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

МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ

ГОСТ IEC/TS 60034-18-42—2014

МАШИНЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ВРАЩАЮЩИЕСЯ

Часть 18-42

Квалификационные и приемочные испытания для систем электроизоляции, стойких к частичному разряду, типа II, используемых во вращающихся электрических машинах с питанием от преобразователей источника напряжения

(IEC/TS 60034-18-42:2008, IDT)

Издание официальное

Москва
Стандартинформ
2015

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 международного документа, 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. № 414-ст межгосударственный стандарт ГОСТ IEC/TS 60034-18-42—2014 введен в действие в качестве национального стандарта Российской Федерации с 1 марта 2016 г.

5 Настоящий стандарт идентичен международному документу IEC/TS 60034-18-42:2008 Rotating electrical machines — Part 18-42: Qualification and acceptance tests for partial discharge resistant electrical insulation systems (Type II) used in rotating electrical machines fed from voltage converters (Машины электрические вращающиеся. Часть 18-42. Квалификационные и приемные испытания для систем электроизоляции, стойких к частичному разряду, типа II, используемых во вращающихся электрических машинах с питанием от преобразователей источника напряжения).

Международный документ 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

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
4.1 Напряжение на зажимах машины, получающей питание от преобразователя . . . 3
4.2 Напряженность электрического поля в изоляционной системе обмоток машины . . . 5
5 Изоляционные системы типа II . . . 6
6 Факторы воздействия для изоляционных систем типа II при питании от преобразователя . . . 6
7 Квалификационные и приемочные испытания . . . 7
7.1 Общие положения . . . 7
7.2 Квалификационные испытания . . . 8
7.3 Приемочные испытания . . . 8
8 Квалификационные испытания витковой изоляции . . . 8
8.1 Общие положения . . . 8
8.2 Методы испытаний . . . 9
9 Квалификационные испытания корпусной изоляции . . . 10
9.1 Общие положения . . . 10
9.2 Методы испытаний . . . 10
9.3 Использование данных о сроке службы изоляции при частоте 50 или 60 Гц для прогнозирования срока службы при питании от преобразователя . . . 11
10 Квалификационные испытания системы защиты от короны и выравнивания напряженности электрического поля . . . 12
10.1 Общие положения . . . 12
10.2 Методы испытаний . . . 13
11 Подготовка объектов испытаний . . . 14
11.1 Общие положения . . . 14
11.2 Образцы межвитковой изоляции . . . 14
11.3 Изоляция катушек . . . 14
12 Порядок квалификационных испытаний . . . 14
12.1 Общие положения . . . 14
12.2 Образцы межвитковой изоляции . . . 15
12.3 Изоляция катушек . . . 15
12.4 Образцы системы выравнивания напряженности . . . 15
13 Критерии прохождения квалификационных испытаний . . . 16
13.1 Образцы межвитковой изоляции . . . 16
13.2 Образцы изоляции катушек . . . 16
13.3 Образцы системы выравнивания напряженности . . . 16
14 Приемочные испытания для изоляционных систем типа II (типовые испытания) . . . 16
14.1 Общие положения . . . 16
14.2 Методика приемочных испытаний . . . 16
14.3 Критерий прохождения приемочных испытаний . . . 17
15 Анализ результатов, отчет и классификация . . . 17
Приложение А (справочное) . . . 18
Приложение В (справочное) . . . 19
Приложение С (справочное) . . . 21
Приложение ДА (справочное) Сведения о соответствии межгосударственных стандартов ссылочным международным стандартам . . . 22

МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ

МАШИНЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ВРАЩАЮЩИЕСЯ

Часть 18-42

Квалификационные и приемочные испытания для систем электроизоляции, стойких к частичному разряду, типа II, используемых во вращающихся электрических машинах с питанием от преобразователей источника напряжения

Rotating electrical machines. Part 18-42. Qualification and acceptance tests for partial discharge resistant electrical insulation systems (type II) used in rotating electrical machines fed from voltage converters

Дата введения — 2016—03—01

1 Область применения

Настоящий стандарт определяет критерии оценки изоляционных систем обмоток статора (ротора) однофазных или многофазных электрических машин переменного тока, которые подвержены повторяющимся импульсным напряжениям, вырабатываемым преобразователями с ШИМ, и которые должны выдерживать воздействие частичных разрядов (ЧР) в течение всего срока службы. Стандарт описывает электрические квалификационные и приемочные испытания на представительных образцах, которые должны подтверждать их пригодность для работы с преобразователями напряжения.

Настоящий стандарт не распространяется на:

- вращающиеся электрические машины, использующие преобразователь только для пуска;
- электрооборудование систем транспорта.

Примечание — Хотя настоящий стандарт связан с преобразователями напряжения, признается, что существуют и другие преобразователи, которые могут генерировать повторяющиеся импульсы напряжения. Для таких преобразователей, если необходимо, может быть использован аналогичный подход.

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 60034-18-32 Rotating electrical machines — Part 18: Functional evaluation of insulation systems — Section 32: Test procedures for form-wound windings — Electrical evaluation of insulation systems used in machines up to and including 50 MVA and 15 kV (Машины электрические вращающиеся. Часть 18: Функциональная оценка систем изоляции. Раздел 32: Методики испытаний шаблонных обмоток. Оценка электрических характеристик систем изоляции, используемых в машинах мощностью до 50 МВА включительно и напряжением 15 кВ)

IEC 60034-18-41 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. Квалификационные и типовые испытания электрических изоляционных систем типа I, используемых во вращающихся электрических машинах, питающихся от преобразователей напряжения)

Издание официальное

IEC 60216-3 (Электрические изоляционные материалы. Термическая стойкость. Часть 3. Инструкция по расчету характеристик термической стойкости)

IEC 61251 (Электрические изоляционные материалы. Оценка стойкости по отношению к напряжению переменного тока. Введение)

IEC 61800-4 (Силовые регулируемые электрические приводы. Часть 4. Общие требования. Номинальные данные для силовых электроприводов переменного тока напряжением свыше 1000 В и менее 35 кВ)

IEC 62068-1 (Электрические изоляционные системы. Электрические воздействия, производимые повторяющимися импульсами. Часть 1. Общий метод оценки электрического сопротивления)

IEC 62539 (Руководство по статистическому анализу данных об пробоях электрической изоляции)

3 Термины и определения

В настоящем стандарте применены следующие термины с соответствующими определениями:

3.1 **коэффициент увеличения напряжения** (voltage endurance coefficient) n: Экспонента инверсной силовой модели или экспоненциальная модель, по которой определяется связь между сроком службы изоляционной системы и амплитудой воздействующего на нее напряжения

3.2 **срок службы** (life): Время работы до повреждения (отказа)

3.3 **материал для выравнивания электрической напряженности** (stress grading material): Материал, обычно имеющий нелинейную характеристику активного сопротивления, применяемый для лобовых частей обмотки статора с целью уменьшения максимального значения электрической напряженности.

3.4 **материал для антикоронарного покрытия** (corona protection material): Материалы, используемые для покрытия стержней обмотки в пазовой части сердечника статора для избежания ЧР в пазу.

3.5 **время нарастания импульса** (impulse rise time) t_r: Время нарастания импульса от 0 % до 100 % (см. рисунок 1).

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

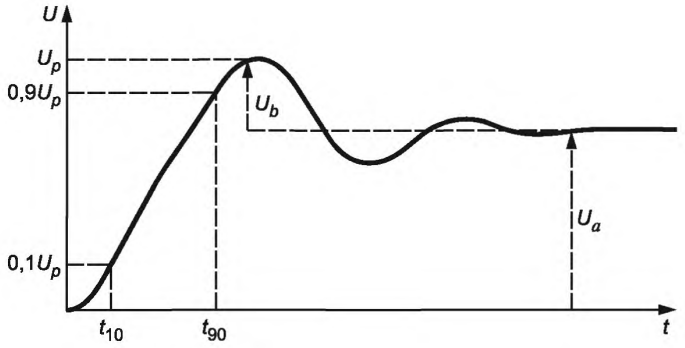


Рисунок 1 — Параметры импульса напряжения

3.6 **электроизоляционная система** (electrical insulation system): Изоляционная структура, содержащая один или более электроизоляционных материалов вместе с соответствующими проводящими частями, применяемыми в электротехническом устройстве (см. IEC 62068-1).

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

3.8 **номинальное напряжение** (rated voltage) U_n: Величина, обычно определенная производителем для определенных рабочих условий машины.

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

Примечание — В настоящем стандарте под основной частотой напряжения на зажимах машины понимается частота, определяющая ее скорость вращения при питании от преобразователя.

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

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

Примечание 1 — Для биполярных импульсов это напряжение равно половине межпикового напряжения (см. рисунок 2).

Примечание 2 — Межпиковое напряжение $U_{pk/pk}$ показано на рисунке 2.

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

3.13 **частота повторяемости импульсов напряжения** [impulse repetition frequency]: Среднее число импульсов напряжения в единицу времени, генерируемых преобразователем (частота переключения).

3.14 **скачок напряжения** (jump voltage) U_j: Изменение напряжения на зажимах машины в начале каждого импульса при питании его от преобразователя (см. рисунок 3).

3.15 **межпиковое импульсное напряжение** (peak to peak impulse voltage) $U'_{pk/pk}$: Напряжение между пиками на частоте импульсов (см. рисунок 2).

