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

МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ

ГОСТ IEC/TS 60034-27— 2015

МАШИНЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ВРАЩАЮЩИЕСЯ

Часть 27

Измерения частичного разряда на изоляции статорной обмотки отключенных от сети вращающихся электрических машин

(IEC/TS 60034-27:2006, IDT)

Издание официальное

Москва
Стандартинформ
2016

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

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

Сведения о стандарте

1 ПОДГОТОВЛЕН 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 перевода на русский язык англоязычной версии стандарта, указанного в пункте 5

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 333 «Вращающиеся электрические машины»

3 ПРИНЯТ Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 29 сентября 2015 г. № 80-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
Армения	AM	Минэкономики Республики Армения
Беларусь	BY	Госстандарт Республики Беларусь
Казахстан	KZ	Госстандарт Республики Казахстан
Киргизия	KG	Кыргызстандарт
Молдова	MD	Молдова-Стандарт
Россия	RU	Росстандарт
Таджикистан	TJ	Таджикстандарт

4 Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 26 мая 2016 г. № 425-ст межгосударственный стандарт ГОСТ IEC/TS 60034-27—2015 введен в действие в качестве национального стандарта Российской Федерации с 1 марта 2017 г.

5 Настоящий стандарт идентичен международному документу IEC/TS 60034-27:2006 «Машины электрические вращающиеся. Часть 27. Измерения частичного разряда на изоляции статорной обмотки отключенных от сети вращающихся электрических машин» («Rotating electrical machines — Part 27: Off-line partial discharge measurements on the stator winding insulation of rotating electrical machines», IDT).

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

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

6 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодном информационном указателе «Национальные стандарты» (по состоянию на 1 января текущего года), 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, 2016

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 . . . 1
4 Природа частичных разрядов во вращающихся электрических машинах . . . 2
4.1 Основы теории частичных разрядов . . . 2
4.2 Типы частичных разрядов во вращающихся машинах . . . 3
4.3 Распространение импульсов в обмотке . . . 4
5 Техника измерений и приборы . . . 4
5.1 Общие сведения . . . 4
5.2 Влияние частотных характеристик измерительной системы . . . 5
5.3 Влияние соединительных узлов на ЧР . . . 5
5.4 Широкополосные и узкополосные измерительные системы . . . 6
6 Представление результатов измерений . . . 7
6.1 Общие сведения . . . 7
6.2 Минимальные рамки представления результатов исследования ЧР . . . 7
6.3 Дополнительные средства представления результатов исследования ЧР . . . 8
7 Измерительные цепи . . . 9
7.1 Общие сведения . . . 9
7.2 Компоненты обмоточной системы . . . 10
7.3 Обмоточная система в целом . . . 10
8 Нормализация измерений . . . 12
8.1 Общие сведения . . . 12
8.2 Компоненты обмоточной системы . . . 13
8.3 Обмоточная система в целом . . . 13
9 Процедура испытаний . . . 14
9.1 Измерение ЧР в обмотках и их компонентах . . . 14
9.2 Определение наличия и расположения ЧР . . . 17
10 Интерпретация результатов испытаний . . . 18
10.1 Общие сведения . . . 18
10.2 Интерпретация напряжения начала и гашения ЧР . . . 19
10.3 Разработка моделей ЧР . . . 20
11 Отчет об испытаниях . . . 22
Приложение А (справочное) Измерения частичных разрядов на включенных в сеть вращающихся электрических машинах . . . 24
Приложение В (справочное) Неэлектрические методы измерения ЧР и методы определения их местоположения . . . 25
Приложение С (справочное) Внешний шум, помехи и чувствительность . . . 26
Приложение D (справочное) Методы уменьшения помех . . . 28
Приложение Е (справочное) Интерпретация данных по амплитуде ЧР и фазовым диаграммам ЧР . . . 32
Приложение ДА (справочное) Сведения о соответствии ссылочных международных стандартов межгосударственным стандартам . . . 35
Библиография . . . 36

Введение

Многие годы измерение частичных разрядов (ЧР) использовалось в качестве точного критерия при оценке качества новых типов изоляции, а также для определения местоположения источника ЧР в изоляции вследствие возникающих на нее при работе воздействий. По сравнению с другими диэлектрическими испытаниями (измерение коэффициента затухания или сопротивления изоляции) измерение ЧР позволяет обнаружить слабые места изоляционной системы с целью их идентификации.

Измерение ЧР во вращающихся электрических машинах используется также при контроле качества вновь собранных обмоток, финишном контроле, проверке компонентов обмоточных систем (шаблонных катушек, высоковольтных изоляторов и т. п.), а также полностью собранных статоров.

Применительно к обслуживанию, ремонту и модернизации вращающихся электрических машин измерение ЧР представляет информацию относительно:

- слабых мест в изоляционной системе,
- процессов износа изоляции,
- принятия мер по техническому обслуживанию и определению межремонтных интервалов.

Хотя испытания на ЧР во вращающихся машинах нашли широкое применение, ряд исследований выявил, что критерии и методы анализа и окончательной оценки полученных данных при различных методах измерения часто сильно отличаются и не являются сопоставимыми. Поэтому существует необходимость в руководстве для пользователей, которые используют измерение ЧР для оценки состояния изоляционных систем.

Испытание статорных обмоток на ЧР можно разделить на две большие группы:

a) измерения на отключенных от сети электрических машинах (офлайновые измерения), при которых обмотка статора изолирована от электрической системы и для питания обмотки применяется отдельный источник питания;

b) измерения на находящихся в эксплуатации электрических машинах (онлайновые измерения), при которых электрическая машина находится в рабочем режиме и соединена с электрической системой.

Оба вида испытаний имеют свои преимущества и недостатки. Краткое обсуждение достоинств и недостатков испытаний на ЧР находящихся в эксплуатации электрических машин приводится в приложении А. Однако, принимая во внимание широкое распространение онлайновых методов, оправданное позитивной индустриальной практикой, настоящий стандарт ограничивается рассмотрением методов испытаний отключенных от сети машин. Такой подход представляется необходимым и достаточно лаконичным для их успешного использования неспециалистами в области измерения ЧР.

Ограничения

При испытании статорных обмоток на ЧР различными средствами измерений могут быть получены разные результаты, следовательно, сравнение результатов возможно только при определенных эквивалентных условиях. Поэтому представляет трудность назначение абсолютных значений критериев приемки или работоспособности. Это обусловлено особенностями распространения импульсов, трудностями калибровки и индивидуальными особенностями частотных характеристик статорных обмоток и средств измерений ЧР.

Более того, степень старения изоляции, а следовательно и риск ее разрушения зависит от таких факторов, как вид источников ЧР и их дислокации внутри статорной обмотки, оба из которых могут значительно влиять на результаты испытаний.

Для количественной оценки результатов испытаний в качестве основы могут быть использованы подтвержденные практикой эмпирические данные. Более того, для надежной оценки состояния изоляции обмотки статора рекомендуется ориентироваться на тенденции изменения количественных характеристик ЧР, их сравнение для машин аналогичной конструкции и с аналогичной изоляционной системой, измеренные при аналогичных условиях работы с использованием того же измерительного оборудования.

Персонал, проводящий измерения ЧР должен сознавать, что, в силу принципиальных особенностей метода, не все проблемы, связанные с изоляцией обмоток статора, могут быть решены путем его

применения, например повреждение изоляции из-за постоянных токов утечки, связанных с наличием проводящих контуров между различными ее элементами, или с явлением безимпульсных разрядов.

На испытания частей обмоточных систем и интерпретацию их результатов не распространяются ограничения, связанные с распространением импульсов.

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 27

Измерения частичного разряда на изоляции статорной обмотки отключенных от сети вращающихся электрических машин

Rotating electrical machines. Part 27. Off-line partial discharge measurements on the stator winding insulation of rotating electrical machines

Дата введения — 2017—03—01

1 Область применения

Настоящий стандарт является техническим регламентом, обеспечивающим общую базу для:
- измерительной техники и оборудования,
- установки оборудования,
- стандартизации и процедуры испытаний,
- снижения шума,
- оформления результатов,
- интерпретации результатов.

Это относится к измерениям ЧР в изоляции статорных обмоток отключенных от сети электрических машин при их питании от специального источника с частотой до 400 Гц. Настоящий стандарт охватывает двигатели с беличьей клеткой или шаблонными обмотками, уложенными в неизолированные пазы. Это, как правило, характерно для машин на напряжение 6 кВ и выше. Методы измерения, описанные в настоящем стандарте, могут также применяться для машин без проводящей пазовой оболочки. Однако результаты и их анализ могут отличаться от приведенных в настоящем стандарте.

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 60060-1, High-voltage test techniques — Part 1: General definitions and test requirements (Методы испытаний высоким напряжением. Часть 1. Общие определения и требования к испытаниям).

IEC 60060-2, High-voltage test techniques — Part 2: Measuring systems (Методы испытаний высоким напряжением. Часть 2. Измерительные системы)

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

3 Термины и определения

Общие термины и определения по измерению частичных разрядов, приведенные в настоящем стандарте, содержатся в IEC 60270 и дополняются нижеследующими терминами.

3.1 **измерение на отключенной от сети машине** (off-line measurement): Измерение, проводимое на остановленной машине, отсоединенной от питающей сети (офлайновое измерение).

Примечание — Необходимое испытательное напряжение прикладывается к обмотке от специального источника.

Издание официальное

3.2 **измерение на машине, находящейся в эксплуатации** (on-line measurement): Измерение, проводимое на вращающейся машине при ее нормальной работе (онлайновое измерение).

3.3 **поглощающее покрытие** (stress control coating). Красочное покрытие или лента на поверхности пазовой изоляции высоковольтных стержней и катушек, находящееся между ними и стенками пазов.

Примечание — Это покрытие уменьшает напряженность электрического поля по длине обмотки до величины, меньшей критического значения, при котором на поверхности возникают ЧР. Оно перекрывает проводящие покрытия частей паза для обеспечения электрического контакта между ними.

3.4 **проводящее покрытие паза** (conductive slot coating). Проводящая краска или слой ленты, находящиеся в непосредственном контакте с основной пазовой изоляцией катушки и часто называемые «полупроводящим покрытием».

