изоляции ННЧР измеряется на образце из простой витой пары проводников (см. IEC 60172) или эквивалентном ему образце. Это испытание может быть основой для установления уровня воздействия напряжения, используемого между параллельными проводниками в процессе испытаний формет и моторет.

Испытания по определению ЧР на пропитанных образцах не могут использоваться для определения пропиточных материалов и технологии изготовления моторет и формет и обмотки в целом. Для такой оценки разрешено использование только формет (моторет) или обмоток в целом.

10.3.3 Испытуемые образцы моторет (формет) или обмоток в целом

Образцы изготавливаются с применением тех же материалов и по той же технологии, которая используется в промышленном производстве обмоток. Межфазная и пазовая изоляция должны воспроизводить все расстояния, по которым может происходить поверхностный разряд, и межфазные расстояния, которые существуют при промышленном производстве. Образцы должны иметь изоляционные материалы, используемые при промышленном производстве, и толщину, соответствующую каждому типу подвергаемой испытаниям изоляции.

10.4 Методы квалификационных испытаний

10.4.1 Общие положения

Целью этих испытаний является измерение ННЧР компонентов изоляционной системы во время испытаний по тепловому старению согласно IEC 60034-18-1, IEC 60034-18-21 и IEC 60034-18-31 при условиях работы, для которых они предназначены. Категория воздействия (см. раздел 7), характер процесса старения и диагностические данные должны быть приведены в заключении по результатам испытаний. Считается, что изоляционная система прошла испытания, если ННЧР остается больше нормированного значения в конце циклов старения. Для получения статистически достоверной оценки результатов должно быть испытано не менее пяти образцов. Исключение представляет испытание на укомплектованном статоре, в этом случае достаточно одного образца. При проведении испытаний могут использоваться эталонные системы, обеспечившие условия, описанные в 10.1.

10.4.2 Диагностические испытания

Диагностические испытания проводятся на образцах до начала первого цикла и после каждого последующего частичного цикла старения. Каждое электрическое диагностическое испытание следует проводить на каждой катушке форметы (мотореты) или части обмотки. В дополнение к диагностическим испытаниям, описанным в IEC 60034-18-21 и 60034-18-31, должны проводиться испытания по определению ЧР, чтобы обеспечить условия, при которых ННЧР не появится при специфическом уровне испытательных напряжений (см. таблицу 4 и В.2 приложения В).

10.4.3 Цикл старения

При проверке межфазной изоляции, что соответствует случаю двух катушек, принадлежащим разным фазам и лежащим в одном пазу, может использоваться образец или целая обмотка. Диагностике предшествует испытание по электрическому старению, проводимое в течение 24 часов при температуре окружающей среды под воздействием пикового напряжения при повышенной частоте, увеличенного на коэффициент безопасности в соответствии с В.2 приложения В. Целью такого испытания является обнаружение на ранней стадии наличия любого изоляционного материала, имеющего повышенные диэлектрические потери. Хотя этот материал ведет себя удовлетворительно при промышленной частоте, его применение может вызвать перегрев изоляции при питании от преобразователя. Выбор частоты определяется повторяемостью максимальных импульсов напряжения, ожидаемых при работе привода.

Частичные циклы теплового старения, описанные в IEC 60034-18-1, следует применять к испытуемым образцам, чтобы квалифицировать изоляционную систему по требуемому классу нагревостойкости. Если класс нагревостойкости уже был определен при испытаниях по IEC 60034-18-21 и 60034-18-31, то необходимо лишь проводить испытания при наименьшей подходящей температуре. Также необходимо подвергать образцы специальным диагностическим частичным циклам по IEC 60034-18-1, IEC 60034-18-21 и IEC 60034-18-31. Эти циклы включают механические и электрические испытания и испытания при повышенной влажности. Следует отметить, что повышенная влажность может повлиять на результаты определения ННЧР. Поэтому испытания при повышенной влажности следует проводить на разных этапах так, чтобы испытания по определению ЧР не следовали сразу после них.

10.4.4 Измерение ЧР

Следуя руководству по измерениям ННЧР их следует проводить в следующем порядке:

- испытания межфазной изоляции,
- испытания изоляции «фаза-земля»,
- испытания межвитковой изоляции.