3.16 **межпиковое напряжение** (peak to peak voltage) $U_{pk/pk}$: Напряжение между пиками на основной частоте (см. рисунок 2).

3.17 **частичный разряд (ЧР)** (partial discharge): Электрический разряд, который только частично перекрывает изоляцию между проводниками.

Примечание — Он может произойти внутри изоляции или вблизи проводника.

4 Эффекты, возникающие при работе от преобразователя частоты

4.1 Напряжение на зажимах машины, получающей питание от преобразователя

Время нарастания выходного напряжения современных преобразователей находится в пределах 50—2000 нс благодаря характеристикам полупроводниковых коммутаторов. Напряжение на зажимах машины, получающей питание от преобразователя, зависит от нескольких характеристик силового привода (см. IEC 61800-4), таких как:

- рабочее линейное напряжение преобразователя,
- архитектура и режим управления преобразователя,
- наличие фильтров между двигателем и преобразователем,
- длина и характеристики кабеля между ними,
- конструкция обмотки машины,
- система заземления.

Чтобы применить настоящий стандарт к оценке и проверке изоляционной системы обмотки, необходимо установить требуемые параметры напряжения, появляющегося на зажимах машины (см. раздел 6). В случае использования двухуровневых или иных преобразователей напряжения генерируемые преобразователем перенапряжения на зажимах машины зависят от времени нарастания импульса на выходе преобразователя, от длины кабеля и полного входного сопротивления машины. Эти перенапряжения создаются отраженными волнами, возникающими между соединениями кабеля с зажимами машины или преобразователя из-за рассогласования их сопротивлений. Напряжение, появляющееся на зажимах машины в случае питания от трехуровневого преобразователя, показано на рисунке 2, где показан один период на основной частоте.

Два примера получения максимального изменения напряжения на частоте импульсов U_j показаны на рисунке 3. Этот параметр важен при определении увеличения напряжения, которое может произойти на первой или последней катушке обмотки статора. Хотя меньшее значение U_j, показанное на рисунке 3, является наиболее общим случаем мгновенного изменения напряжения на зажимах обмотки, существует вероятность того, что в отдельных случаях этот скачок напряжения может произойти в момент переключения между уровнями. Тогда изменение напряжения будет соответствовать большему значению U_j, приведенному на рисунке 3.

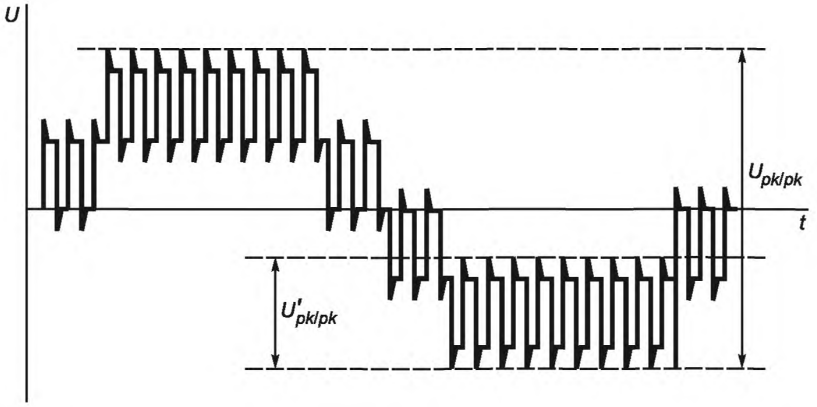


Рисунок 2 — Межфазное напряжение на зажимах машины при питании от трехуровневого преобразователя

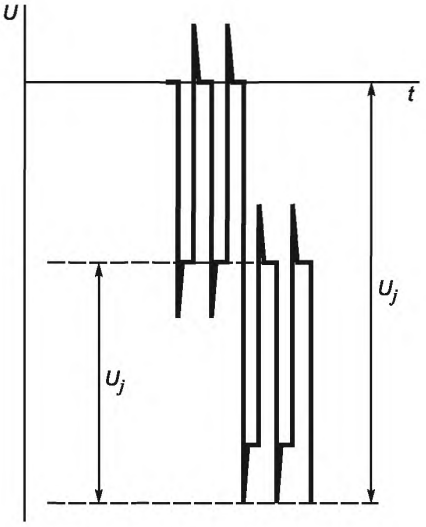


Рисунок 3 — Возможный скачок напряжения U_j на зажимах машины, связанный с типом преобразователя

Примеры увеличения напряжения для двухуровневого преобразователя, происходящие при различном времени нарастания импульса и различной длине кабеля, приведены на рисунке 4. Здесь показан худший случай, соответствующий режиму холостого хода преобразователя. В этом случае увеличение напряжения незначительно при времени нарастания импульса 1000 нс и длине кабеля менее 15 м. Оно достигает значения 1,2 только при длине кабеля более 50 м.

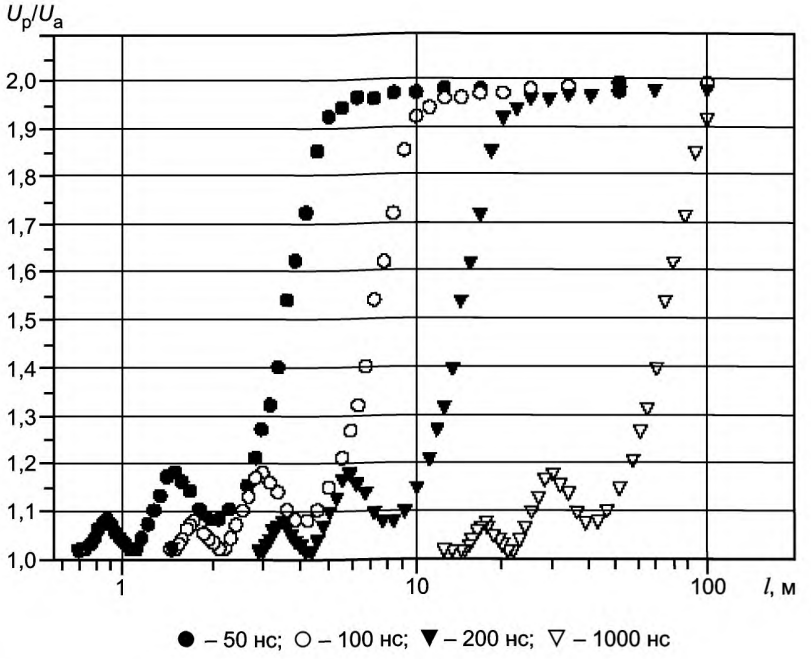


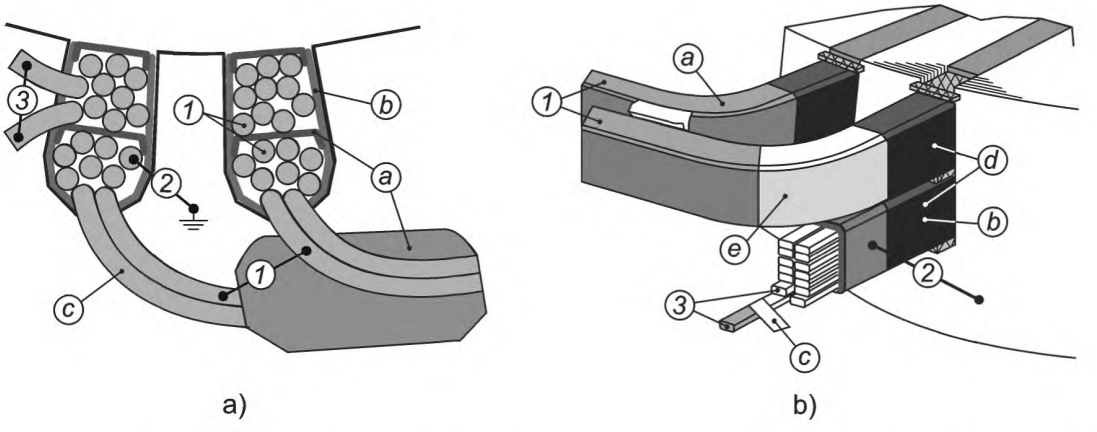
Рисунок 4 — Максимальное увеличение напряжения на зажимах машины в функции длины кабеля l и различном времени нарастания импульса для двухуровневого преобразователя

4.2 Напряженность электрического поля в изоляционной системе обмоток машины

4.2.1 Общие положения

Если обмотка подвергается воздействию импульсов с малым временем нарастания и с большой амплитудой, в следующих местах (см. рисунок 5 a, b) может возникать чрезмерная напряженность поля:

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



a — фазная изоляция (межслойная); *b* — изоляция на землю; *c* — витковая изоляция; *d* — система защиты от короны в пазу; *e* — система выравнивания напряженности электрического поля; *1* — межфазная изоляция; *2* — изоляция «фаза—земля»; *3* — межвитковая изоляция

Рисунок 5 — Примеры конструкции изоляционных систем (a — всыпная обмотка, b — шаблонная обмотка)

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, среди ограничений, свойственных электроприводу, должен рассматриваться такой параметр, как межпиковое напряжение. Это связано с тем, что униполярные напряжения вызывают те же напряженности, что и биполярные при одинаковых межпиковых напряжениях.

4.2.2 Напряженность поля в межфазной изоляции

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

4.2.3 Напряженность поля в изоляции «фаза—земля»

Максимальные напряженности в изоляции «фаза—земля» определяются конструкцией обмотки и характеристиками этой изоляции.