Примечание — Это покрытие обеспечивает надежный электрический контакт с сердечником статора.

3.5 **резистивный датчик температуры (РДТ)** (resistance temperature detector — RTD): Встроенный в обмотку статора датчик температуры, обычно расположенный между верхним и нижним стержнями или между смежными сторонами катушек.

3.6 **пазовые разряды** (slot discharges): Разряды, происходящие между внешней поверхностью пазовой части катушки или стержня и заземленными пластинами шихтованного сердечника.

3.7 **внутренние разряды** (internal discharges): Разряды, происходящие внутри изоляционной системы.

3.8 **поверхностные разряды** (surface discharges): Разряды, происходящие на поверхности изоляции или на поверхности частей обмотки в лобовых частях или на поверхности активной части обмотки.

3.9 **распределение импульсов по амплитуде** (pulse height distribution): Зависимость числа импульсов, измеренных в течение заранее оговоренного промежутка времени и имеющих амплитуду в пределах равных интервалов дискретизации, от величины амплитуды.

3.10 **распределение импульсов по фазе** (pulse phase distribution): Зависимость числа импульсов, измеренных в течение заранее оговоренного промежутка времени и имеющих фазу в пределах равных интервалов дискретизации, от величины фазы.

3.11 **диаграмма распределения ЧР** (partial discharge pattern): Картина распределения ЧР в виде зависимости амплитуды ЧР от фазы на периоде напряжения переменного тока для визуализации поведения ЧР при определенном заранее времени измерений.

3.12 **устройство сопряжения** (coupling device): Обычно активный или пассивный четырехполюсник, который преобразует входные токи в сигналы напряжения.

Примечание — Данные токи передаются средствам измерений системой преобразования измерительной информации. Амплитудно-частотная характеристика устройства сопряжения выбирается таким образом, чтобы эффективно предотвратить попадание нежелательного напряжения и частоты на измерительный инструмент.

3.13 **блок сопряжения ЧР** (PD coupling unit): высоковольтный конденсатор низкой индуктивности, установленный последовательно с устройством сопряжения.

3.14 **наибольшая повторяющаяся амплитуда ЧР** (largest repeatedly occurring PD magnitude), (Q_m): Наибольшее значение, зарегистрированное системой измерений, которое проявляется в виде серии импульсов в соответствии с 4.3.3 IEC 60270, или значение, связанное с оценкой повторяющихся импульсов ЧР с частотой 10 импульсов в секунду, которое может быть непосредственно получено из распределения импульсов по амплитуде.

3.15 **нормализованная гистограмма импульсов** (normalized quantity number — NQN): Нормализованная площадь под линией, огибающей диаграмму распределения импульсов по амплитуде, в которой количество импульсов выражено как логарифм числа импульсов в секунду, а амплитуда импульсов представлена в линейном масштабе.

4 Природа частичных разрядов во вращающихся электрических машинах

4.1 Основы теории частичных разрядов

Обычно частичные разряды (ЧР) происходят в местах, где диэлектрические свойства изоляционных материалов неоднородны. В этих местах напряженность электрического поля может усиливаться. Такие местные усиления поля могут приводить к местному частичному пробою. Этот местный пробой

не является полным пробоем изоляционной системы. Обычно ЧР для своего развития необходимо газовое включение, т. е. заполненные газом промежутки внутри изоляции, расположенные около проводника или около внутренней поверхности изоляции.

ЧР может произойти, когда местная напряженность поля в зоне неоднородности превысит напряженность пробоя изоляционного материала. Этот процесс может привести к многочисленным импульсам ЧР в течение одного периода приложенного напряжения.

Величина заряда, переносимого при разряде, тесно связана с неоднородностью материала, его размерами, пробивным напряжением и удельными диэлектрическими свойствами материала, типом газа, его давлением и т. д.

Изоляционная система обмоток статора высоковольтных машин обычно имеет повышенную восприимчивость к ЧР, хотя ей и присуща устойчивость к их появлению благодаря наличию неорганической слюдяной составляющей. Наличие значительных ЧР в этих машинах в большей степени являются показателем несовершенства технологии производства или разрушения изоляции в процессе эксплуатации, нежели непосредственной причиной пробоя. Тем не менее, в зависимости от индивидуальных процессов в машинах ЧР может непосредственно влиять на изоляцию и процесс ее старения. Время до разрушения или вероятность отказа не всегда имеют связь с уровнем ЧР, но существенно зависят от других факторов, например, рабочей температуры, состоянием клинового узла, вибрации стержней, степенью загрязнения изоляции и других.

Измерение и анализ специфического поведения ЧР могут быть эффективно использованы для контроля качества новых обмоток и их компонентов и для раннего обнаружения недостатков изоляции, вызванных ее старением в процессе эксплуатации из-за тепловых, электрических и механических воздействий, а также воздействием окружающей среды, которые могут привести к ее повреждению.

4.2 Типы частичных разрядов во вращающихся машинах

4.2.1 Общие положения

Причинами развития частичных разрядов в статорной обмотке могут являться особенности технологии, производственные дефекты, нормальное и ускоренное старение в процессе эксплуатации. Конструкция машины, используемые материалы, технология производства, условия работы и другие факторы могут существенно влиять на свойства, местоположение, характеристики и развитие ЧР. Для каждой машины различные источники ЧР в ряде случаев могут быть обнаружены и идентифицированы по особенностям их поведения.

4.2.2 Внутренние разряды

4.2.2.1 Внутренние полости

Несмотря на то, что технология производства направлена на минимизацию внутренних пустот, их некоторое количество неизбежно присутствует в пропитанной компаундом слюдяной изоляционной конструкции, обычно используемой в высоковольтных вращающихся машинах. Действительно, слюда в изоляционной системе предотвращает частичные разряды, не доводя дело до полного пробоя. Пока внутренние полости малы и существенно не увеличиваются, эксплуатационная надежность изоляции не уменьшается.

4.2.2.2 Внутреннее расслоение

Внутреннее расслоение внутри главной изоляции может быть вызвано несовершенным запеканием изоляционной системы во время производства или из-за чрезмерных механических и тепловых напряжений во время работы. Крупные полости могут развиваться на большой площади, что приводит к разрядам относительно высокой энергии, которые могут оказывать значительное влияние на изоляцию. В частности, расслоение может уменьшить теплопроводность изоляции, что может привести к ускоренному ее старению или даже выходу из строя. Поэтому при наличии ЧР необходимо тщательное рассмотрение расслоения.

4.2.2.3 Отслоение изоляции от проводника

Периодические изменения теплового режима могут вызвать отслоение медного проводника от главной изоляцией, которое может вызвать глубокие повреждения изоляции витка или секции.

4.2.3 Разряды в пазу

Разряды в пазу высоковольтных машин развиваются в случае повреждения проводящего покрытия из-за подвижности пазовой части стержня (катушки), например, при ослаблении его запрессовки, из-за эрозии материала, абразивного износа, воздействия химически активной среды или производственных дефектов. Разряды большой энергии возникают при наличии серьезных механических по-

вреждений, которые могут привести к дополнительным повреждениям главной изоляции, и в конечном итоге к ее пробою. На ранних стадиях разряды в пазу в большей степени представляют собой вибрационное искрообразование, нежели частичный разряд. Это искрообразование может также происходить в частях обмоток с низким потенциалом, например, вблизи нулевой точки звезды. Хотя абсолютное время между появлением разрядов и пробоем изоляции обычно неизвестно, оно может быть небольшим, поэтому необходимо их своевременное обнаружение и проведения ремонтных работ.

4.2.4 Разряды в лобовых частях

ЧР в зоне лобовых частей обмотки могут возникать в тех местах, где имеются большие напряженности электрического поля. Такие разряды обычно происходят в промежутках между различными элементами лобовых частей обмотки статора.

Если покрытие лобовых частей обмоток, уменьшающее напряженности поля, теряет эффективность из-за неудачной конструкции этих частей, их загрязнения, пористости, влияния температуры и других факторов, возникает поверхностный разряд, приводящий к существенной эрозии материалов. Как правило, это очень медленный процесс развития повреждения, несмотря на то, что поведение ЧР может быть подчинено относительно быстрым изменениям от поверхностных эффектов. Кроме того ЧР может возникать между фазами, например, из-за нарушения зазоров между вводными зажимами, зажимами и выступающими элементами конструкции или разряда между лобовой частью обмотки и землей.

4.2.5 Электропроводящие частицы

Наличие электропроводящих частиц, особенно малоразмерных, образующихся в результате загрязнения обмотки, может привести к сильной местной концентрации ЧР. Это может привести к появлению раковин и микротрещин в изоляции.

4.3 Распространение импульсов в обмотке

По своей природе ток частичного разряда представляет собой импульсный ток с передним фронтом всего в несколько наносекунд. Для таких коротких импульсов ЧР с высокочастотным спектром обмотка статора представляет собой цепь с распределенными параметрами, в которой имеют место явления бегущей волны, индуктивно-емкостной связи и резонанса. Поэтому необходим анализ распространения импульса ЧР. Форма и величина регистрируемого на зажимах обмотки сигнала ЧР отличаются от тех, которые имеют место в точке возникновения ЧР из-за явлений ослабления, искажения, отражения и взаимовлияния бегущей волны. Поэтому для анализа и интерпретации результатов измерений ЧР во вращающихся электрических машинах важно учитывать следующие обстоятельства.

- Передаточная функция звена между точкой возникновения ЧР и чувствительным к нему звеном неизвестна и зависит от специфики конструкции электрической машины, определяющей амплитудно-частотную характеристику статорной обмотки. Поэтому энергия источника ЧР, которая идет на образование эрозии изоляции, не может быть измерена прямым способом.
- Высокочастотный сигнал в системе возбуждения, вызывающий ЧР на клеммах, зависит от свойств передаточных характеристик испытуемой машины и места расположения источника ЧР.
- Высокочастотные составляющие сигнала ЧР значительно ослабевают по мере прохождения через обмотку и, в зависимости от природы ЧР, могут быть не распознаны на клеммах испытуемой машины.