Единственное необходимое условие — напряжение при испытании по определению ЧР должно нарастать до испытательных значений и гарантировать, чтобы ННЧР не имело места. Потому нет необходимости его измерять. При испытании межфазной изоляции напряжение прикладывается к двум вы-

водам обмотки при разомкнутом третьем и заземленном сердечнике. По очереди эти испытания проводятся для трех возможных комбинаций. При испытании изоляции «фаза-земля» каждая фаза испытывается по очереди при заземленном сердечнике и двух других фазах. Этот порядок применим как для схемы соединения обмоток «звезда», так и для схемы «треугольник». Испытание межвитковой изоляции может проводиться при синусоидальном напряжении переменного тока при использовании параллельных проводников. В других случаях требуется использовать импульсное напряжение.

При использовании укомплектованного статора, моторет или формет для испытания межкатушечной изоляции требуется импульсное оборудование. При испытании необходимо контролировать ЧР, применяя оборудование, способное работать при импульсном напряжении (см. IEC 61934).

Следует применять визуальный осмотр испытуемых образцов для определения состояния изоляционных материалов, хотя его результаты не являются окончательным критерием оценки их состояния.

10.5 Критерии прохождения квалификационных испытаний

Критерием успешности испытаний образцов изоляционной системы типа I является то, что для них ННЧР оказывается больше выбранного по категории воздействия напряжения (см. таблицы В.2, В.3), увеличенного на коэффициент безопасности (см. В.2 приложения В). При этом испытания проводятся на образцах, подвергнутых тепловому старению при минимальной температуре.

С другой стороны ННЧР может превышать значения, полученные от эталонной системы с положительным опытом эксплуатации, которая была испытана при тех же условиях, что приведены в 10.4.

11 Типовые испытания изоляционных систем типа I

11.1 Общие положения

Этот вид испытаний применяется для полной статорной обмотки или для целой машины. Это испытание необходимо для демонстрации того факта, что ННЧР превышает нормативное значение напряжения для выбранной категории воздействия при импульсном характере напряжения. Эти испытания проводятся по соглашению между производителем и потребителем.

11.2 Методика проведения испытаний

Готовый статор подвергают испытаниям по определению ЧР при импульсном питающем напряжении (согласно условиям, приведенным в таблице 5), со временем нарастания импульса, соответствующего категории воздействия, и амплитуде импульса, умноженной на коэффициент безопасности в соответствии с В.2 приложения В. Температура обмотки при испытаниях должна быть равна (20 ± 10) °С. Степень повторяемости приложенных импульсов может быть меньше, чем для специального значения. Испытание проводится между фазами при напряжениях, значения которых приведены в таблице В.3 и которые учитывают коэффициент безопасности, равный 1,3. Однако отмечено, что подобные условия могут вызвать перенапряжения в межвитковой изоляции и поэтому привести к неоправданно низкому ННПЧР. При таких обстоятельствах можно применять следующую альтернативную процедуру:

a) осуществлять испытания по определению ЧР для изоляции «фаза-земля» при импульсном напряжении, используя его значения из таблицы В.2. Если ННПЧР больше критерия, необходимого для признания успешности испытаний, то считается, что обмотка прошла типовые испытания. Если ННПЧР меньше этого критерия, то это может быть следствием перенапряжения в межвитковой изоляции. Тогда может использовать следующую альтернативную процедуру:

b) проводят испытание по определению ЧР для изоляции «фаза-земля» при синусоидальном напряжении и частоте 50 или 60 Гц, используя его значения из таблицы В.2. Эти испытания являются квалификационными для пазовой изоляции. Если ННЧР окажется меньше критерия, необходимого для признания успешности испытаний, изоляционная система считается непригодной. Если ННЧР оказывается больше этого критерия, то испытание межвитковой изоляции проводится следующим образом:

c) проводят испытание по определению ЧР для изоляции «фаза-земля» при импульсном напряжении, эквивалентном скачку напряжения, соответствующему типу преобразователя (двухуровневый, трехуровневый и т. д.), используя данные из таблицы В.2. Так испытывают межвитковую изоляцию. Если ННПЧР оказывается ниже критерия, необходимого для признания успешности испытаний, обмотка считается непригодной. Если ННПЧР оказывается больше этого критерия, то считается, что обмотка прошла типовые испытания.

11.3 Критерий прохождения типовых испытаний

Значения ННПЧР и ННЧР должны превышать испытательные напряжения.

12 Анализ результатов и протокол

Приведенные в пункте 5.6 IEC 60034-18-1 формы должны быть использованы таким образом, чтобы все полученные данные могли быть корректно проанализированы и отражены в протоколе.