4.2.4 Напряженность поля в витковой изоляции

Напряженность поля в витковой изоляции определяется скачком напряжения «фаза—земля» (его амплитудой и временем нарастания) и конструкцией самой обмотки (количество катушек, количество и длина витков). Если это напряжение не задано, то можно принять, что оно равно скачку напряжения «фаза—земля», деленному на число витков (для обычной катушки) или слоев катушки (для многослойных катушек). Возможно его дополнительное увеличение из-за бегущей вдоль проводника волны напряжения.

5 Изоляционные системы типа II

Если желательно, чтобы любая часть изоляционной системы противостояла ЧР во время всего срока службы, то ее относят к типу II, и она поэтому должна выполняться из материалов, способных противостоять воздействию ЧР. Как правило, изоляционные системы типа II используются в машинах с номинальным напряжением более 700 В. Производители обычно определяют номинальное напряжение машины при частоте сети, что соответствует синусоидальному источнику напряжения частотой 50 или 60 Гц. В случае питания машины от преобразователей такое определение номинального напряжения неприменимо, хотя производители могут все еще считать его соответствующим работе от синусоидального источника частотой 50 или 60 Гц и обозначать его на щитке машины. Нормирование изоляционной системы машины при работе от преобразователя должно проводиться с учетом воздействующих факторов, при которых проводятся квалификационные испытания. Номинальное напряжение при промышленной частоте, принятое производителем, может оказаться непригодным в случае питания от преобразователя.

6 Факторы воздействия для изоляционных систем типа II при питании от преобразователя

Проектировщик электропривода должен предоставить конструктору электрической машины данные о напряжении на ее зажимах. Эта информация должна быть включена в спецификацию машины в дополнение к традиционным данным, таким как номинальное напряжение, класс нагревостойкости изоляции, параметры окружающей среды и др. Специфическими параметрами напряжения на зажимах машины являются:

a) основная частота и частота повторения импульсов на зажимах машины;

b) межпиковые напряжения на этих частотах и скачок напряжения, которые могут появиться на зажимах машины;

c) время нарастания импульса t_r.

В таблице 1 приведена степень влияния параметров напряжения на зажимах машины на процесс старения отдельных компонентов изоляционной системы типа II. В машинах, имеющих изоляционные системы типа II, корпусная, межфазная и межвитковая изоляция обычно представляет комбинацию органических и неорганических материалов. Для статорных обмоток с напряжением свыше 700 В в пазу может применяться защитный слой от короны, который в контакте со стенками паза является заземленным экраном для пазовой изоляции. Поверхность изоляции проводника подвержена концентрации напряженности в месте выхода из паза, и для высоковольтной машины она может быть покрыта материалом, выравнивающим напряженность, чтобы избежать возможности появления поверхностных разрядов. Эти пять компонентов (межвитковая, корпусная, межфазная изоляция, система защиты от короны и система выравнивания напряженности электрического поля) образуют типичную изоляционную систе-

му типа II. Межфазное напряжение появляется в случае, когда в пазу лежат две катушки, принадлежащие разным фазам. Однако в этом случае имеются два слоя катушечной изоляции, разделенные изоляционной прокладкой, и поэтому считается, что напряженность поля не достигает столь высоких величин, чтобы отдельно проводить испытания этой компоненты изоляции. Поэтому не предусмотрено специальных испытаний для межфазной изоляции. Компоненты изоляции, подвергающиеся квалификационным и приемочным испытаниям, приведены в таблице 1.

Таблица 1 — Влияние параметров напряжения на зажимах машины, получающей питание от преобразователя, на ускорение старения составляющих изоляционной системы типа II

Элементы изоляции	Основная частота	Частота повторения импульсов	Межпиковое импульсное напряжение (основная частота) $U_{pk/pk}$	Межпиковое импульсное напряжение (на частоте импульсов) $U'_{pk/pk}$	Скачок напряжения	Время нарастания импульса
Межвитковая изоляция	○	●	○	○	●	●
Корпусная изоляция	●	○	●	○	○	○
Системы защиты от короны и выравнивания напряженности электрического поля	○	●	●	●	●	●
Примечание — ○ — менее важный; ● — более важный.						

Для изоляционных систем, спроектированных для применения при частоте сети долгосрочные и краткосрочные эффекты от воздействия номинального напряжения «линия—земля», приложенного к пазовой изоляции и слою выравнивания напряженности электрического поля, являются принципиально важными. Витковая изоляция обычно рассчитывается на самое короткое время нарастания всплеска напряжения, эти всплески обычно очень кратковременны и относительно редки по сравнению с частотой повторяемости импульсов. По этой причине принятые требования обычно удовлетворяются способностью пазовой изоляции выдерживать испытательные напряжения при промышленной частоте и витковой изоляции — при импульсном испытательном напряжении. Для проверки соответствия изоляционной системы расчетному сроку службы обычно достаточно испытания по проверке электрической прочности изоляции при частоте 50 или 60 Гц. Это испытание позволяет конструктору установить возможность длительной работы пазовой изоляции.

В случае питания от преобразователя на входе машины появляется напряжение более сложной формы, что приводит к другому распределению напряженности в обмотке. Корпусная изоляция, системы защиты от короны и выравнивания напряженности электрического поля подвержены амплитудному значению перенапряжения U_b, скорости нарастания и повторяемости импульсов напряжения. Последний из этих факторов может привести к увеличению нагрева из-за роста диэлектрических потерь в пазовой изоляции, системах защиты от короны и выравнивания напряженности электрического поля. При уменьшении времени нарастания импульсов обычно увеличивается напряженность в изоляции между соседними витками во входной многовитковой катушке обмотки. Комбинацию этих факторов и их влияние на изоляционную систему крайне трудно оценить количественно.

7 Квалификационные и приемочные испытания

7.1 Общие положения

Для машин с изоляционными системами типа II, получающих питание от преобразователей, существуют два этапа испытаний. Первый этап — квалификационные испытания корпусной и витковой изоляции. Эти составляющие изоляционной системы определяются конструктивными особенностями, такими как изоляционные материалы, допустимые напряженности поля, технология изготовления, и размерными параметрами, которые присущи каждому отдельному производителю. Это именно те параметры, которые подлежат проверке. Для квалификационных испытаний корпусной изоляции катушки и стержни обмотки подвергаются ускоренному электрическому старению для определения срока службы в зависимости от приложенного напряжения. В некоторых случаях также возможно применение расчетного метода определения срока службы, использующего данные испытаний при повышенном напряже-

нии промышленной частоты. Отдельное испытание предусмотрено для витковой изоляции. Если можно было показать, что витковая или корпусная изоляция не подвержены ЧР в течение срока службы, то испытания повышенным напряжением этих компонентов изоляционной системы можно не проводить.

Второй этап — приемочные испытания. Во время них укомплектованные катушки, выполненные по производственным стандартам, подвергаются испытаниям повышенным напряжением при частоте 50 или 60 Гц. Эти испытания проводятся по согласованию между производителем и потребителем.

7.2 Квалификационные испытания

В рамках настоящего стандарта квалификационные испытания проводятся для проверки способности материалов, конструкции и технологии изготовления изоляционных систем обмоток противостоять ЧР при заданных электрических воздействиях. Эти испытания основаны на общих процедурах для определения функциональных свойств изоляционных систем, описанных в IEC 60034-18-1. Согласно им изоляционная система, предназначенная для работы с преобразователем (испытываемая система), сравнивается с изоляционной системой, опыт эксплуатации которой при питании от сети или от преобразователя имеется (эталонная система).

Для изоляционных систем типа II квалификационные испытания для корпусной и витковой изоляции проводятся при повышенном напряжении при комнатной или повышенной температуре (см., например, IEC 60034-18-32). Используя различные повышенные напряжения или частоты можно получить кривую срока службы изоляции (раздел 9). Отметим, что интерактивные механизмы старения витковой и корпусной изоляции в данном регламенте не рассматриваются. Срок службы изоляционной системы в условиях импульсного напряжения питания может быть получен из кривой срока службы, полученной при синусоидальном питании, на базе следующих допущений:

a) степень старения при питании импульсным и синусоидальным напряжением одинакова при равных межпиковых напряжениях и числе основных периодов напряжения;

b) экспонента срока службы n не зависит от частоты при частотах менее 1 кГц.

Испытания систем защиты от короны и выравнивания напряженности электрического поля проводятся путем отдельного испытания на старение. При этом представительные образцы изолированной обмотки, расположенные в аналогичных реальным пазах, подвергаются воздействию импульсных напряжений, подобных тем, которые существуют при эксплуатации. Испытание проводится в течение времени, достаточного для того, чтобы выяснить, появились ли видимые повреждения в виде изменения цвета или выгорания.

Использование результатов эксплуатации в качестве альтернативы квалификационным испытаниям является предметом соглашения между производителем и потребителем.

7.3 Приемочные испытания

Для изоляционных систем типа II укомплектованные катушки в аналогичных реальным пазах подвергаются воздействию синусоидального напряжения с величиной межпикового напряжения, в 4,3 раза превышающим таковое при питании от преобразователя, и частотой 50 или 60 Гц, приложенного к корпусной изоляции в течение 250 ч (приложение В). Это является достаточным испытанием для корпусной изоляции, и прохождение этого испытания не подразумевает приемлемого срока службы при питании от преобразователя. Этот результат можно принять на договорный период и таким образом установить отсутствие серьезных недостатков в процессе производства.