Таким образом, совокупность вышеперечисленных обстоятельств с учетом не только особенностей конструкции статорных обмоток, но и специфики частотных характеристик системы анализа ЧР, включая соединительные элементы, оказывает существенное влияние на характеристики сигналов, образующихся на клеммах катушек.

5 Техника измерений и приборы

5.1 Общие сведения

В соответствии с IEC 60270 данный раздел посвящен исключительно электрическим методам измерения частичных разрядов, поскольку данные методы являются самым распространенным способом оценки изоляции обмоток вращающихся электрических машин. Неэлектрические методы измерений ЧР и их местоположения представлены в приложении В.

Системы измерения частичных разрядов могут быть разделены на подсистемы: соединительные элементы, системы передачи сигналов (например, соединительные электрические и оптоволоконные кабели) и измерительные устройства. В общем случае, системы передачи не имеют, за исключением некоторого ослабления сигнала, заметного влияния на характеристики системы измерения, а потому не принимаются во внимание.

5.2 Влияние частотных характеристик измерительной системы

Частотные характеристики системы анализа ЧР, включая ее соединительные устройства, определяют, какая часть энергии ЧР обмотки может быть распознана. Таким образом, частотная характеристика и тип используемых соединительных устройств оказывают существенное влияние на чувствительность системы. Из-за различия в частоте среза измерительной системы при испытаниях комплектных обмоток необходимо учитывать следующие обстоятельства.

Измерения в нижнем частотном диапазоне обеспечивают хорошую чувствительность не только к ЧР в витках и обмотках, расположенных в непосредственной близости к датчикам, но и в отдаленных частях обмоток. Однако, низкочастотный диапазон подвержен в большой степени помехам.

Измерения в диапазоне весьма высоких частот сопровождаются значительным ослаблением передаваемой мощности ЧР, поэтому обеспечивают удовлетворительную чувствительность к ЧР лишь при их близком расположении к датчику. Однако, эти измерения не чувствительны к помехам.

Для анализа ЧР на комплектных обмотках отключенных от сети электрических машин рекомендуется использовать широкополосные измерительные системы. Нижняя частота среза в соответствии с IEC 60270 должна составлять несколько десятков кГц.

Следует заметить, что в зависимости от конструкции обмоток и используемого измерительного оборудования могут возникать резонансные явления, которые также будут оказывать влияние на результаты измерений.

5.3 Влияние соединительных узлов на ЧР

При анализе ЧР на комплектных обмотках и их элементах в отключенных от сети электрических машинах часто используются емкостные соединительные узлы. Они состоят из последовательно соединенного соединительного звена и высоковольтного конденсатора. При испытаниях отдельных частей обмоток соединительный узел может подключаться последовательно с испытуемым объектом (см. рисунок 5b). Низковольтное соединительное устройство подключается к системе передачи сигналов.

Высоковольтный конденсатор, соединительное звено, система передачи и входное сопротивление измерительной системы представляют собой высокочастотный фильтр. Поэтому увеличение входного сопротивления и емкости приводят к увеличению чувствительности.

На рисунке 1 схематически показаны частотные характеристики идеализированного ЧР импульса и передаточные функции различных соединительных узлов с высоковольтным конденсатором и измерительным сопротивлением $Z_m = R$ на низковольтном участке. Заштрихованная область спектра ЧР импульса и соединительного звена с RC постоянной времени 5 нс показывает доступную для измерения энергию ЧР. На практике такие системы имеют полосу пропускания, обусловленную пассивными L и C компонентами.

Высокочастотные составляющие ЧР импульсов ослабевают и рассеиваются по мере прохождения через обмотку. Поэтому измерительные системы с низкой частотой среза в низкочастотном диапазоне имеют в среднем хорошую чувствительность по всей обмотке.

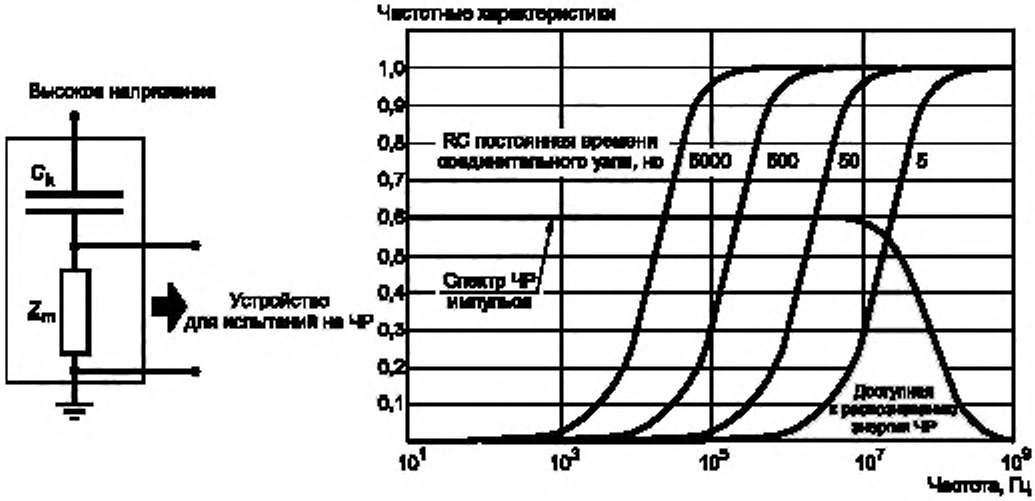
При измерениях на отдельных частях обмотки высоковольтный конденсатор присоединяется к медному проводнику. Для измерений ЧР на комплектной обмотке соединительный узел подключается к клеммам электрической машины или внутри корпуса непосредственно к проводникам обмотки.

С высоковольтным конденсатором, как правило, соединяются следующие низковольтные соединительные устройства:

RLC фильтры или четырехполюсники (IEC 60270), в которых индуктивность обеспечивает подавление высокочастотной составляющей;

высокочастотные трансформаторы тока, которые кроме всего прочего могут обеспечивать гальваническую развязку измерительного устройства с высоковольтными цепями.

Высокочастотный трансформатор тока, соединенный с заземляющим проводником может быть использован как отдельное соединительное устройство. При использовании оптоволоконных передаточных кабелей соединительное устройство может быть установлено на высоковольтной стороне конденсатора.



Постоянная времени соединительного узла: $\tau = RC$ при $Z_m = R$, где Z_m — сопротивление измерителя,
C_k — емкость соединительного конденсатора.
Нижняя частота среза. $f_{k0} = 1 / (2\pi RC)$.

Рисунок 1 — Частотные характеристики ЧР импульса и соединительного узла с различной постоянной времени

5.4 Широкополосные и узкополосные измерительные системы

Принципиальное отличие между различными системами измерения ЧР состоит в их полосе пропускания. Импульсы ЧР, появляющиеся на клеммах обмотки имеют частотный спектр, зависящий от ее передаточной функции. На измеряемый сигнал ЧР в большей или меньшей степени воздействует полоса пропускания измерительной системы. Кроме того, изоляционные системы на основе слюды характерны высокой скоростью повторений ЧР импульсов. На рисунке 2 представлены характерные примеры передачи импульсов в различных измерительных системах. Верхняя осциллограмма соответствует исходному импульсу ЧР, а нижняя — его представлению измерительной системой:

1. Широкополосная система: a) — низкая частота повторений, b) — повышенная частота, c) — высокая частота повторений, приводящая к наложению импульсов.

2. Узкополосная система: a) — низкая частота повторений, b) — повышенная частота, c) — высокая частота повторений, приводящая к наложению импульсов.

Широкополосные системы

В соответствии с IEC 60270 система измерений ЧР называется широкополосной, если ее полоса пропускания превышает 100 кГц. Измерительные системы, используемые для анализа ЧР во вращающихся электрических машинах имеют полосу порядка 1 МГц, а в ряде случаев — до 500 МГц. Полоса пропускания измерительной системы определяется частотными характеристиками соединительного звена и обработкой сигнала

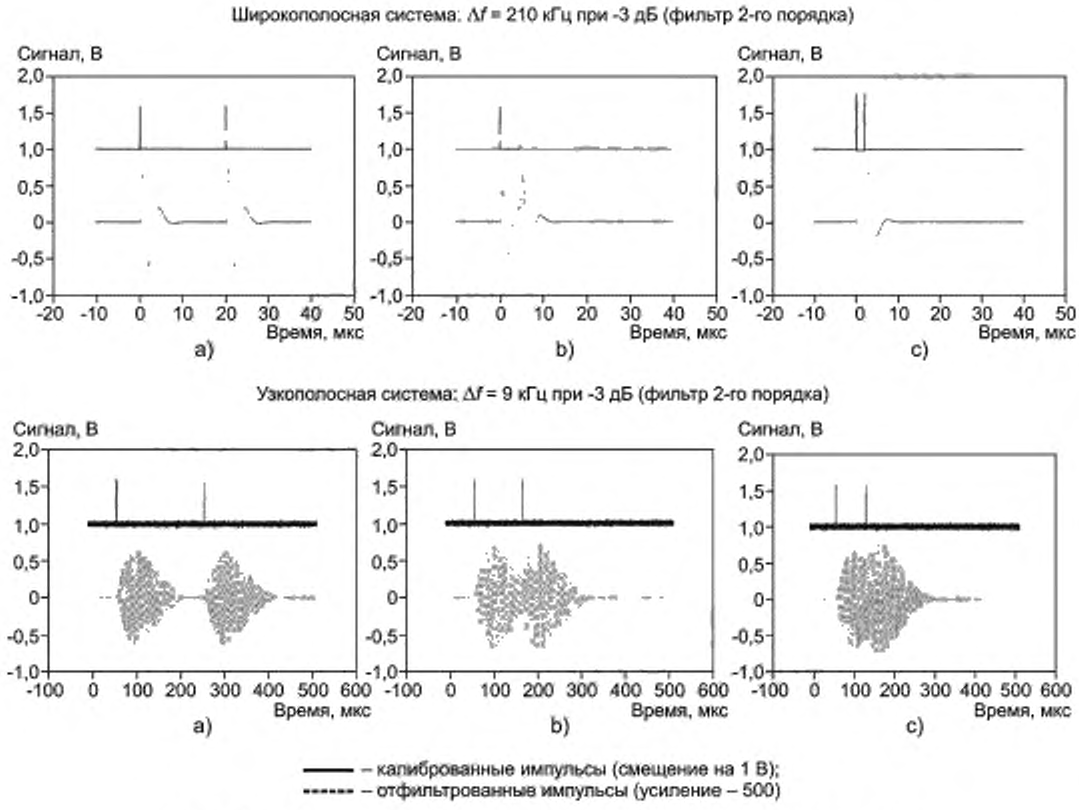


Рисунок 2 — Типичная форма импульсов ЧР в широко- и узкополосной системах

6 Представление результатов измерений

6.1 Общие сведения

Поскольку состояние изоляционной системы должно обеспечивать ее необходимый уровень надежности, данные по ЧР, записанные с помощью представленных в разделе 5 средств, должны быть правильно обработаны. Поскольку степень повреждения изоляционной системы, а следовательно и вероятность отказа напрямую связаны со спецификой природы источника ЧР, необходимо получить надежную информацию о характере источника ЧР, которые измеряются. Для этих целей могут использоваться различные способы обработки визуальной информации