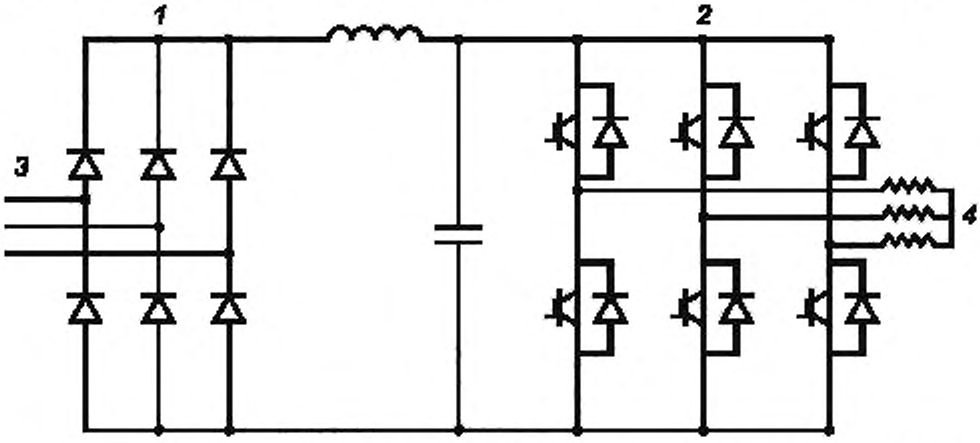
Приложение А
(справочное)

Напряжения на зажимах машины, питающейся от преобразователя

А.1 Напряжения на зажимах машины, питающейся от преобразователя

Преобразователь напряжения с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) или система векторного управления двигателем генерирует прямоугольные импульсы напряжения с постоянной амплитудой, которые имеют различную ширину и частоту повторяемости. Напряжение импульсов на выходе преобразователя не превышает напряжения на его шинах постоянного тока U_{dc}. Таким образом, этот уровень зависит от напряжения на шинах постоянного тока, от напряжения торможения или от коэффициента мощности регулируемого напряжения.

Упрощенная электрическая схема привода «преобразователь-двигатель» показана на рисунке А.1.



1 — выпрямитель; *2* — инвертор с ШИМ; *3* — входные зажимы сети переменного тока; *4* — обмотка двигателя

Рисунок А.1 — Электрическая схема привода «преобразователь-двигатель»

В качестве первого шага необходимо определить точку нулевого потенциала, от которой будут отсчитываться все напряжения. Например, в трехфазной системе напряжения мгновенные значения напряжения «линия-земля» равны.

$$u_1(t) = \sqrt{2}U\sin\omega t,\ u_2(t) = \sqrt{2}U\sin(\omega t - 2\pi/3),\ u_3(t) = \sqrt{2}U\sin(\omega t - 4\pi/3).$$

Это может быть распространено на многофазную систему. Общий закон для определения величины напряжения многофазного напряжения переменного тока после выпрямления записывается как

$$U_{dc} = a(\Psi/\pi)\sin(\Psi/\pi)\,U_{max} = kU_{max},$$

где k — постоянная;

a — зависит от типа выпрямителя (a = 1 — для однополупериодного выпрямителя, a = 2 — для двухполупериодного);

Ψ — число фаз (минимум 2).

Эта формула применима только для симметричных систем, поэтому Ψ имеет минимальное значение, равное 2. В случае однофазных приводов необходимо рассматривать напряжение как комбинацию двух, каждое из которых равно $\sqrt{2}U_ф/2$ с Ψ = 2.

Напряжение на выходе шин постоянного тока (U_{dc}) и поэтому пиковое значение выходного напряжения преобразователя можно рассчитать с помощью приведенной выше формулы. Например, в общем случае полного выпрямления 3-фазного синусоидального напряжения получим

$$U_{dc} = 2(3/\pi)\sin(\pi/3)\sqrt{2}U_ф = 2(3/\pi)(\sqrt{3}/2)\sqrt{2}U_ф = (3/\pi)\sqrt{3}\,U_ф\sqrt{2}$$

и $\sqrt{3}U_ф = U_л$, то есть действующему значению линейного напряжения.

Поэтому $U_{dc} = (3/\pi)\sqrt{2}U_n$.

Например, если U_n = 400 В (действующее значение), то $U_{dc} = 400\ (3/\pi)\sqrt{2} = 540$ В = 1,35 U_n = 1,65 U_{max}.

Коэффициент 1,35 был получен теоретически, но на практике он может оказаться большим. Например, в случае рекуперации энергии напряжение на шинах постоянного тока равно напряжению отсечки, которое много больше полученного выше расчетным путем. Примеры максимальных напряжений, появляющихся на входных зажимах машины при различных условиях питания приведены в таблице А.1.