8 Квалификационные испытания витковой изоляции

8.1 Общие положения

Витковая изоляция катушек при питании обмотки синусоидальным напряжением обычно проверяется на способность противостоять короткое время напряжению с большой амплитудой. Беспокойство может вызывать отличие конструкции витковой изоляции от корпусной, поскольку они могут отличаться материалами, размерами и технологией изготовления.

Квалификационные испытания витковой изоляции могут потребоваться в зависимости от ожидаемого в машине напряжения «фаза—земля». Существенными свойствами этого напряжения, влияющими на процесс старения межвитковой изоляции, являются время нарастания импульса и амплитуда скачка напряжения. С точки зрения конструкции катушки витковая изоляция является частью корпусной, и ей соответствует процесс старения, описанный в разделах 7 и 9.

При синусоидальном питании в большинстве случаев межвитковая изоляция не подвержена на практике значительным электрическим воздействиям. Ее принципиальная роль заключается в противостоянии случайным всплескам напряжения и подобным явлениям. Однако при питании от преобразователей частоты с уменьшением времени нарастания импульса напряженность поля, связанная со скачком напряжения, начинает смещаться в сторону межвиткового промежутка, особенно в его угловые области. При эксплуатации это может приводить к электрическому и тепловому старению витковой изоляции. Напряженность между витками возрастает с уменьшением времени нарастания импульса, увеличивая возможность появления ЧР в межвитковой изоляции. Влияние ожидаемого напряжения «фаза—земля» на витковую изоляцию зависит также от числа витков в катушке. При питании от сети могут случайно появляться импульсы перенапряжения, чего не происходит при питании от преобразователя. Поэтому при питании от сети витковая изоляция не подвержена электрическому старению, которое может происходить при питании от преобразователя из-за высокой частоты повторения импульсов.

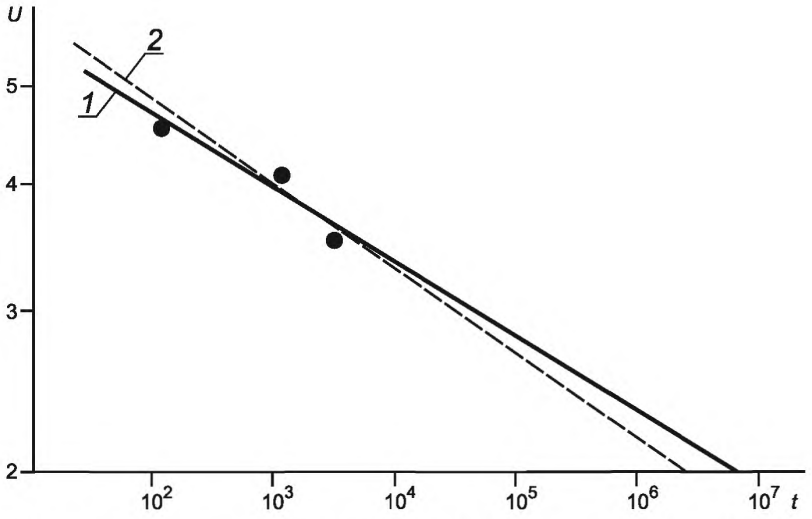
В общем, опыт показывает, что наибольшая концентрация напряжения происходит между первым и вторым витками первой к линейному вводу катушки. Но вследствие возможного отражения волны напряжения процесс старения может затронуть и внутренние витки катушки.

8.2 Методы испытаний

Цель испытаний — показать, что срок службы витковой изоляции при электрических воздействиях является приемлемым. Это же касается корпусной изоляции. Образцы состоят из двух одинарных витков, сформированных так, как показано в 11.2. Считается, что производитель будет знать величину максимального межпикового напряжения между витками в процессе эксплуатации. Эта величина должна быть увеличена на коэффициент безопасности в соответствии с нормами производителя, чтобы получить базовое испытательное межпиковое напряжение U_{turn}. Если максимальное межпиковое напряжение между витками в процессе эксплуатации неизвестно, принимается, что полный скачок напряжения приходится на первую катушку. Поэтому испытательное напряжение равно скачку напряжения, деленному на число витков катушки и умноженному на коэффициент безопасности. В случае многослойной катушки U_{turn} принимается равным скачку напряжения, деленному на число слоев и умноженному на коэффициент безопасности. Сюда может быть включено добавочное увеличение напряжения из-за возможного отражения его бегущей волны. Это увеличение зависит от времени нарастания импульса.

Испытание проводится в два этапа. На первом — U_{turn} является синусоидальным напряжением частотой 50 или 60 Гц и прикладывается между двумя проводниками испытуемого образца в течение 60 с. Если ЧР отсутствуют, нет необходимости проводить квалификационные испытания. Если наблюдаются ЧР, проводится испытание при повышенном напряжении. Оно заключается в приложении повторяющихся импульсов напряжения, как описано в IEC 62068-1, или в приложении синусоидального напряжения с частотой, равной (или выше) частоты повторения импульсов преобразователя, между двумя проводниками испытуемого образца до пробоя изоляции. Предлагаемые примеры значений напряжения равны 4,5, 4,0 и 3,5 U_{turn}. Число испытательных напряжений — не менее трех. Пять образцов следует испытывать при каждом из этих напряжений. Время до пробоя может быть рассчитано с использованием известных статистических методов (см. IEC 62539). Затем может быть построена зависимость времени пробоя межвитковой изоляции в функции испытательного напряжения, как показано на рисунке 6 (шкала времени — в логарифмическом масштабе).

Эту зависимость можно затем сравнить с аналогичной зависимостью для корпусной изоляции, чтобы показать наибольший срок службы при напряжении, которое будет при эксплуатации. Поскольку неэффективно экстраполировать полученную зависимость на значительное удаление от экспериментальной области, достаточно, чтобы срок службы витковой изоляции был равен или больше срока службы корпусной изоляции. Достоверность обеспечивается частичным перекрытием 90 % доверительных интервалов сроков службы и коэффициентов увеличения напряжения для зависимостей сроков службы межвитковой и корпусной изоляции при времени старения, большей 1000 ч. Выявлено, что удовлетворительная кривая срока службы непригодна для целей сравнения. В этом случае производитель является ответственным за обеспечение пригодной конструкции изоляции.



1 — срок службы межвитковой изоляции; *2* — срок службы корпусной изоляции; *t* — время до пробоя;
$U = U_{испыт}/U_{turn}$ — для витковой изоляции; $U = U_{испыт}/U_{ном}$ — для корпусной изоляции

Рисунок 6 — Срок службы межвитковой и корпусной изоляции

9 Квалификационные испытания корпусной изоляции

9.1 Общие положения

Желательно, чтобы при испытаниях использовался процесс ускоренного электрического старения. При этом необходимо избегать применения механизма пробоя, который не присутствует при эксплуатации. Когда ускорение достигается за счет увеличения приложенного напряжения (межпикового), технически можно изменить уровень активности ЧР при каждом импульсе. С другой стороны частота повторения импульсов испытательного напряжения может быть увеличена сверх основной частоты, при которой привод работает в реальных условиях. Это делается с целью сохранения уровня активности ЧР, и добиться ускорения процесса старения за счет увеличения частоты повторения импульсов. В этом случае возможно увеличение температуры изоляции из-за потерь, зависящих от частоты, в самой изоляции и в системе выравнивания напряженности электрического поля. Это увеличение может быть уменьшено благодаря форсировке воздушного охлаждения. Чтобы убедиться, что температура изоляции не превышает допустимую для данного класса нагревостойкости, необходимо измерять температуру в ее наиболее нагретых точках.

Контроль температуры может осуществляться с помощью обычной техники. Применение термометок или термочувствительных красок является достаточно простым способом, но не дает требуемой точности, в то время как в случае применения термопар могут появиться электромагнитные наводки, и их сложно применять для высоковольтной изоляции. Бесконтактные методы измерения температуры такие, как инфракрасная термография, позволяют просто и точно идентифицировать горячие точки изоляции. Мониторинг процесса старения может осуществляться через определенные интервалы времени путем измерения электрических параметров, таких как активность ЧР, тангенс угла потерь и диэлектрической проницаемости изоляции. С целью диагностики эти испытания могут проводиться при частоте 50 или 60 Гц.

9.2 Методы испытаний

Методики ускоренного электрического старения описаны в стандартах IEC 61251, 62068-1 и 60034-18-32. Они основаны на сравнении определения срока службы предлагаемой и референтной изоляционной системы, уже допущенной к работе. Обычная модель срока службы выглядит следующим образом

$$L = kU^{-n},$$

где L — срок службы испытуемого объекта;

k — константа;

U — периодически прикладываемое импульсное напряжение;

n — коэффициент увеличения напряжения.