6.2 Минимальные рамки представления результатов исследования ЧР

Чтобы количественно оценить ЧР рекомендуется использовать по крайней мере следующие классические параметры, характеризующие измерение частичных разрядов:

Амплитуда ЧР,

Среднеквадратичное значение испытательного напряжения.

Амплитуда ЧР, как наибольшая повторяющаяся амплитуда ЧР, характеризуемая напряжением (мВ) или кажущимся зарядом (пК) и оцениваемая в соответствии с IEC 60270. В принципе, выбор используемой при оценке ЧР единицы измерения произволен. По результатам измерений этих двух величин представляется зависимость амплитуды ЧР Q_m от напряжения U, приложенного к обмотке двигателя или ее элементу и изображается в виде графика $Q_m = f(U)$, построенного для случая нарастания и спадания U. При этом испытательное напряжение в соответствии с разделом 9.1.5 возрастает до определенного максимального значения непрерывно или дискретно с приемлемым шагом, а затем так же спадает до минимального значения.

Данные графики представлены на рисунке 3 и, в соответствии с IEC 60270, по зависимостям $Q_m = f(U/U_{max})$ позволяют определить напряжение начала (Inception Voltage — PDIV) и напряжение гашения (Extinction Voltage — PDEV) частичных разрядов в испытуемом объекте.

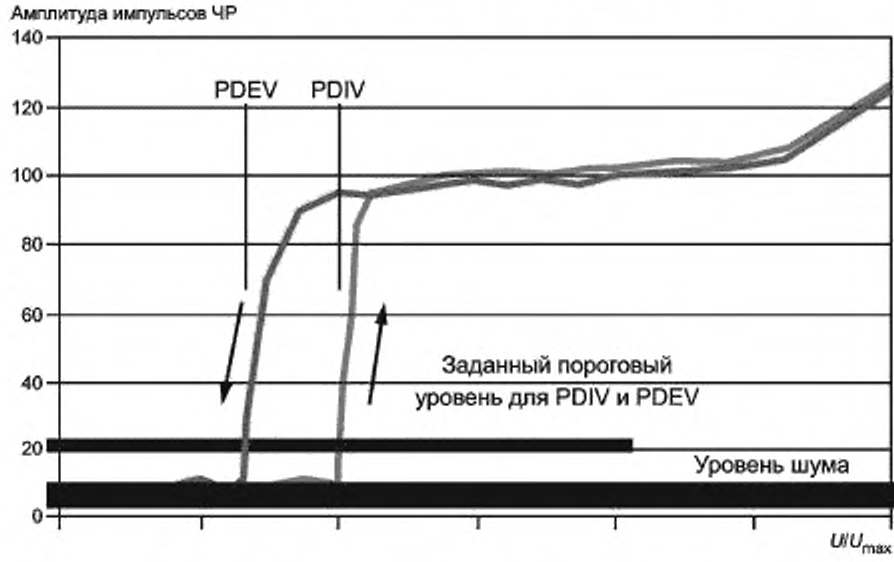


Рисунок 3 — Зависимость амплитуды ЧР от относительного испытательного напряжения Qm = f(U/Umax)

6.3 Дополнительные средства представления результатов исследования ЧР

6.3.1 Общие сведения

Если для измерения ЧР используются цифровые измерительные устройства, в серии импульсов частичных разрядов фиксируется амплитуда q_i каждого индивидуального ЧР, попадающего в интервал измерения при соответствующих мгновенных значениях u_i и t_i или для периодического переменного напряжения — фазового угла φ_i на соответствующем промежутке переменного напряжения. В любом случае измеренные параметры ЧР записываются соответствующим измерительным устройством и сохраняются до момента их анализа одним из приемлемых методов.

Из данных, полученных при исследовании ЧР, могут быть получены другие их параметры, например суммарный заряд, ток разряда, мощность и энергия ЧР в соответствии с IEC 60270. Кроме того может быть использован параметр NQN — нормализованная гистограмма импульсов. Однако в цифровых системах полученные количественные характеристики ЧР зависят от индивидуальных характеристик средств измерений, использованных при испытаниях, например, от уровня переключения и т.п. Используя соответствующие диаграммы при последующем анализе, можно так представить измерения ЧР, чтобы распознать критическое состояние изоляционной системы. Статистическое распределение ЧР параметров, диаграммы с разрешением по фазе или по времени, интерпретирующие результаты измерения ЧР, или так называемые точечные диаграммы рассеяния (scatter diagrams) могут быть использованы для этих целей (например, распределение амплитуды или фазы импульсов, амплитудно-фазовое распределение, осциллограммы серий импульсов, таблицы распределения ЧР и т. п.).

Более детальная информация по моделям и диаграммам ЧР для последующего анализа приведена в издании 226 CIGRE [2].

6.3.2 Модели частичных разрядов

В качестве модели ЧР может рассматриваться диаграмма распределения ЧР, в которой представлены характерные, находящиеся в связи между собой параметры ЧР причем такие, которые бы позволяли определить источники ЧР импульсов.

В качестве примера на рисунке 4 представлено распределение $\varphi - q - n$, в котором каждый i-й импульс изображен точкой с координатами, равными его амплитуде q_i по оси ординат и φ_i — по оси абсцисс. Наибольшая плотность точек (их количество, приходящееся на единицу площади диаграм-

мы) соответствует частоте H порядка 14 имп/с и имеет небольшую амплитуду и фазу в диапазонах 10° — 40° и 190° — 220°. Для визуального анализа наиболее приемлемо различать области различной плотности импульсов цветом.

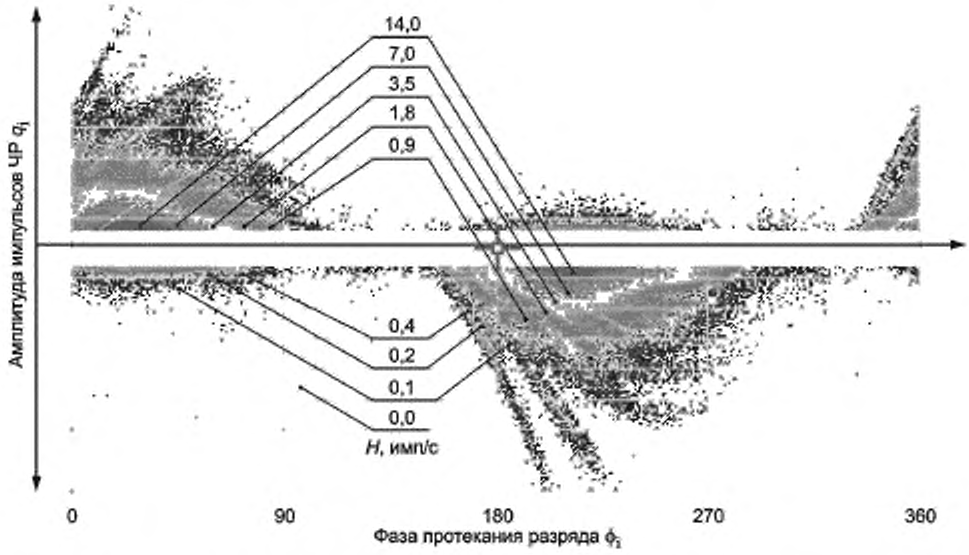


Рисунок 4 — Пример $\varphi - q - n$ диаграммы рассеяния импульсов ЧР на объекте, представленном на рисунке 5b.

7 Измерительные цепи

7.1 Общие сведения

Основная задача измерительных цепей — обеспечение приемлемых условий для определения частичных разрядов в испытуемом объекте. Она решается наилучшим образом, если отдельные компоненты измерительной системы, исключая испытуемый объект, позволяют свободно развиваться ЧР.

Измерительные цепи включают в себя в первую очередь:

- высоковольтный источник, в соответствии с IEC 60060-1 и 60060-2;
- измеритель напряжения;
- соединительное звено;
- соединительный кабель от входа измерительного прибора к испытуемому объекту с низким подавлением сигнала и хорошим экранированием;
- измеритель частичных разрядов;
- высоковольтные соединения.

Чтобы убедиться в отсутствии влияния измерительных цепей на измерения ЧР в испытуемом объекте, оборудование должно быть проверено при максимальном испытательном напряжении в соответствии с процедурой, описанной в разделе 9.1.6. Уровень шума, производимого при максимальном испытательном напряжении измерительными цепями в совокупности, не должен превышать 100 пКл при следовании процедуре нормализации в соответствии с изложенным в главе 8.

В случае если размещение испытательного оборудования не может обеспечить достаточную устойчивость к помехам для измерения регламентированного низкого уровня ЧР, на стороне высокого напряжения между испытуемым объектом и источником высокого напряжения должно быть установлено дополнительное сопротивление или фильтр. Эти устройства должны снизить помехи от источника высокого напряжения, например, от испытательного трансформатора, высоковольтных проводников и изоляторов, высоких гармоник питающего напряжения внутри или вблизи полосы пропускания измерительной системы. Дополнительная информация относительно внешнего шума, помех и чувствительности измерений может быть получена из приложений C и D.