Таблица А.1 — Примеры максимальных напряжений, воздействующих на различные составляющие изоляции всыпной обмотки статора, соединенной по схеме «звезда» (первая ступень, двухуровневый преобразователь)

Условия питания	Максимальные напряжения, воздействующие на различные составляющие изоляции обмотки статора					
	«Фаза — земля» (корпус)	«Фаза — фаза»	«Виток — виток»	Примеры для U_n = 400 В		
				«Фаза— земля»	«Фаза— фаза»	«Виток— виток», схема Y
Синусоидальное напряжение, U_n (действующее значение)	$\sqrt{2}\ U_n/\sqrt{3}$	$\sqrt{2}\ U_n$	$(\sqrt{2}\ U_p/\sqrt{3})/N$	±327	±566	±327/N
Преобразователь соединен непосредственно с машиной (или через короткий кабель)	$\pm U_{dc}/2$	$\pm U_{dc}$	Не установлено	±270	±540	Не установлено
Преобразователь с машиной соединен через длинный кабель	$\pm 3U_{dc}/2$	$\pm 2U_{dc}$	Не установлено	±810	±1080	Не установлено
Преобразователь с машиной через длинный кабель при заторможенном двигателе	$\geq 3U_{dc}/2$	$\geq 2U_{dc}$	Не установлено	≥ 810	≥ 1620	Не установлено
N — число витков в фазе.						
Примечание — Расчет межвиткового напряжения может оказаться не таким простым (см. 5.4).						

А.2 Расчет максимальных пиковых напряжений для двухуровневого преобразователя

Пиковое напряжение зависит от способа соединения машины и преобразователем, как показано в таблице А.1, и является следствием наложения перенапряжения на выходное напряжение преобразователя. Значения, приведенные в таблице А.2, вытекают из следующих расчетов.

Максимальное сетевое напряжение равно номинальному, умноженному на 1,1 (второй столбец).

$U_{dc} = (3/\pi)\sqrt{2}\ U_n = (3/\pi)\sqrt{3}\ U_{max}$ (× 1,1 для получения третьего столбца).

Межфазное напряжение машины = U_{dc} × коэффициент перенапряжения (1, 2 или 2,5, четвертый столбец).

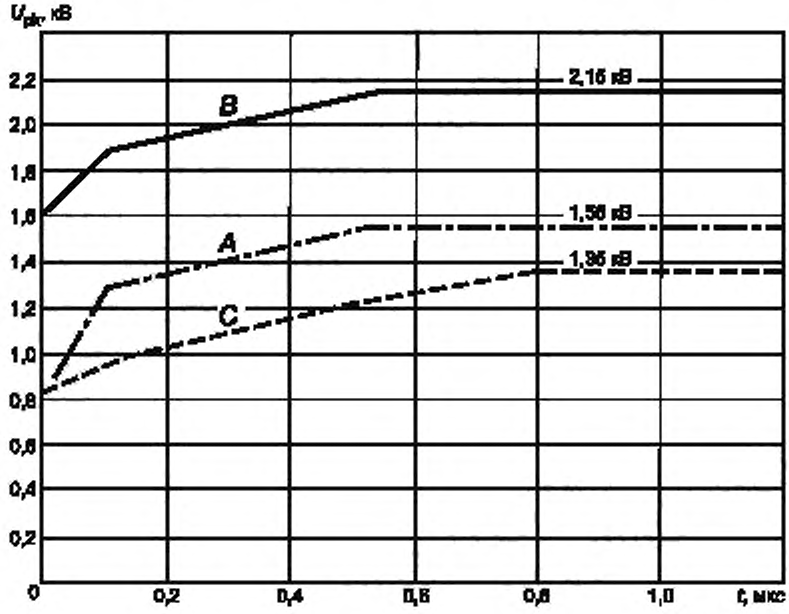
Чтобы получить относительные значения U_p по отношению к U_{max}, его нужно разделить на максимальное напряжение «фаза-нейтраль», как показано в приложении А.1. Пример расчета приведен в таблице А.2.