Для получения требуемой зависимости срока службы (логарифмический масштаб времени) от приложенного напряжения, в три и более раз превышающего расчетное, может понадобиться специальная методика. Испытательное напряжение следует выбирать таким образом, чтобы время до пробоя изоляции находилось в диапазоне 100—3000 ч. Предлагаемую и референтную изоляционные системы следует испытывать при одинаковых условиях, которые могут осуществляться при предварительно определенной форме напряжения. Статистический анализ результатов для определения срока службы при каждом из испытательных напряжений следует проводить в соответствии с IEC 62539. Коэффициент увеличения напряжения равен наклону линии регрессии (см. IEC 60216-3). Срок службы предлагаемой изоляционной системы должен быть, по крайней мере, равен таковому для референтной системы, испытанной при частоте 50 или 60 Гц и для которой показано, что она имеет приемлемый срок службы. Эквивалентирование обеспечивается частичным перекрытием 90 % доверительных интервалов сроков службы и коэффициентов увеличения напряжения для зависимостей сроков службы предлагаемой и референтной систем при времени старения не менее 1000 ч. Невозможность получения линейной регрессии в логарифмических координатах по обеим осям указывает на изменение механизма старения во время испытаний.

Во многих работах показано, что на витковую и корпусную изоляцию не оказывает существенного влияния частота напряжения, умноженная на частоту импульсов, или число циклов напряжения до пробоя. Поэтому во многих случаях для расчета ожидаемого срока службы при заданной величине пикового напряжения можно использовать следующую формулу

$$L_2 = L_1 f_1 / f_2,$$

где L_2 — срок службы при частоте f_2,

L_1 — срок службы при частоте f_1.

Комбинация частоты и напряжения для времени старения приводит к следующей формуле

$$L_{f2,U2} = L_{f1,U1}\,(U_1/U_2)^n\,(f_1/f_2),$$

где $L_{f2,U2}$ — срок службы при частоте f_2 и напряжении U_2;

$L_{f1,U1}$ — срок службы при частоте f_1 и напряжении U_1.

Использование этой формулы позволяет проводить испытание витковой и корпусной изоляции при разных напряжениях и частотах. Существует экспериментальное подтверждение справедливости такого приближения при расчете срока службы для синусоидального и импульсного напряжения при частотах до 1 кГц. Однако для более высоких частот, которые применяются в отдельных системах, значение показателя степени n в зависимости от частоты следует определять в соответствии с Приложением В. Если значение n не известно, то грубые расчеты могут осуществляться на базе известного диапазона изменения n для изоляции, выполненной на основе «слюда-эпоксидная смола». Этот диапазон равен 10—12. Доминирующим фактором электрического старения изоляции является межпиковое напряжение при основной частоте. Оно не совпадает с межпиковым напряжением, полученным из разложения питающего напряжения в ряд Фурье. Для изоляционных систем при питании от преобразователей старение зависит и от скачков напряжения. Однако, поскольку большинство преобразователей, используемых с изоляционными системами типа II, являются, по крайней мере, трехуровневыми, влияние на процесс старения оказывается менее существенным, чем при использовании двухуровневых преобразователей, благодаря меньшему межпиковому напряжению при частоте импульсов. Тем не менее, возможно необходимо принимать во внимание меньшее влияние на процесс старения межпикового напряжения на частоте импульсов. Это можно учесть, используя методику, приведенную в Приложении В на основе приведенной выше общей формулы срока службы.

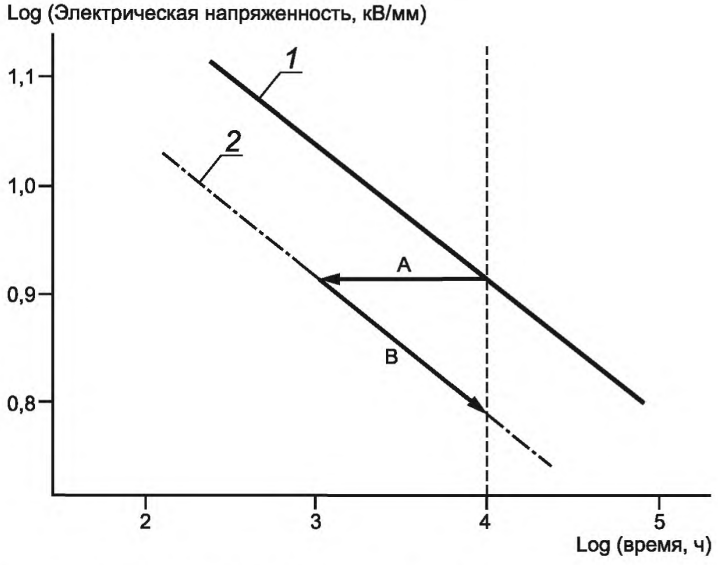
Расчет вклада импульсов напряжения в процесс старения на частоте их повторения для значений n в диапазоне от 8 до 12 для различных коэффициентов перенапряжения приведен в таблице В.1 применительно к трехуровневым преобразователям. Для современной практики частота повторения импульсов 1 кГц является репрезентативной. Для $n > 10$ вклад частоты импульсов напряжения в процесс старения изоляции незначителен при частоте до 1 кГц.

9.3 Использование данных о сроке службы изоляции при частоте 50 или 60 Гц для прогнозирования срока службы при питании от преобразователя

Типичная кривая времени жизни для изоляционной системы типа II, полученная по испытаниям при повышенном напряжении частотой 50 или 60 Гц, приведена на рисунке 7. Зависимость напряженности электрического поля в корпусной изоляции (кВ/мм) в функции времени до ее пробоя (часы) построена в логарифмических координатах для стержня обмотки статора. Обычно эта зависимость представляет

собой прямую, и производитель из опыта эксплуатации будет знать, что конструкция изоляции, отвечающая такой зависимости, будет иметь приемлемый срок службы. Для машин, питающихся от преобразователя, напряженность рассчитывается на базе межпикового напряжения, приходящегося при работе на корпусную изоляцию.

Ожидается, что такая же изоляционная система может быть подвергнута испытаниям при основной частоте, например, в 10 раз большей, чем при получении исходной зависимости. То есть допускается, что для получения приемлемого срока службы при этих рабочих условиях можно, как показано на рисунке 7, перевести исходную точку влево (стрелка А) на одну декаду по времени. Производитель может затем компенсировать это изменение путем уменьшения напряженности в корпусной изоляции, передвигаясь вниз по этой прямой и тем самым восстанавливая исходный срок службы (кривая В). С другой стороны, если рабочая частота равна 0,1 от той, при которой получена эта зависимость, линия жизни переносится вправо на одну декаду по времени, и напряженность поля может быть увеличена для восстановления исходного срока службы.



1 — зависимость, полученная по результатам испытаний при повышенном напряжении промышленной частоты;
2 — предсказанная зависимость для той же изоляции при питании от преобразователя с в 10 раз большей частотой

Рисунок 7 — Пример срока службы корпусной системы изоляции типа II

10 Квалификационные испытания системы защиты от короны и выравнивания напряженности электрического поля

10.1 Общие положения

Если система выравнивания напряженности располагается на лобовых частях обмотки, необходимо подвергать ее квалификационным испытаниям. Для этого требуется применение тех же напряжения и частоты повторения импульсов, что появляются при рабочих условиях. Если применяются полупроводниковые материалы, такие как карбид кремния, то они имеют нелинейную характеристику активного сопротивления. Другие материалы обладают линейной характеристикой. На их способность контролировать уровень напряженности влияет частота, напряженность электрического поля, температура и время. В других случаях выравнивание напряженности может быть достигнуто за счет емкостных свойств системы. Для испытаний производитель выбирает такие значения межпикового напряжения, частоты повторения и время нарастания импульса, чтобы убедиться, что при эксплуатации эти параметры соответствуют применяемым при испытаниях или являются менее тяжелыми. Увеличение частоты приводит к уменьшению расстояния, на котором выравнивается поверхностная электрическая напряженность в лобовых частях обмотки, что приводит к росту напряженности. Когда она достигает уровня 500 В/мм, могут начаться дуговые разряды, приводящие к эрозии поверхности или образованию проводящих дорожек на поверхности изоляции.

Увеличение электрической напряженности приводит к уменьшению активного сопротивления материала, что соответствует первичным целям его применения. К сожалению, это приводит также к увеличению нагрева. У машин, получающих питание от преобразователя, существует противоречие между обеспечением достаточно малого активного сопротивления для выравнивания напряженности и достаточно большого сопротивления для обеспечения приемлемого уровня нагрева. Увеличение поверхностной температуры лобовых частей машины, получающей питание от преобразователя, может быть как малым (10 К), так и большим (40 К) при отсутствии форсированного охлаждения. Наиболее существенное влияние на нагрев изоляции оказывают электрические потери в обмотке, но нагрев материала для выравнивания напряженности может оказывать существенное влияние на температуру изоляции. При расчете принятой для данной изоляции предельной рабочей температуры этот фактор необходимо принимать во внимание, так как он уменьшает допустимую номинальную температуру машины.

Было выявлено, что, например, для материала для выравнивания напряженности с нелинейной характеристикой существуют два принципиальных эффекта влияния температуры. Первый заключается в немедленном росте проводимости материала при определенной напряженности поля. Аналогичным образом снижается рабочая точка на кривой «проводимость — электрическая напряженность», от которой зависит успешная работа материала на основе карбида кремния. В некоторых случаях может быть утрачена нелинейная зависимость проводимости от напряженности поля.

Второй эффект может заключаться в постоянном уменьшении проводимости от температуры. После одиночного кратковременного периода работы (несколько часов) при 155 °С возвращение к температуре 20 °С показывает значительное уменьшение проводимости. После длительной, скажем 500 ч, работы при 155 °С свойства материала частично восстанавливаются. Это связано со свойствами смолы, содержащейся в материале, которая подвержена термической усадке, из-за чего частицы кремния располагаются ближе друг к другу.