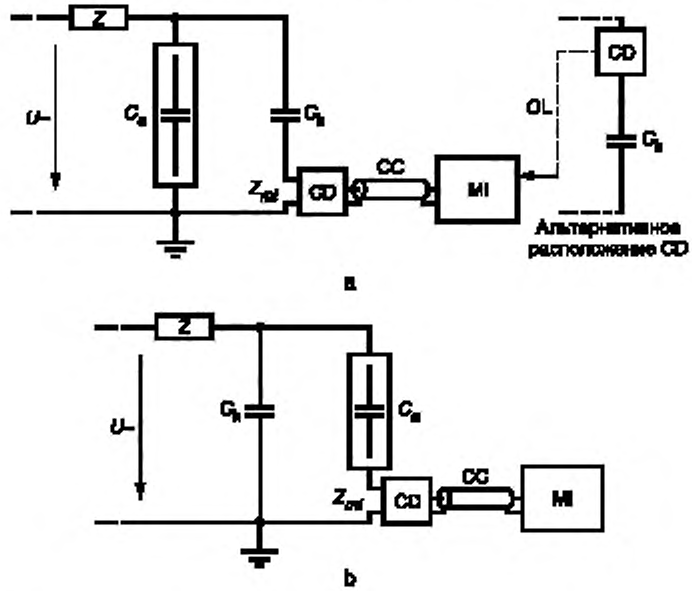
В целом измерительные цепи должны обладать низкой индуктивностью. Важно избежать контуров заземления. В качестве заземляющих проводников рекомендуются использовать проводники, обладающие малой индуктивностью.

7.2 Компоненты обмоточной системы

Для измерений частичного разряда на отдельных элементах обмоток (стержни, катушки статора и т. п.) предпочтительно использовать две основные измерительные схемы в соответствии с IEC 60270. Эти схемы представлены на рисунке 5. Низковольтное соединительное звено в схеме на рисунке 5а расположено на стороне заземления соединительного конденсатора. Такое соединение имеет преимущество при испытаниях объектов с заземляемым выводом. При этом испытуемый объект присоединяется непосредственно к источнику высокого напряжения и земле. В случае повреждения изоляции в процессе испытания оборудование не подвергается воздействию высокого напряжения.

В схеме, изображенной на рисунке 5b, соединительное звено подключено к заземляющей клемме испытуемого объекта. Таким образом, его низковольтный выход изолирован от земли. По сравнению со схемой на рисунке 5а данная схема может обеспечить более высокую чувствительность к низкоемкостным элементам. Полярность измеряемых ЧР сигналов противоположна на рисунках 5а и 5b.

В обеих схемах цепи защиты от токов короткого замыкания, которые могут возникнуть при пробое испытуемого объекта, должны быть объединены с соединительным звеном.



a — соединительное звено последовательно с соединительным конденсатором, b — соединительное звено последовательно с испытуемым объектом, U — высоковольтный источник; Z_{mi} — входное сопротивление измерительной системы; CC — соединительный кабель, OL — оптическая линия связи; C_a — испытуемый объект, C_k — соединительным конденсатором; CD — соединительное звено; MI — измерительный прибор; Z — фильтр

Рисунок 5 — Базовые измерительные цепи по IEC 60270

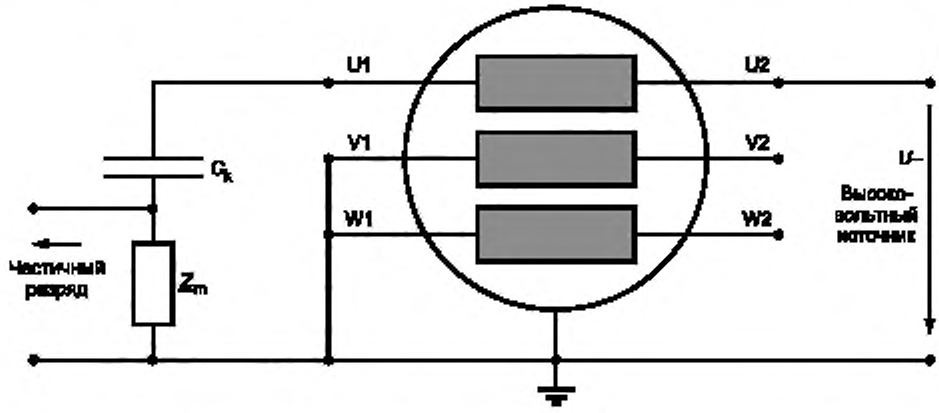
7.3 Обмоточная система в целом

7.3.1 Общие сведения

Информация, которая фактически может быть получена из испытаний на частичный разряд высоковольтных обмоток, зависит от доступности нейтрали звезды и метода соединения схемы измерения.

Высоковольтный источник и соединительное звено, если возможно, должны быть присоединены к зажимам обмоток с противоположных сторон, чтобы использовать эффект демпфирования источника фазами обмоток. Соединительное звено необходимо расположить как можно ближе к зажимам обмоток, а корпус статора должен быть заземлен.

На рисунке 6 показано присоединение измерительных цепей при измерениях ЧР к высоковольтным зажимам U V Wпри подключении источника питания со стороны нейтральных зажимов.



U — высоковольтный источник; Z_m — измерительное сопротивление; C_k — емкость соединительного звена

Рисунок 6 — Измерительная цепь для исследования ЧР на полной (S1.1) обмотке

7.3.2 Рекомендуемые стандартные измерения (SX.X)

При измерениях с обмотками, в которых доступны нулевые точки, рекомендуется использовать соединения, представленные в таблице 1. Таблица 2 относится к случаям, когда нулевые точки обмоток соединены вместе или недоступны. Данные таблицы рекомендуется использовать для выполнения измерений, имеющих целью сравнение и выявления тенденций развития частичных разрядов в новых и находившихся в эксплуатации обмотках, а также качества продукции и технологии ее производства.

Таблица 1 — Диаграмма соединений S1 при доступных нулевых клеммах обмоток

Порядковый номер	Высоковольтные клеммы	Земля	C_k
S1.1	U2	V1W1	U1
S1.2	V2	U1W1	V1
S1.3	W2	U1V1	W1
S1.4	U2V2W2	—	U1V1W1

Таблица 2 — Диаграмма соединений S2 при соединенных нулевых клеммах обмоток

Порядковый номер	Высоковольтные клеммы	Земля	C_k
Нулевая точка доступна			
S2.1	U2V2W2	—	U1V1W1
Нулевая точка недоступна			
S2.2	U1V1W1	—	U2V2W2

Сравнение результатов измерений S1.1—S1.3 с результатами S1.4 при доступных нулевых клеммах (таблица 1) позволяет определить и различить характерные источники частичных разрядов, возникающих между двумя фазами обмоток из-за производственных дефектов или старения в процессе эксплуатации (см. 9.2).

В зависимости от характеристик имеющегося источника питания и емкости обмоток может оказаться неудобным и даже невозможным питание всей обмотки целиком. В этом случае измерение S1.4 комплектной обмотки для схемы с доступными нулевыми клеммами в таблице 1 не проводится. В слу-

чае испытания новых обмоток, особенно машин малой мощности, может быть использована упрощенная процедура, состоящая в выполнении S1.4 для двигателей с доступными нулевыми клеммами. Это, однако, предоставит меньше информации для дальнейшего сравнения и выявления тенденций старения обмотки, а также не позволит обнаружить разряды между различными фазами обмотки.

В случаях, когда может быть исключено кондуктивное влияние источника питания, оба зажима каждой обмотки — фазный и нейтральный (U1U2, V1V2, W1W2) при измерениях S1.1—S1.4 и S2.1 могут быть соединены чтобы обеспечить одинаковую чувствительность к дефектам изоляции или технологическим погрешностям на обеих сторонах обмотки.

7.3.3 Дополнительные и расширенные измерения

В дополнение к стандартным измерениям, представленным таблицами 1 и 2, для более детального исследования поведения ЧР в изоляции обмоток могут быть проведены расширенные измерения. Данные измерения иллюстрируются таблицами 3 и 4. Они могут быть выбраны применительно к ситуации, возникающей в случае, если стандартные измерения указывают на наличие специфических источников ЧР, требующих дальнейших исследований. Решение о проведении дальнейших исследований принимается испытателем или производителем.

Таблица 3 — Диаграмма соединений E1 при доступных нулевых клеммах обмоток

Порядковый номер	Высоковольтные клеммы	Земля	C_k
E1.1	U1	V2W2	U2
E1.2	V1	U2W2	V2
E1.3	W1	U2V2	W2
E1.4	U1V1W1	—	U2V2W2

Таблица 4 — Диаграмма соединений E2 при соединенных нулевых клеммах обмоток

Порядковый номер	Высоковольтные клеммы	Земля	C_k
Нулевая точка доступна			
E2.1	U2V2W2	—	U1
E2.2	U2V2W2	—	V1
E2.3	U2V2W2	—	W1
E2.4	U1V1W1	—	U2V2W2
Нулевая точка недоступна			
E2.5	V1	—	U1
E2.6	W1	—	V1
E2.7	U1	—	W1

Проведя расширенные измерения, представленные в таблицах 3 и 4, в дополнение к стандартным по таблицам 1 и 2, можно получить более детальную информацию об особенностях нахождения источников ЧР внутри обмоточной системы статора, поскольку данные испытания учитывают ослабление импульсов по мере прохождения по обмоткам.