Таблица А.2 — Примеры расчета максимальных пиковых напряжений

Номинальное напряжение, В	Номинальное напряжение х 1,1, В	U_{dc}, В	Коэффициент перенапряжения	U_p, В	U_{max}, В	U_p/U_{max}
500	550	741	1	741	408	1,82
500	550	741	2	1482	408	3,64
500	550	741	2,5	1853	408	4,54

Причиной увеличения номинального напряжения на 10 % является возможность такого роста на практике. Этого может и не произойти в течение большего времени работы машины, но учет необходим при рассмотрении возможности возникновения ЧР. Необходимо учитывать максимально возможный в эксплуатации уровень напряжения.

Эти данные, которые воспроизводятся здесь на рисунке А.2 можно сравнить с приведенными на рисунке 17 в IEC 60034-25 (см. также [2]). Из кривых на рисунке А.2 видно, что при времени нарастания импульса, большем 500 нс, максимальное импульсное напряжение, приложенное между двумя входными зажимами машины (приложение А) с учетом отражения и демпфирования (коэффициент перенапряжения равен 2), равно 1556 В.



A — без фильтров для двигателей с напряжением до 500 В, включительно;
B — без фильтров для двигателей с напряжением до 690 В, включительно;
C — зависимость из IEC 60034-17

Рисунок А.2 — Граничные кривые импульсного напряжения U_{pk}, приложенного между двумя фазными зажимами двигателя в функции времени нарастания импульса t_r

Приложение В
(справочное)

Расчет испытательных напряжений для изоляционных систем типа I

В.1 Расчет категорий воздействия

Испытательные напряжения, которые применяются при испытаниях изоляционных систем в настоящем стандарте определяются выбранной категорией воздействия. Эти категории приведены в разделе 7 и определяются пиковым напряжением на зажимах двигателя и минимальным временем нарастания импульса напряжения, которое наблюдается при работе привода. Поэтому должен быть осуществлен тщательный выбор специальных испытаний, которым бы подвергалась изоляционная система. Категории воздействия приведены в таблице В.1. Два испытательных параметра являются независимыми и могут принадлежать различным категориям воздействия.

Таблица В.1 — Категории воздействия

Категория воздействия	Коэффициент перенапряжения, U_p/U_{dc}	Время нарастания импульса t_r, мкс
A — незначительная	Не более 1,1	Не менее 1
B — умеренная	Не более 1,5	Не менее 0,3
C — жесткая	Не более 2,0	Не менее 0,1
D — экстремальная	Не более 2,5	Не менее 0,05

В.2 Коэффициент безопасности для измерения ННЧР

При увеличении базовых уровней ННЧР при проведении квалификационных и типовых испытаний изоляционных систем типа I следует учитывать два фактора. Первый вытекает из требований IEC 60034-1, в котором перечислены коэффициенты безопасности, на которые следует умножать испытательные напряжения при определении ЧР. Второй фактор, равный 1,25, связан с эффектом гистерезиса, из-за которого НЗЧР, как показала практика, на 25 % меньше ННЧР. Это справедливо, если активность ЧР определяется переходными перенапряжениями, сопровождающими нормальные пиковые напряжения, и такое положение будет сохраняться, пока позволяет этот коэффициент. Представляется, что это положение будет мало применимо к изоляционным системам двигателей, в которых ожидается маленькая разница между ННЧР и НЗЧР. Второй увеличивающий коэффициент принимает во внимание замечание из раздела 7.4 IEC 60034-25, что при увеличении температуры обмотки с 25 до 155 °С ННЧР уменьшается на 30 %. Этот эффект частично учитывается в базовом коэффициенте безопасности, приведенном выше. Для учета всех этих обстоятельств рекомендуется выбирать значение коэффициента безопасности, равное 1,3.

В.3 Квалификационные и типовые испытания

Уровни испытательных напряжений, используемых для определения ННЧР при квалификационных и типовых испытаниях изоляционной системы типа I, могут быть рассчитаны в зависимости от категории воздействия. Для двухуровневого преобразователя они приведены в таблицах В.2, В.3. При расчете следует применять то же сочетание независимых категорий воздействия, что и выбранное в разделе 7. Было сделано допущение, что межпиковое значение, измеренное при определении ННПЧР при импульсном напряжении такое же, что и определении ННЧР при частоте 50 (60) Гц. Отмечено, что значение U_p и U_b взяты из определения межфазных напряжений на зажимах машины.

Напряжения «фаза-фаза» и «фаза-земля», появляющиеся на зажимах машины для случая двухуровневого преобразователя, приведены на рисунке В.1. Отметим, что напряжение $u_{pk/pk}$ является основным воздействующим на межфазную изоляцию фактором, потому что переключающие импульсы меньше и ими можно пренебречь. U_p — это скачок напряжения, и он важен для межвитковой изоляции. Их значения были использованы в разделе 4.