Система защиты от короны применяется для предотвращения разрядов в пазу, она может быть выполнена на основе кремниевых лент или путем нанесения красок. В области выхода обмотки из паза может возникнуть проблема электрического контакта с системой выравнивания напряженности. Если хороший электрический контакт предусмотрен конструкцией системы изоляции, высокое контактное сопротивление может являться следствием перегрева и ЧР, которые приводят к разрушению материала и работы системы выравнивания напряженности в лобовых частях обмотки. При использовании емкостных свойств материала между этими покрытиями не требуется наличия непосредственного контакта.

Конструкция системы выравнивания напряженности является критическим элементом для достижения ее успешной работы. Определяющими факторами являются выбор материалов и способ их применения.

10.2 Методы испытаний

Целью квалификационных испытаний системы выравнивания напряженности является обеспечение гарантии того, что она будет работать удовлетворительно в течение всего срока службы. Критерием удовлетворительной работы является отсутствие поверхностных разрядов, а рост поверхностной температуры лобовых частей не приводит к росту температуры корпусной изоляции сверх длительно допустимой.

На срок службы системы выравнивания напряженности влияют приложенное напряжение и температура. В идеальном случае необходимо провести испытание, при котором стержень обмотки с системой выравнивания напряженности и защитой от короны размещается в подготовленных пазах и подвергается воздействию импульсов напряжения, в 1,3 раза бульших, чем на практике. Стержни могут быть короче, чем в реальной машине, чтобы уменьшить емкостную нагрузку на генератор импульсов. Однако все его остальные конструктивные параметры должны быть сохранены. Испытание должно продолжаться в течение 100 ч.

Стоимость лабораторного оборудования, обеспечивающего требуемые высоковольтные импульсы напряжения, может оказаться значительным. Кроме того, для получения испытательных импульсов обычно не используется преобразователь, предназначенный для рабочего режима привода. Предположение, сделанное при испытании простого экрана, встречает трудности при испытании системы выравнивания напряженности. При этом отпадает необходимость в использовании промышленных преобразователей, вместо них применяются схемы для получения импульсов с использованием искровых промежутков. Пример такой схемы, которая может быть использована для испытаний, приведен в приложении А.

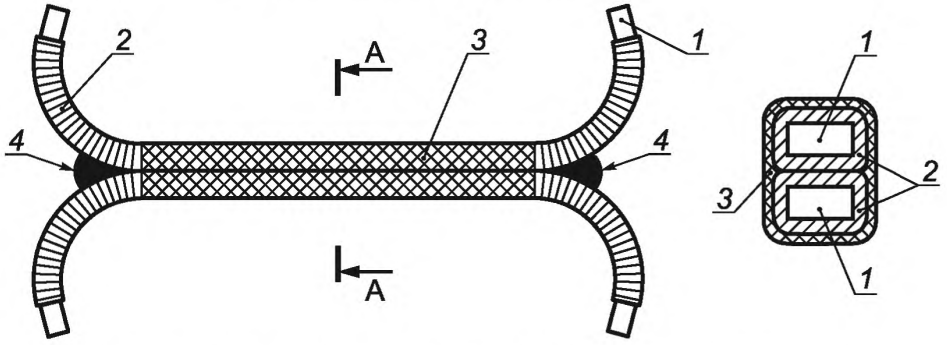
11 Подготовка объектов испытаний

11.1 Общие положения

Объекты испытаний в данном разделе предназначены для проверки составляющих изоляции, приведенных в таблице 1. Образцы выполняются из тех же материалов и по той же технологии, которая используется при промышленном производстве.

11.2 Образцы межвитковой изоляции

Образцы межвитковой изоляции должны представлять изоляционную систему, используемую в машине, как с точки зрения применяемых материалов, так и по ее размерам. Пара проводников соединяется вместе (рисунок 8) с выводами, разведенными в разные стороны, и выполненными в соответствии с производственными требованиями. Изолированные проводники соприкасаются на длине соответствующей пазовой части, чтобы симулировать контакт между ними в катушке обмотки. Для обеспечения контакта, возможно, необходимо использовать процесс прессования и (или) вакуумную пропитку под давлением, как того требуют материалы и конструкция изоляции. Обмотки из круглого провода могут иметь различную конструкцию, такую как состоящую из витых пропитанных пар. Испытуемые образцы витковой изоляции серийных машин описаны в IEC/TS 60034-18-41.



1 — медный проводник, *2* — витковая изоляция, *3* — бандаж, *4* — непроводящий силиконовый наполнитель (или аналогичный ему состав)

Рисунок 8 — Пример конструкции испытуемого образца межвитковой изоляции обмотки из прямоугольного провода

Радиус изгиба проводников должен быть не меньше минимального радиуса, применяемого в промышленных образцах обмотки. Гибкий барьер, выполненный из полиамидной пленки, может использоваться между загнутыми частями проводников, если на практике пробоя на этих участках витка не наблюдается.

11.3 Изоляция катушек

При квалификационных испытаниях корпусной изоляции и системы выравнивания напряженности катушки, выполненные по производственной технологии, размещаются в соответствующих пазах. В этом случае испытуемые образцы выполняются по полной заводской технологии, а длина пазов может быть короче, чем в реальной машине, чтобы минимизировать емкостную нагрузку.

12 Порядок квалификационных испытаний

12.1 Общие положения

На практике не существует ни одного метода испытаний, который позволит смоделировать все взаимодействия между различными составляющими изоляционной системы, приведенными в таблице 1. Например, получение кривой срока службы корпусной изоляции путем приложения повышенного напряжения может привести к повышенным нагрузкам в системе выравнивания напряженности. Поэтому квалификационные испытания разделяются не несколько отдельных. Во всех случаях источник питания следует выбирать так, чтобы обеспечить требуемое напряжение, частоту повторения и время нарастания импульсов на зажимах испытуемого образца.

Во-первых, целью испытаний является получение срока службы жизни корпусной и витковой изоляции, по которой можно рассчитать срок ее службы при работе машины от преобразователя. Установлено, что ЧР могут иметь место между витковой и корпусной изоляцией. Поскольку изоляция «фаза—земля» включает в себя витковую изоляцию, квалификационные испытания должны предусматривать это обстоятельство. Старение осуществляется путем приложения повышенного напряжения или частоты или того и другого одновременно. Форма напряжения, используемая для осуществления процесса старения образцов корпусной или витковой изоляции, может быть синусоидальной или импульсной. Для получения статистически достоверной информации испытаний должно быть предусмотрено достаточное количество образцов изоляции. Во-вторых, целью испытаний является установление того факта, что система защиты от короны и выравнивания напряженности электрического поля пригодны для эксплуатации. Эти испытания проводятся с использованием импульсной формы напряжения.

12.2 Образцы межвитковой изоляции

Испытуемые образцы витковой изоляции должны иметь конструкцию, технологию и материалы такие же, как изоляция промышленных обмоток. Рекомендуется проводить испытания, по крайней мере, пяти образцов для каждого испытательного напряжения в условиях окружающей среды. Образцы должны быть отделены друг от друга во избежание пробоя между выводными концами.

Испытания на ЧР первоначально проводятся на пяти образцах при максимальном рабочем межвитковом межпиковом напряжении, умноженном на коэффициент безопасности (U_{tum}). Испытательное напряжение, приложенное между витками, может иметь синусоидальную форму и частоту 50 или 60 Гц в условиях окружающей среды. Если ЧР обнаружены в течение 60 с, кривая срока службы должна определяться во время испытаний при повышенном напряжении. Эти испытания проводятся так, как описано в разделе 8.2, с использованием, по крайней мере, трех значений напряжения для получения срока службы витковой изоляции. Если установлено, что между соседними витками катушки при эксплуатации не наблюдается ЧР, возможно отсутствует необходимость в испытании образцов межвитковой изоляции.

12.3 Изоляция катушек

Целью испытаний является получение срока службы корпусной изоляции, используя повышенное напряжение и (или) частоту. Должны быть выбраны, по меньшей мере, три напряжения или частоты и их предельные значения, при которых произойдет пробой изоляции. Расчет срока службы при питании от преобразователя проводится в соответствии с рекомендациями 9.2, и его сравнивают с приемлемым сроком службы, полученным для изоляционной системы, которая показала приемлемый срок службы при эксплуатации при промышленной частоте. При каждом испытании проверяют минимум пять образцов. Для уменьшения емкостной нагрузки на испытательное оборудование длина образцов обмотки или стержня может быть уменьшена при сохранении остальных параметров, используемых при их производстве. Если установлено, что при эксплуатации машины при питании от преобразователя не наблюдались ЧР в корпусной изоляции, то возможно отпадает необходимость в проведении ее квалификационных испытаний.

Установлено, что при применении систем выравнивания напряженности на изоляции лобовых частей обмотки, они могут находиться в неприемлемых условиях во время испытаний на определение срока службы всей катушки при повышенном напряжении. Поэтому катушки могут испытываться при облегченных условиях, таких как наличие дополнительных слоев изоляции, чтобы убедиться, что пробой происходит только в корпусной изоляции. Во время проведения испытаний система выравнивания напряженности может быть подвергнута ремонту.