8 Нормализация измерений

8.1 Общие сведения

По мере прохождения импульсов через обмотки и систему измерения возникают резонансные явления, взаимные перекрестные связи в обмотках двигателя, упомянутые в 4.3, что делает невозможным использование калиброванных измерительных устройств. Целью нормализации является учет влияния измерительных цепей, например, соединения источника питания, паразитных емкостей,

емкости соединительного звена и испытуемого объекта, при подаче строго определенного импульса на зажимы двигателя при полностью укомплектованной измерительной схеме. Нормализация должна гарантировать достаточную чувствительность для адекватного измерения амплитуды ЧР и воспроизводимость результатов, выдаваемых системой измерений. Кроме того, нормализация должна содействовать сопоставимости результатов испытаний для их сравнения у объектов со сходными структурой и источниками ЧР. Нормализация измерительных цепей обеспечивается подачей кратковременных импульсов определенной амплитуды с помощью задающего генератора импульсов (калибратора), удовлетворяющего требованиям IEC 60270.

Следует подчеркнуть следующие обстоятельства:

- нормализация не призвана определять неизвестную передаточную функцию между активным источником ЧР в изоляции обмотки и местоположением установленных датчиков, которая в общем случае зависит от локализации последних и компоновки электрической машины;

- нормализация на клеммах машины не может однозначно представить ЧР импульсы, возникающие в неопределенном месте статорной обмотки, поэтому процедура нормализации комплектной обмотки не обеспечивает оценку качества изоляционной системы в терминах абсолютных значений ее параметров;

- нормализация не может являться критерием для прямого сравнения различных машин.

Поскольку эффект распространения импульсов не требует рассмотрения при испытаниях комплектных обмоток, стержней и других отдельных элементов обмоток, которые могут быть представлены как сосредоточенные емкости, нормализация в терминах амплитуды ЧР в соответствии с IEC 60270 может служить основой для общего сравнения различных объектов и, таким образом, являться мерой качества, например, при испытаниях качества в процессе производства.

8.2 Компоненты обмоточной системы

При испытаниях отдельных частей обмоток измерительные цепи, описанные в 7.2, должны быть нормализованы в соответствии с процедурой калибровки, описанной в разделе 5 и на рисунке 4 IEC 60270 с помощью подачи импульсов определенной амплитуды в соответствующей комплектной измерительной схеме. Это выполняется с помощью задающего генератора импульсов, расположенного между зажимами испытуемого объекта и высоковольтного источника питания, соединенного в схему испытания, но не работающего.

Нормализация выполняется для одной амплитуды, выбранной из ожидаемого диапазона так, чтобы добиться высокой точности измерения амплитуды ЧР. Для отдельных частей обмоток измерение ЧР в соответствии с IEC 60270 рекомендуется выражать в единицах кажущегося заряда q, измеряемого в пКл.

8.3 Обмоточная система в целом

При испытании комплектных обмоток процедура нормализации измерительных цепей, описанных в 7.3, выполняется путем подачи импульсов определенной амплитуды к зажимам двигателя или соединительному звену с помощью задающего генератора импульсов. Это необходимо для создания ЧР импульсов на клеммах машины в процессе эксперимента. Однако необходимо отметить, что использование в качестве оценочных величин заряда в пК или напряжения в мВ не могут служить мерой сравнения различных машин или различных используемых датчиков.

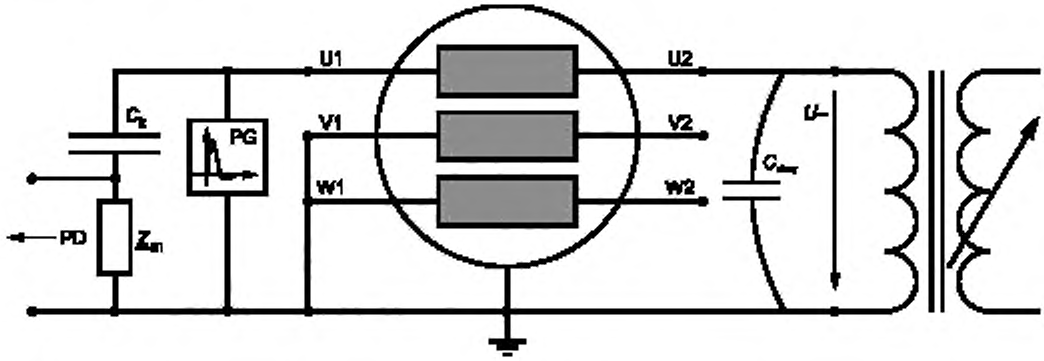
Нормализация в принципе необходима для всех типов измерительных цепей, описанных в 7.3, перед началом испытания на ЧР. В случае проведения серии ЧР тестов, например S1.1, S1.2, S1.3 с симметричными обмотками, нормализация необходима лишь для первого измерения.

В зависимости от типоразмера испытуемой машины может быть рекомендована раздельная нормализация для каждой фазы, например в очень больших машинах симметрия по трем фазам не является необходимой из-за наличия в конструкции контура тока.

Процедура нормализации при испытании на ЧР комплектной обмотки иллюстрируется рисунком 7 и выглядит следующим образом.

a) Измерительная цепь выбирается в соответствии с разделом 7.3 в зависимости от типа выполняемого измерения (см. таблицы 1—4).

b) Все соединения подводятся к зажимам фаз, причем соединительный узел и источник напряжения должны располагаться к ним как можно ближе, а все остальные компоненты и соединения должны быть полностью готовы перед включением.



U — высоковольтный источник; Z_{m} — измерительное сопротивление; C_{k} — емкость соединительного конденсатора; C_{stray} — паразитная емкость; PG — генератор импульсов по IEC 60270; PD — частичный разряд

Рисунок 7 — Нормализация измерительной цепи для соединений S1.1

c) Задающий генератор импульсов соединен между фазой, в которой производится измерение и землей проводниками, имеющими как можно меньшую длину, чтобы избежать искажения сигнала индуктивностью провода. Если возможно, генератор импульсов следует присоединить непосредственно к клемме фазы.

d) Генератор импульсов должен быть настроен так, чтобы соответствовать амплитуде импульсов в диапазоне ее изменения, ожидаемом от испытуемого объекта.

e) Задающие импульсы постоянной амплитуды измеряются прибором ЧР чтобы определить масштабный коэффициент для последующих измерений.

Поскольку испытуемый объект в полной комплектации, соединительные кабели и измерительные приборы с фильтром и усилителем должны рассматриваться с точки зрения перспективности системы, нормализация конкретной измерительной цепи для комплектной статорной обмотки может быть выполнена только для данной машины и данной системы испытания. Необходимо подчеркнуть, что нормализация необходима всегда, если испытательное оборудование имеет новую компоновку, нежели та, при которой проводились предыдущие измерения и симметрия нарушена.

В принципе, могут быть применены более сложные процедуры нормализации, которые позволят получить информацию о затухании импульса, эффекте перекрестных связей и прохождении импульсов по обмотке. Однако данные процедуры не рассматриваются в настоящем стандарте.

9 Процедура испытаний

9.1 Измерение ЧР в обмотках и их компонентах

9.1.1 Общие сведения

Измерения частичных разрядов в отключенных от сети вращающихся электрических машинах могут проводиться на комплектных обмотках, их отдельных фазах, секциях или компонентах. В случае комплектных обмоток или их секций они должны быть отключены от питающих сетей, шинных конструкций, защитных искровых разрядников и конденсаторов, а также возбудителей. Если возможно, провод испытательного устройства присоединяется непосредственно к клемме машины. Ни при каких обстоятельствах не допустим контакт с автоматическим выключателем. Во всех последующих испытаниях вся испытательная цепь, включая все ее компоненты в соответствии с разделом 7, должна быть соединена таким же образом, как это сделано в исходном испытании, чтобы обеспечить сопоставимость измерений. Кроме того, важно, чтобы система измерений, соответствующая разделу 5, и процедура нормализации, выполненная в соответствии с разделом 8, были одними и теми же для возможности сравнения результатов, в частности, при определении тенденций. Важно также обеспечить полное документирование условий испытаний в отчете, выполняемом в соответствии с разделом 11.

9.1.2 Испытательное оборудование и требования безопасности

Источник испытательного напряжения, используемый для питания испытуемого объекта, должен обеспечивать свободное развитие ЧР в соответствии с разделом 7 во всем диапазоне испытательных напряжений. Форма волны прикладываемого напряжения должна обеспечить соотношение $U_{pp}/U_{rms} = 2\sqrt{2} \pm 5$ %. Источник питания должен также иметь необходимую полную мощность (кВА) для питания обмотки. Если такая мощность труднодостижима, может быть использовано любое компенсирующее устройство, установленное последовательно или параллельно с источником. Как альтернатива, может быть проведено испытание на ЧР при пониженной частоте, например, с использованием оборудования, которое обеспечивает мощность питания при частоте 0,5 Гц или при более высоких частотах до 400 Гц, когда используется резонанс системы. Необходимо отметить, что в случаях использования очень низких частот полученные результаты исследования ЧР могут отличаться от результатов на рабочих частотах, поэтому прямое сравнение не возможно [3]. Какой бы метод ни был выбран, любые последующие испытания должны проводиться с использованием того же самого источника, чтобы со временем была возможность выявить тенденции.

Требования безопасности при высоковольтных испытаниях сводятся к следующим, хотя и не ограничены ими.

a) Цепи должны иметь надежное максимально-токовое реле или контактор для отключения питания при неисправности или пробое.

b) Все высоковольтные присоединения к клеммам статорных обмоток должны быть насколько возможно короткими и иметь надежные присоединения, чтобы избежать случайных разъединений в процессе испытаний. Должен быть доступен заземлитель.

c) Территория, на которой проводятся испытания объекта, должна быть ясно обозначена хорошо различимыми ограждениями.

d) Монтаж соединений и подача напряжения должны производиться персоналом, состоящим по крайней мере из двух человек.

Примечание — Правила и нормативные документы по безопасности применяются и в процессе испытаний.

9.1.3 Подготовка испытуемых объектов

Перед началом испытаний статор должен быть очищен. Кроме того, необходимо убедиться в наличии необходимого воздушного зазора между соседними фазными соединениями и кабелями внутри машины. Кабели не должны касаться друг друга и поверхностей, имеющих другой потенциал.