Типовые испытания проводятся на укомплектованном статоре или на собранной машине. Они состоят из серии межфазных измерений ЧР, при которых к каждой паре зажимов машины прикладывается импульсное напряжение. Если оказывается, что ННПЧР во всех этих опытах оказывается больше испытательного, то статор считается прошедшим успешно эти испытания. Если при любом из этих опытов ННПЧР оказывается меньше испытательного, то обмотка не обязательно должна быть повреждена. Приложение межфазного напряжения в этом случае может привести к перенапряжениям в межвитковой изоляции, вызывая ЧР, которые отсутствуют при эксплуатации. Если при этом оказывается возможным испытать импульсным напряжением изоляцию «фаза-земля», то можно будет сделать вывод о том, не было ли воздействие на нее слишком большим. Если понятно, что изоляция «фаза-земля» не была подвержена перенапряжениям, то считается, что изоляция не прошла испытания.

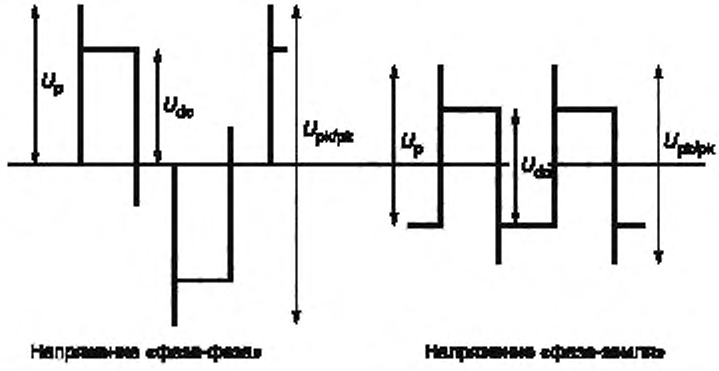


Рисунок В.1 — Сравнение напряжений «фаза-фаза» и «фаза-земля» для двухуровневого преобразователя (схематическое изображение этих напряжений не масштабировано)

Если же воздействия на эту изоляцию оказались слишком большими или если эти измерения не проводились, то может быть использован альтернативный метод, как показано в 11.2. Альтернативный метод включает в себя определение ННПЧР при испытании изоляции «фаза-земля» импульсным напряжением последовательно для каждой фазы. Если ННПЧР хотя бы однажды снова окажется меньше испытательного для этой изоляции, то для каждой фазы последовательно проводится ее испытания при промышленной частоте 50 (60) Гц после испытаний импульсным напряжением, используя худший вариант скачка напряжения, приходящийся на первый виток первой секции обмотки. Если ННЧР оказывается меньше испытательного при любом из этих опытов, обмотка считается поврежденной. Отметим, что используемый для испытаний импульсный генератор должен генерировать импульсы перенапряжения со спадающим задним фронтом. Эти перенапряжения используются для определения ННПЧР. Перенапряжения не учитываются при испытании межвитковой изоляции, так как в этом случае важен лишь передний фронт импульса и величина его перенапряжения.

Испытательные напряжения для межвитковой изоляции, приведенные в таблице В.2, связаны с двумя различными формами импульсов, производимыми генераторами. При первой форме (пятый столбец таблице В.2) униполярный импульс имеет прямоугольную форму со временем нарастания импульса, соответствующим категории воздействия как для переднего, так и для заднего фронтов. Время между этими фронтами относительно мало. Степень воздействия на межвитковую изоляцию зависит от производной от формы волны. Поэтому принимаются во внимание оба ее фронта.

Если применяется обычный импульсный генератор, у которого время спада заднего фронта импульса значительно больше времени нарастания переднего, например, 100 мкс по сравнению с 1 мкс, то значение напряжения удваивается (шестой столбец), так как в этом случае только передний фронт воздействует на межвитковую изоляцию. Последний столбец соответствует синусоидальному напряжению, прикладываемому к специальным обмоткам и соответствующему худшему случаю распределения напряжений с коэффициентом 0,7 (см. рисунок 9), соответствующим времени нарастания импульса 0,3 мкс. Эти значения напряжения составляют 0,7 значений, приведенных в шестом столбце.