12.4 Образцы системы выравнивания напряженности

В случае применения системы выравнивания напряженности в лобовых частях обмотки ее образцы следует изготавливать в соответствии с требованиями 9.2 и размещать в репрезентативных или аналогичных промышленным заземленных пазах. Затем образцы подвергаются испытанию импульсным напряжением в течение 100 ч, которое удовлетворяет требованиям 9.1. Испытания следует проводить при комнатной температуре, а также при максимальной температуре, которая ожидается при работе машины. Импульсы напряжения по величине должны быть, по крайней мере, в 1,3 раза большими, чем те, которые существуют при работе машины. Кроме того, время нарастания импульса должно быть настолько же мало, а частота их повторения настолько же велика, как и при работе машины. Количество образцов должно удовлетворять получению статистически достоверных данных. Рекомендуется при каждой температуре испытывать не менее пяти образцов.

Область изоляции вне заземленных пазов следует контролировать с целью обнаружения горячих точек с использованием приборов инфракрасной термографии. Испытания могут проводиться при тех

же условиях в затемненном помещении, чтобы убедиться в отсутствии ЧР на поверхности лобовых частей. Опыт показывает, что если ЧР имеют место, то их можно обнаружить визуально по истечении примерно 20 минут.

13 Критерии прохождения квалификационных испытаний

13.1 Образцы межвитковой изоляции

Если приложенное между проводниками напряжение U_{turn} не приводит к росту активности ЧР в любом из пяти испытуемых образцов, нет необходимости подвергать изоляцию квалификационным испытаниям. Если активность ЧР наблюдается при испытании одного или нескольких образцов, срок службы витковой изоляции следует сравнить со сроком службы корпусной изоляции. Если значение коэффициента увеличения напряжения и срока службы при его выбранном относительном значении (обычно 50 % от номинального) эквивалентно таковым для корпусной изоляции, испытанной при частоте 50 или 60 Гц и прошедшей квалификационные испытания для работы с преобразователем, то межвитковая изоляция считается прошедшей эти испытания. Эквивалентность предполагается при любом частичном перекрытии 90 процентных доверительных интервалов сроков службы и коэффициентов увеличения напряжения кривых сроков службы для материалов межвитковой и корпусной изоляции для временнóго интервала свыше 1000 ч. Известно, что удовлетворительная кривая жизни может быть непригодна для целей сравнения. В этом случае производитель несет ответственность за обеспечение удовлетворительной конструкции изоляции.

13.2 Образцы изоляции катушек

Срок службы, полученный при испытаниях повышенным напряжением, следует преобразовать в соответствии с рекомендациями 9.3. Значение коэффициента увеличения напряжения и срока службы при его выбранном относительном значении (обычно 50 % от номинального) должны быть эквивалентны таковым для обычной изоляции, испытанной при частоте 50 или 60 Гц, что показало бы ее приемлемый срок службы. Эквивалентность предполагается при любом частичном перекрытии 90 процентных доверительных интервалов сроков службы и коэффициентов увеличения напряжения кривых сроков службы для испытуемого и референтного материалов для временнóго интервала свыше 1000 ч.

13.3 Образцы системы выравнивания напряженности

Отсутствие ЧР можно наблюдать невооруженным глазом в затемненном помещении через 20 мин испытаний импульсным напряжением. Температура наиболее нагретых точек, измеренная на поверхности лобовых частей испытуемых объектов, не должна превышать температуру изоляции сверх допустимой при максимальной ожидаемой рабочей температуре машины. Не должно быть обнаружено никаких видимых невооруженным глазом (т. е. без использования микроскопа или лупы) повреждений наружной поверхности лобовых частей после 100 ч испытаний импульсным напряжением.

14 Приемочные испытания для изоляционных систем типа II (типовые испытания)

14.1 Общие положения

Изоляционные системы типа II подвергаются ускоренному старению при использовании напряжения синусоидальной формы частотой 50 или 60 Гц, и до заранее указанного срока не должно произойти их пробоя. Решение о результатах приемочных испытаний должны быть согласованы между производителем и потребителем.

14.2 Методика приемочных испытаний

Катушки, выполненные по производственным стандартам, размещаются в аналогичных промышленным заземленных пазах и подвергаются испытаниям синусоидальным напряжением частотой 50 или 60 Гц с межпиковым напряжением, равным 4,3 максимального межпикового напряжения «фаза—земля», которое появляется на катушке при ее работе от преобразователя. Коэффициент увеличения напряжения, равный 4,3, связан с экспонентой срока службы n, равной 10. Все измерения, связанные с системами выравнивания напряженности и защиты от короны, должны производиться заранее. Сначала проводятся испытания корпусной изоляции, и условия испытаний могут оказаться слишком тяжелыми для того, чтобы система выравнивания напряженности выдержала полное время испытаний. Поэтому

разрешен ремонт этой системы во время испытаний. Испытания проводятся при комнатной температуре и влажности по крайней мере на двух образцах катушек по согласованию между производителем и потребителем.

14.3 Критерий прохождения приемочных испытаний

После 250 ч испытаний не должно быть отказа ни одного из образцов из-за электрического пробоя. Если произойдет пробой любого из образцов, может быть проведен анализ причин пробоя. Затем испытания следует повторить на новых улучшенных образцах.

Примечание — Опыт показывает, что 400 ч испытаний с коэффициентом увеличения напряжения, равным 4,3, является эквивалентным критерием и может использоваться.

15 Анализ результатов, отчет и классификация

К анализу результатов, отчету и классификации может быть применен подход, приведенный в подразделе 5.6 IEC 60034-18-1, так, чтобы все соответствующие данные могли быть корректно проанализированы и отражены в отчете.

Приложение А
(справочное)

А.1 Схема испытаний импульсным напряжением на основе искрового промежутка

Электрическая схема, приведенная на рисунке А.1 и предназначенная для лабораторных испытаний, позволяет получать импульсы, аналогичные по амплитуде, частоте повторения и времени нарастания тем, которые используются в настоящее время в промышленных приводах. Признано целесообразным применение такой схемы для испытаний межвитковой изоляции и системы выравнивания напряженности, но не для испытаний целых катушек.

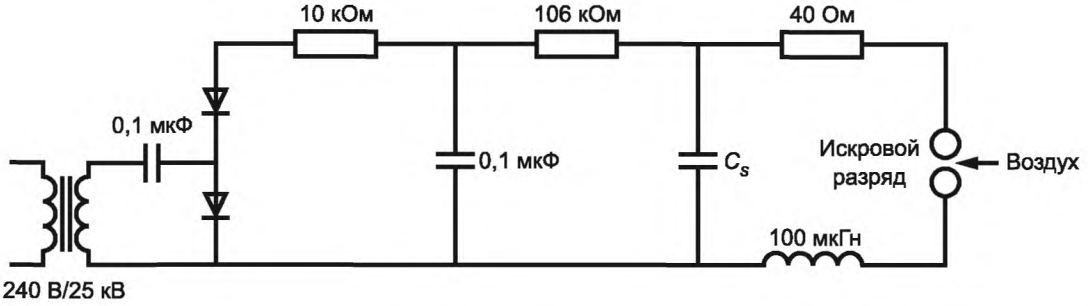


Рисунок А.1 — Пример простой электрической схемы, моделирующей работу преобразователя

В этой схеме образец стержня C_s обычно имеет емкость 2 нФ. Если его емкость оказывается меньше, то необходимо добавить параллельно ему дополнительную емкость для получения требуемого значения. Искровой разряд выполнен с помощью двух вольфрамовых стержней диаметром 10 мм с полусферическими наконечниками, и для работы он требует продувки воздухом с давлением 2 бара. Стержни устанавливаются на расстоянии около 2 мм для получения пробоя при напряжении 7 кВ, на расстоянии 2,5 мм для пробоя при 10 кВ и на расстоянии 3 мм для пробоя при 12 кВ. В этих условиях генерируются импульсы с максимальной частотой повторения 3,5 кГц и средней частотой повторения 1,5 кГц. Вариации возникают из-за процесса однополупериодного выпрямления. Импульс имеет спадающую форму до момента пробоя, после которого напряжение за 1,5 мкс возрастает до межпикового напряжения 16 кВ (см. рисунок А.2). Максимальное значение производной dU/dt = 15 кВ/мкс. После импульса наблюдаются небольшие колебания напряжения, но они имеют большое время нарастания и малы по величине. Частота повторения импульсов, их время нарастания и межпиковое напряжение могут изменяться путем изменения параметров схемы. Некоторые резисторы и диоды нуждаются в дополнительном охлаждении. Опыт показывает, что при этих условиях вольфрамовым наконечникам может требоваться зачистка через каждые 24 часа работы.