Перед началом испытания на ЧР необходимо убедиться в удовлетворительном сопротивлении изоляции обмоток, для чего измерить ее сопротивление, которое должно, будучи приведенным к 40 °С составлять не менее 100 Мом [4]. Измерение сопротивления изоляции покажет, является ли она грязной, влажной или неисправной. Если сопротивление изоляции недостаточно велико, рекомендуется электрические измерения производить лишь после предварительной очистки, просушки или после обнаружения причины низкого сопротивления изоляции. Однако по предварительной договоренности между испытателем и заказчиком испытания на ЧР можно проводить и без дополнительной обработки.

Отдельные компоненты обмотки (витки, стержни и секции обмоток) должны быть тщательно подготовлены перед подачей напряжения. Они должны быть очищены и высушены с применением защитных средств от коронного разряда. Следует избегать усиления поля на краях элементов, соблюдая хороший контакт всех жил. Покрытие проводящих пазов должно иметь контакт с заземлением по всей длине, чтобы обеспечить эквипотенциальную поверхность. Рекомендуется применять тонкий гибкий медный провод, многожильные проводники, покрытие металлической фольгой или применение специальных пазов.

9.1.4 Доводка

Обычно частичный разряд уменьшается в течение первых минут после подачи напряжения, поэтому для получения стабильного поведения ЧР в обмотке и ее компонентах в процессе измерений необходима предварительная доводка. Испытуемый объект должен находиться под напряжением несколько минут непосредственно перед началом регистрацией данных ЧР. Чтобы избежать перегрузки напряжение питания должно быть выбрано в соответствии с параметрами обмотки. Продолжительность доводки для новых и бывших в эксплуатации обмоток рекомендуется 5 минут при максимальном испытательном напряжении в соответствии с разделом 9.1.5. Доводка рекомендуется также и для обмоточных компонент. После проведения цикла доводки питающее напряжение вновь подается для проведения измерений ЧР.

9.1.5 Испытательные напряжения

Для испытаний на ЧР испытуемый объект соединяется в схему в соответствии с разделом 7 и на него подается напряжение, растущее ступенчато выбранными шагами (например, $\Delta U = 0{,}2U_{max}$) или плавно с выбранным темпом (≤ 1 кВ/с) до максимального значения U_{max}.

В случае ступенчатой подачи напряжения, как показано на рисунке 8a, время выдержки на каждой ступени составляет, по крайней мере, 10 с, что требуется для записи существенных параметров ЧР, включая диаграмму их распределения на каждом шагу.

При плавном увеличении испытательного напряжения, как показано на рисунке 8b, подаваемая мощность должна обеспечить свободное развитие ЧР в процессе его возникновения.

Максимальное значение испытательного напряжения Umax для новых обмоток и их частей следует выбирать, руководствуясь следующим:

$U_1 = U_N/\sqrt{3}$, или рабочее напряжение (линия-земля) изоляционной системы;

$U_2 = 1{,}2U_N/\sqrt{3}$, или 120 % рабочего напряжения (линия-земля) изоляционной системы;

$U_3 = U_N$, или номинальное линейное напряжение изоляционной системы.

Более высокие испытательные напряжения могут обеспечить дополнительную информацию.

Примечание — В случае испытания обмоток, бывших в эксплуатации, темп роста напряжения и его максимальное значение являются предметом договоренности между испытателем и заказчиком.

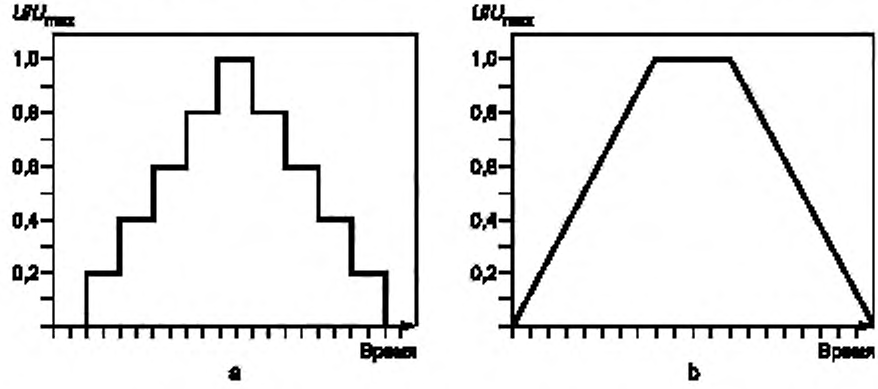


Рисунок 8 — Испытательное напряжение, прикладываемое к объекту испытаний при измерении ЧР

9.1.6 Процедура испытания на ЧР

9.1.6.1 Оценка фоновых помех

Перед началом испытаний на ЧР должен быть оценен уровень внешних помех, сопровождающих данные испытания, чтобы убедиться в том, что установленное оборудование имеет достаточно низкий уровень помех и позволяет проводить испытания ЧР вплоть до максимального напряжения. Это может быть реализовано на полностью готовом к испытаниям на ЧР оборудовании путем предварительной замены объекта испытаний на разрядный конденсатор. При отсутствии подобного конденсатора можно провести испытание при полностью включенной схеме без нагрузки с включенным источником питания, соединительным звеном и измерительным устройством, но отключенным испытуемым объектом при максимальном испытательном напряжении. При таком испытании необходимо провести нормализацию в схеме без нагрузки, чтобы получить надежные результаты. Если при последующих испытаниях будет прикладываться возрастающее напряжение, испытание без нагрузки необходимо проводить при таких же условиях.

9.1.6.2 Уменьшение влияния шума и помех

Шум, происходящий от различных источников практически не может быть устраним, например, термический шум в соответствии с приложением С (Внешний шум, помехи и чувствительность). Помехи, которые происходят от внешних источников, могут быть уменьшены и даже исключены применением специальных мер. В первую очередь необходимо локализовать сигналы помех при их появлении, а затем принять соответствующие меры по их уменьшению. В общем случае, для оптимизации измерительного оборудования могут быть рекомендованы следующие меры.

- Используйте проверенные на практике сочетания соединительных узлов и измерительного оборудования.

- Устанавливайте соединительное звено как можно ближе к испытуемому объекту, чтобы уменьшить ослабление сигнала между ними.

- Присоедините источник питания и соединительное звено к обмоточным клеммам с противоположных сторон, как указано в разделе 7, чтобы помехи от источника питания, проходя через обмотку, ослаблялись.

- При испытании комплектных статорных обмоток обеспечьте соединение проводников, идущих от встроенных датчиков температуры с заземленным корпусом статора.

- Схема с трансформатором и соединительным звеном должна быть нормализована и испытана, чтобы получить представительную информацию об амплитуде помех.

- Нормализация и измерения помех испытательной схемы рекомендуются перед каждым ее использованием. Условия нормализации могут изменяться в зависимости от места и времени испытаний, состояния источника питания, загрязнения трансформатора, старения изоляции и других факторов.

- В общем случае целесообразно заземлять испытуемый объект и измерительное устройство на большую заземляющую поверхность. Если возможно, следует использовать общую точку присоединения для соединительного звена, испытуемого объекта и измерительного устройства.

- Разрабатывайте, насколько возможно, наиболее компактную конструкцию испытательного оборудования. Короткие измерительные и заземляющие проводники, компактные схемы уменьшают индуктивности и сокращают эфирные электромагнитные помехи.

- Некоторые измерительные кабели требуют установки согласующего резистора во избежание эффекта отражения. По той же причине рекомендуется использовать только проверенные на практике кабели.

- Некоторые электронные приборы, например мониторы и компьютеры, могут вносить помехи в измерительные цепи. Часто бывает достаточно лишь изменить их ориентацию относительно измерительных схем, чтобы уменьшить отрицательное влияние.

9.1.6.3 Испытания на ЧР

В полностью подготовленной и собранной в соответствии с разделом 7 измерительной схеме испытательное напряжение подается на испытуемый объект, как описано в разделе 9.1.5. На каждой ступени подаваемого напряжения или в процессе его плавного повышения должны быть зарегистрированы и записаны рекомендуемые в разделе 6 параметры ЧР, чтобы получить их адекватное представление. Измерения должны быть проведены при увеличении и уменьшении испытательного напряжения (см. рисунок 8), чтобы обеспечить получение зависимости $Q_m = f(U)$, а также напряжение начала (PDIV) и напряжение гашения (PDEV) частичных разрядов в соответствии с разделом 6.

Если параметры частичного разряда в процессе воздействия напряжения записываются электронной аппаратурой автоматически, могут быть получены описанные в разделе 6 диаграммы, которые, будучи обработаны по методике раздела 10, позволят дать оценку ЧР. Она может включать распределение амплитуды импульсов, фазовые портреты, специфические модели ЧР (см. разделы 6 и 10) при различных уровнях возрастающего и спадающего напряжения.

Должны быть зафиксированы различные комментарии и выводы, полученные в процессе испытаний, для дальнейшего использования. В зависимости от типа испытуемой машины и целей выполняются стандартные или расширенные испытания, как описано в разделе 7.

9.2 Определение наличия и расположения ЧР

9.2.1 Общие сведения

Электрические измерения ЧР на зажимах образца позволяют зарегистрировать значения амплитуды, частоты и полярности разрядов при использовании приборов, измеряющих параметры ЧР в соответствии с п. 6.3. Однако, чтобы представить эти параметры в полезную информацию о состоянии обмотки, необходимо определить расположение источника частичных разрядов.

Как правило, вначале испытание на ЧР проводится для одной из фаз обмотки, в то время как две другие заземлены. Это позволяет определить характеристики распределения ЧР или его диаграмму рассеяния для каждой фазы. Последующее пофазное испытание позволяет выяснить, достаточна ли кажущаяся (выраженная в кВА) мощность для одновременного питания всех трех фаз обмотки при основных базовых испытаниях источников частичных разрядов отключенного от сети двигателя. В этих условиях не проявляется явление межфазного перепада напряжения в лобовых частях обмоток. Когда

все три фазы питаются одновременно от одного источника, разряды, связанные с межфазным влиянием, исключаются из характерных признаков ЧР. Разряды фаза — земля остаются явно выраженными, и их источники могут быть подробно исследованы. Соответствующее уменьшение амплитуды ЧР и количества импульсов свидетельствует о том, что лобовые части влияют на сигнал, полученный при пофазном измерении. Это важный способ распознавания ЧР в лобовых частях и пазу.