Таблица В.2 — Уровни межпиковых испытательных напряжений по отношению к U_{dc} двухуровневого преобразователя (коэффициент безопасности равен 1,3)

Коэффициент перенапряжения	Величина перенапряжения	Уровень испытательных напряжений по отношению к U_{dc}				
				Межвитковая изоляция		
U_s/U_{dc}	U_r/U_{dc}	«Фаза-фаза» (уравнение (1)x1,3)	«Фаза-земля» (уравнение (2)x1,3)	Статор[1] (уравнение (3)x1,3)	Статор[2] (уравнение (3)x2,6	Специальные обмотки[3]
1,1	0,1	2,9	2,0	1,0	2,0	1,4
1,5	0,5	3,9	2,7	1,4	2,7	1,9
2,0	1,0	5,2	3,6	1,8	3,6	2,5

Окончание таблицы В.2

Коэффициент перенапряжения	Величина перенапряжения	Уровень испытательных напряжений по отношению к U_{dc}				
				Межвитковая изоляция		
U_p/U_{dc}	U_a/U_{dc}	«Фаза-фаза» (уравнение (1)x1,3)	«Фаза-земля» (уравнение (2)x1,3)	Статор[1] (уравнение (3)x1,3)	Статор[2] (уравнение (3)x2,6	Специальные обмотки[3]
2,5	1,5	6,5	4,6	2,3	4,6	3,2

[1] Для униполярного прямоугольного импульса испытательного напряжения со временем нарастания в соответствии с категорией воздействия для переднего и заднего фронтов.

[2] Для униполярного импульса со временем нарастания в соответствии с категорией воздействия, но с большим временем спада.

[3] Пример испытательного напряжения для времени нарастания импульса 0,3 мкс и коэффициенте 0,7 из кривой фиг. 9 и коэффициенте 2,0 для межпикового импульсного напряжения переменного тока.

В.4 Уровни испытательных напряжений для определения ННЧР специальных обмоток и витой пары проводов

Руководство по испытанию межвитковой изоляции в случае специальных обмоток (см. таблицу 5) или витой пары проводов приведено в таблице В.3. Специфичными являются три случая. При отсутствии информации должно быть принято, что полный скачок напряжения может приходиться на этот элемент изоляционной системы. Если время нарастания импульса напряжения на зажимах машины известно, следует принять, что имеется худший случай распределения напряжения, показанный на рисунке 9. В случае, когда распределение напряжения известно, могут быть использованы реальные значения напряжения. Для витой пары проводов напряжение может иметь синусоидальную форму с тем же значением межпикового напряжения. Для других испытаний следует использовать импульсное напряжение с соответствующим временем нарастания импульса.

Таблица В.3 — Уровень испытательных напряжений при определении ННЧР для специальных обмоток и витой пары проводов

Имеющаяся информация	Испытательное напряжение
Информация отсутствует	Скачок напряжения
Известно время нарастания импульса	Скачок напряжения × коэффициент из рисунка 9 для соответствующего времени нарастания импульса
Известно распределение напряжения по обмотке и время нарастания импульса	Реальные значения

В.5 Примеры испытательных напряжений

Испытательные напряжения для межвитковой изоляции, изоляции «фаза-фаза» и «фаза-земля» можно рассчитать по формулам, приведенным в разделе 4 и таблице В.2. В таблице В.4 приведен пример испытательных напряжений для статорной обмотки с номинальным действующим напряжением 480 В, которая питается от двухуровневого преобразователя. Испытательные напряжения рассчитаны с учетом того, что U_{dc} = 648 В. В расчеты включен коэффициент безопасности, равный 1,3.

Таблица В.4 — Примеры напряжений для типовых испытаний обмотки статора с номинальным действующим напряжением 480 В, которая питается от двухуровневого преобразователя, в предположении, что время нарастания импульса равно 0,3 мкс и худшем случае распределения с коэффициентом 0,7 в соответствии с рисунком 9

U_a/U_{dc}	U_b/U_{dc}	Межпиковое испытательное напряжение, связанное с U_{dc} и включающее коэффициент безопасности 1,3				
		Фаза-фаза[1]	Фаза-земля[1]	Статор[2] (столбец 5 таблицы В2)	Статор[2] (столбец 6 таблицы В2)	Модель[1]
1,1	0,1	1853	1297	649	1297	908

Окончание таблицы В.4

U_p/U_{dc}	U_b/U_{dc}	Межпиковое испытательное напряжение, связанное с U_{dc} и включающее коэффициент безопасности 1,3				
		Фаза-фаза[1]	Фаза-земля[1]	Статор[2] (столбец 5 таблицы В2)	Статор[2] (столбец 6 таблицы В2)	Модель[1]
1,5	0,5	2527	1769	885	1769	1238
2,0	1,0	3370	2359	1179	2359	1651
2,5	1,5	4212	2948	1474	2948	2064

[1] Межпиковое напряжение на зажимах машины, перенапряжение на обоих фронтах импульса, вырабатываемого генератором, должно приниматься во внимание при измерении испытательного напряжения.