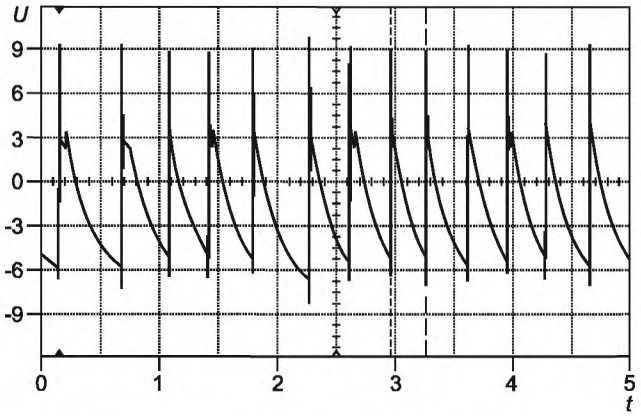


Рисунок А.2 — Типичные осциллограммы напряжения, генерируемого искровым разрядником (U, кВ; t, мс)

Приложение В
(справочное)

В.1 Расчет старения изоляции для случая трехступенчатого преобразователя

В этом приложении приводятся примеры факторов ускоренного старения корпусной изоляции машин, получающих питание от трехуровневого преобразователя. Показан эффект электрического старения, а тепловое старение не учитывается. Сделаны следующие допущения:

a) Применяется общая формула срока службы, приведенная в 9.2.

b) Значение коэффициента n не изменяется в рассматриваемом диапазоне напряжений и частот.

Трехуровневый преобразователь, выбранный в качестве примера, имеет частоту повторения импульсов 1 кГц, что является общепринятым. Вклад в процесс старения от импульсов преобразователя дается в процентах от общего старения изоляции для различных значений перенапряжений U_b/U_a (см. рисунок 1 настоящего стандарта).

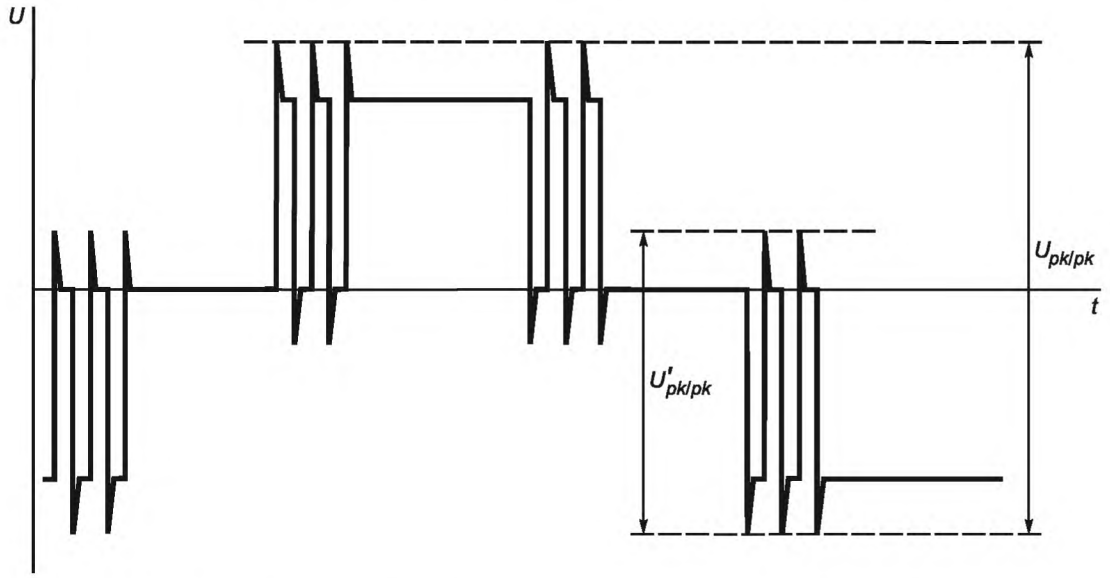


Рисунок В.1 — Представление напряжения «фаза—земля» на зажимах машины при ее питании от трехуровневого преобразователя

Расчет, используемый для каждой составляющей старения изоляции, основан на формуле, приведенной в 9.2. Степень старения на один импульс пропорциональна $1/L$. Поэтому в качестве примера для основной частоты импульсов 50 Гц и основного межпикового напряжения $U_{pk/pk}$ вклад в старение за 20 мс составит

$$\text{степень старения (50 Гц)} = (U_{pk/pk})^n/k,$$

где k — константа.

Для трехуровневого преобразователя, не имеющего перенапряжений, вклад в старение от импульсов частотой 1 кГц за время свыше 20 мс составит (см. рисунок В.1):

$$\text{степень старения (1 кГц)} = 20\ (U'_{pk/pk})^n/k.$$

Согласно кумулятивной теории старения и отсутствии синэнергизма общая степень старения равна сумме этих двух составляющих.

Таблица В.1 получена подстановкой соответствующих значений приведенных выше двух уравнений. В качестве примера перенапряжение в 20 % (см. рисунок В.1) даст

$$U'_{pk/pk} = 1{,}4\ U_a,\ U_{pk/pk} = 2{,}4U_a,$$

и процентный вклад в старение от импульсов преобразователя для n =10 будет равен

$$1{,}4^{10} \times 20 \times 100/2{,}4^{10}.$$

Таблица В.1 — Вклад в электрическое старение изоляции импульсов частотой 1 кГц от трехуровневого преобразователя в процентах от старения при основной частоте 50 Гц для различных коэффициентов увеличения напряжения

Коэффициент перенапряжения U_b/U_a	Частота импульсов	n = 8	n = 9	n = 10	n = 11	n = 12
0 %	1 кГц	7 %	4 %	2 %	<1 %	>1 %
10 %	1 кГц	14 %	8 %	4 %	2 %	1 %
20 %	1 кГц	27 %	16 %	9 %	5 %	3 %
50 %	1 кГц	78 %	52 %	35 %	23 %	15 %

Приложение С
(справочное)

С.1 Расчет напряжения при проведении приемочных испытаний

Опыт применения в промышленности показывает, что корпусная изоляция машины при питании от сети (синусоидальная форма напряжения) способна выдержать, по крайней мере, 250 ч работы при линейном напряжении в 2,5 раза больше номинального при испытании повышенным напряжением. Это эквивалентно напряжению «фаза—земля» в 4,3 раза больше номинального. В случае питания от преобразователя значение номинального напряжения не определено, и связь между межфазным напряжением и напряжением «фаза—земля» становится более сложной. Тем не менее, считается, что механизм старения корпусной изоляции зависит от межпикового напряжения и частоты повторения импульсов, также как и при питании от сети. Это допущение позволяет провести эквивалентирование приемочных испытаний для машин, получающих питание от преобразователя, путем следующих расчетов.

Напряжение при приемочных испытаниях обмоток, получающих питание от сети, равно

- 2,5 $U_{ном}$ (действующее значение) в течение по крайней мере 250 ч;
- 2,5 $\sqrt{3}\,U_0$ (U_0 — действующее напряжение «фаза—земля»);
- 2,5 $\sqrt{3}/(2\sqrt{2})$ × межпиковое напряжение «фаза—земля».

Поэтому напряжение при приемочных испытаниях обмоток, получающих питание от преобразователя, равно

$$2{,}5\sqrt{3}/(2\sqrt{2}) \times \text{максимальное межпиковое напряжение «фаза—земля»}.$$

Например, если максимальное межпиковое напряжение «фаза—земля» на обмотке при питании от преобразователя равно 8 кВ, то действующее значение напряжения при приемочных испытаниях равно

$$2{,}5\sqrt{3} \times 8/(2\sqrt{2}) = 12{,}25 \text{ кВ}.$$

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 60034-18-32. Машины электрические вращающиеся. Функциональная оценка изоляционных систем. Часть 18-32. Методы испытаний обмоток из жестких секций. Электрическая оценка изоляционных систем, применяемых в машинах мощностью ≤ 50 МВА и напряжением ≤ 15 кВ	IDT	ГОСТ IEC 600314-18-32—2014 Машины электрические вращающиеся. Часть 18-32. Оценка функциональных показателей систем изоляции. Методики испытаний для шаблонных обмоток. Оценка электрической стойкости
IEC 60034-18-41. Машины электрические вращающиеся. Квалификационные и типовые испытания электрических изоляционных систем типа I, используемых во вращающихся электрических машинах, питающихся от преобразователей напряжения	IDT	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 напряжения
IEC 60216-3. Электрические изоляционные материалы. Термическая стойкость. Часть 3. Инструкция по расчету характеристик термической стойкости	—	*
IEC 61251. Электрические изоляционные материалы. Оценка стойкости по отношению к напряжению переменного тока. Введение	—	*
IEC 61800-4. Силовые регулируемые электрические приводы. Часть 4. Общие требования. Номинальные данные для силовых электроприводов переменного тока напряжением свыше 1000 В и менее 35 кВ	—	*
IEC 62068-1. Электрические изоляционные системы. Электрические воздействия, производимые повторяющимися импульсами. Часть 1. Общий метод оценки электрического сопротивления	—	*
IEC 62539. Руководство по статистическому анализу данных о пробоях электрической изоляции	—	*

* 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.

УДК 621.313.3:006.354 МКС 29.160 Е60 IDT

Ключевые слова: машины электрические вращающиеся, квалификационные и приемные испытания, системы электроизоляции, стойкие к частичному разряду, питание от преобразователей напряжения

Редактор *Н.В. Верховина*
Технический редактор *В.Н. Прусакова*
Корректор *М.М. Малахова*
Компьютерная верстка *И.А. Налейкиной*

Сдано в набор 29.06.2015. Подписано в печать 19.08.2015. Формат 60×84 1/8. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 3,26. Уч.-изд. л. 2,80. Тираж 36 экз. Зак. 2833.

Издано и отпечатано во ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 123995 Москва, Гранатный пер., 4.
www.gostinfo.ru info@gostinfo.ru

IEC/TS 60034-18-42-2014