[2] Изменение напряжения только на переднем фронте импульса принимается во внимание при измерении амплитудного значения испытательного напряжения.

Приложение ДА
(справочное)

Сведения о соответствии межгосударственных стандартов ссылочным международным стандартам

Таблица ДА.1

Обозначение и наименование ссылочного международного стандарта	Степень соответствия	Обозначение и наименование соответствующего межгосударственного стандарта
IEC 60034-18-1:2010 Машины электрические вращающиеся. Часть 18-1. Функциональная оценка систем изоляции. Общие руководящие указания	IDT	ГОСТ IEC 60034-18-1—2014 Машины электрические вращающиеся. Часть 18-1. Оценка функциональных показателей систем изоляции. Общие требования
IEC 60034-18-21:2012 Машины электрические вращающиеся. Часть 18-21. Функциональная оценка систем изоляции. Методики испытаний обмоток из намотанной проволоки. Оценка тепловых характеристик и классификация	IDT	ГОСТ IEC 60034-18-21—2014 Машины электрические вращающиеся. Часть 18-21. Оценка функциональных показателей систем изоляции. Методы испытаний обмоток из обмоточного изолированного провода. Оценка тепловых характеристик и классификация
IEC 60034-18-31:2012 Машины электрические вращающиеся. Часть 18-31. Функциональная оценка систем изоляции. Методики испытаний шаблонных обмоток. Оценка тепловых характеристик и классификация изоляционных систем, используемых во вращательных машинах	IDT	ГОСТ IEC 30034-18-31—2014 Машины электрические вращающиеся. Часть 18-31. Оценка функциональных показателей систем изоляции. Методики испытаний для шаблонных обмоток. Оценка и классификация систем изоляции, используемых во вращающихся машинах, по тепловым характеристикам
IEC/TS 60034-25:2007 Машины электрические вращающиеся. Часть 25. Руководство по конструкции и эксплуатационным характеристикам двигателей переменного тока, специально предназначенным для электропитания через преобразователь	—	*
IEC 60172:1987 Методы испытаний по определению температурного индекса	—	*
IEC 60270:2000 Методы испытаний высоким напряжением. Измерение частичных разрядов	—	*
IEC 60664-1 Координация изоляции для оборудования в низковольтных системах. Часть 1. Принципы, требования и испытания	—	*
IEC 61800-2:1998 Системы силовых электроприводов с регулируемой скоростью. Часть 2. Общие требования. Номинальные технические характеристики низковольтных систем силовых электроприводов переменного тока с регулируемой частотой	—	*
IEC 61934 Электроизоляционные материалы и системы. Электрическое измерение частичных разрядов кратковременно нарастающих и периодически повторяющихся импульсах напряжения	—	*

* Соответствующий межгосударственный стандарт отсутствует. До его утверждения рекомендуется использовать перевод на русский язык данного международного стандарта. Перевод данного международного стандарта находится в Федеральном информационном фонде технических регламентов и стандартов.

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

- IDT — идентичные стандарты.

Библиография

[1] STONE, G.C. CAMPBELL, S. TETREAULT, S. Inverter Duty Motors: Which Motors are at Risk, IEEE Industry Applications Magazine, Sept 2000, pp. 17—22
[2] Variable speed drives and motors — Motor insulation voltage stresses under PWM inverter operation. Technical Report No.1. Joint GAMBICA/REMA Working Group

УДК 621.313.3:006.354 МКС 29.160 IDT

Ключевые слова: машины электрические вращающиеся, квалификационные и типовые испытания, системы электроизоляции, питание от преобразователей напряжения

Редактор *М.И. Максимова*
Технический редактор *В.Н. Прусакова*
Корректор *В.И. Варенцова*
Компьютерная верстка *В.И. Грищенко*

Сдано в набор 05.08.2015. Подписано в печать 25.09.2015. Формат 60×84 1/8. Гарнитура Ариал. Усп. печ. л. 3,72. Уч.-изд. л. 3,20. Тираж 35 экз. Зак. 3160.

Издано и отпечатано во ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 123995 Москва, Гранатный пер., 4.
gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru

gost.e-ecolog.ru