В ряде случаев для выяснения источника разряда может быть полезно по возможности разделить обмотку. Однако, поскольку машиностроители одновременно применяют контактирующие друг с другом полюсные перемычки, кольцевые витки и фазные проводники, возможна ситуация, когда одна цепь заземлена, а другие подключены к источнику, и при этих аномальных условиях могут быть зафиксированы высокие уровни ЧР.

Примечание — В случаях, когда необходимо разделить обмотку, заказчик и испытатель могут проконсультироваться с производителем машины о порядке проведения испытаний.

Разработаны разнообразные дополнительные методы испытаний, использующие различные эффекты частичных разрядов. Чтобы убедиться в наличии или отсутствии разрядов в лобовых частях, на практике бывает полезно использовать какой-либо оптический прибор или камеру, позволяющие установить наличие коронного разряда с каждой стороны лобовых частей. Преимуществом испытаний на отключенной от сети машине является то, что они могут проводиться на разобранной машине с вынутым ротором, если в этом имеется необходимость.

Нижеследующее описание относится к весьма распространенному электрическому методу определения местоположения ЧР. Неэлектрические методы локализации источников ЧР рассмотрены в приложении В.

9.2.2 Электромагнитные исследования

Использование электромагнитных измерений для определения местоположения источников ЧР предусматривает сканирование статорных пазов (после изъятия ротора), мест выхода из пазов, зоны лобовых частей обмоток при различных напряжениях питания. Кроме испытаний при максимальном напряжении, могут проводиться сходные измерения на промежуточных уровнях напряжения ниже максимального. Обычно данные испытания проводятся в случаях, когда сравнительные результаты могут быть представлены в определенной базе данных, дающей возможность систематизировать испытуемые машины.

Следует отметить, что активность ЧР может не ограничиваться лобовыми частями обмоток машин. Распределительные коробки, кабельные трассы, клеммные панели, изоляторы и другие элементы могут вызывать ЧР и быть учтены при выборе метода испытаний. Необходимо учитывать, что испытания могут нарушить картину электрического поля, что, в свою очередь, может привести к возникновению ложных разрядов. При испытаниях на ЧР в лобовых частях обмоток должны быть предприняты дополнительные меры безопасности для испытательного персонала.

10 Интерпретация результатов испытаний

10.1 Общие сведения

В общем случае измерения частичных разрядов в обмотках и их частях при производстве машин направлены на доказательство стабильности и качества производства, в то время как испытания ЧР на месте эксплуатации призваны определить степень старения изоляции под действием различных факторов износа в процессе работы. В обоих случаях интерпретация результатов испытаний является необходимым важным шагом, завершающим данные испытания. В зависимости от их результатов либо необходимо принятие решение относительно качества изоляционной системы, если замечены явные дефекты, либо предпринять дополнительные испытания или спланировать профилактические работы по обслуживанию.

Следует отметить, что каждая отдельная машина выпущена производителем по своей технологии, обладает специфическими особенностями конструкции и системы изоляции, а также в процессе эксплуатации подвергается индивидуальным стрессовым условиям. Это приводит обычно к значительному отличию в количестве частичных разрядов в зависимости от индивидуальных свойств испытуемой машины. Поэтому невозможно прямое сравнение различных машин по абсолютным значениям измеряемых величин.

Невозможно также установить абсолютные критерии для комплектных обмоток, например критерии при производстве и в эксплуатации. Поэтому в данном стандарте не даны конкретные данные для оценки качества.

Для улучшения интерпретации результатов испытаний комплектных обмоток на ЧР должны быть тщательно учтены результаты предыдущих наблюдений, например визуальных.

10.2 Интерпретация напряжения начала и гашения ЧР

10.2.1 Базовая интерпретация

Основными результатами испытаний комплектных обмоток и их частей на ЧР, которые подлежат интерпретации, являются начальное напряжение ЧР (PDIV), напряжение гашения ЧР (PDEV) и наибольшая повторяющаяся амплитуда ЧР (Q_m), измеренные при нарастании и спадании испытательного напряжения в соответствии с 6.2.

Даже если отдельная картина ЧР не обязательно дает местоположение источников в обмотке, представляющих наибольшую опасность, определение и интерпретация амплитуды ЧР, как функции испытательного напряжения, обеспечивает простое и эффективное средство нахождения типичных основных источников ЧР.

Интерпретация для комплектных статорных обмоток носит всегда сравнительный характер. Таким образом, в общем случае невозможно определить допустимый уровень Q_m или тот уровень, при котором имеется наибольший риск повреждения изоляции. Как указано в разделе 8, этот параметр связан с индуктивностью, емкостью и передаточной характеристикой статорной обмотки, равно как и факт, что ЧР является показателем ухудшения изоляции обмотки, но не его прямой причиной. Однако содержательная интерпретация результатов может быть достигнута нижеперечисленными процедурами:

- анализ тенденций изменения Q_m на одном и том же статоре через определенный промежуток времени путем использования одного и того же метода испытаний и средств испытаний с теми же характеристиками;
- сравнение Q_m, измеренных на нескольких статорах сходной конструкции с использованием одного и того же метода испытаний и средств испытаний с теми же характеристиками;
- сравнение Q_m на разных фазах одного статора с использованием одного и того же метода испытаний и средств испытаний с теми же характеристиками

Результаты измерений ЧР в частях обмоток и стержнях, выраженные в пКл, и амплитуды ЧР являются абсолютными. Это позволяет сравнивать амплитуды ЧР в разных витках и стержнях между собой и результаты измерений, полученные различными приборами. На различных компонентах обмоток начальное напряжение ЧР (PDIV) и напряжение гашения ЧР (PDEV) измеряются с максимальным заданным фоновым шумом в пКл.

В общем случае, чем больше PDIV и PDEV, тем лучше пропитаны обмотки и их компоненты и тем меньше изъянов в изоляции.

10.2.2 Тенденции изменения ЧР во времени

Анализ тенденций изменения ЧР является мощным средством интерпретации измерений амплитуды ЧР на комплектных статорных обмотках, независимо от используемого метода. Сначала необходимо получить исходный характерный признак активности ЧР на отключенной от сети машине. Данный признак наилучшим образом может быть получен на новой обмотке. При износе обмотки в процессе эксплуатации Q_m обычно со временем увеличивается. К примеру, удвоение Q_m через год может свидетельствовать о заметном износе изоляции. Могут быть рекомендованы дополнительные испытания на отключенной от сети машине, испытания на ЧР и визуальный контроль обмоток.

Следует сделать ряд замечаний относительно тенденций изменения ЧР во времени.

- Новый статор может иметь относительно высокий уровень ЧР, который уменьшается после первых 5000 и до 10000 эквивалентных часов работы.
- Чтобы тенденции были сопоставимыми, графики должны быть представлены при аналогичных напряжениях, температуре и влажности, а также одних и тех же датчиках ЧР. Насколько возможно, напряжение при переходе от одного испытания к другому должно меняться не более чем на ±2,5 %, а температура испытуемого объекта — на ±10 °С. Машины с водородным охлаждением рекомендуется испытывать при обычных атмосферных условиях, однако газ и давление должны оставаться теми же при последующих испытаниях.
- Некоторое изменение значения Q_m, например ±25 %, можно считать нормальным в условиях случайных изменений условий испытаний или случайного характера процессов ЧР.

Если изменения ЧР велики или отдельные показания имеют сильный выброс относительно аналогичных в той же обмотке или витке, данные анализа ЧР должны быть проанализированы на предмет причины активизации ЧР. В этом случае для идентификации источника ЧР полезно проанализировать полученные диаграммы рассеяния ЧР (рисунок 4) в соответствии с п. 10.3.

10.2.3 Сравнение обмоток и их элементов

Другим способом определения отличия обмоток или их элементов друг от друга является сравнение измеренных в них параметров ЧР. Возможны следующие виды испытаний.

a) Заводские испытания обмоточных элементов

Прямое сравнение может быть выполнено по значениям PDIV, PDEV и Q_m , если измерения сделаны в соответствии с процедурами, описанными в IEC 60270, независимо от конструкции элемента и измерительного оборудования. Результаты таких испытаний могут быть использованы для выяснения, имеются ли изменения в технологии или изоляционных материалах, используемых в данном элементе. Обычно испытаниям на ЧР подвергается малая доля обмоточных элементов.

b) Заводские испытания обмоток.

При сравнении подобных машин по итогам испытаний на ЧР наиболее надежные результаты получаются при сравнении подобных машин с одинаковыми изоляционными системами при одинаковых напряжениях, близких температуре и влажности в соответствии с п. 10.2.2. Испытания, к тому же, должны проводиться теми же средствами измерений частичного разряда, работающими в том же частотном диапазоне и в такой же схеме измерений. Что касается анализа изменения ЧР во времени (10.2.2), то изменение Q_m на несколько процентов, например на 25 %, не является существенным. Целью таких сравнительных испытаний на производстве является сравнение качества материалов и технологии, используемых при изготовлении обмоток. Покупатели могут потребовать от производителя гарантий, что новая обмотка выполнена столь же качественно, что и прежняя. Это означает, к примеру, что Q_m обмотки при определенном испытательном напряжении составляет менее 95 % от значения амплитуды Q_m, достигнутого производителем в такой же обмотке, выпущенной в прошлом.

В некоторых случаях производитель может сравнить характеристики ЧР новой обмотки с характеристиками обмоток, выпущенных ранее. В этом случае производитель может убедиться, что группа различных конструкций имеет одинаковое распределение и параметры ЧР. Обычно подобные машины имеют сходную конструкцию, один и тот же тип (двигатели, турбогенераторы и т. п.) и аналогичный диапазон напряжений.

Из-за различия в технологии производства и материалах, а также в методах испытаний на ЧР, сравнение параметров ЧР на комплектных обмотках различных изоляционных систем, изготовленных различными производителями, не представляется возможным.

c) Испытания на месте эксплуатации

Сравнение, имеющее целью выяснить, какая из обмоток будет иметь больший срок эксплуатации, может быть сделано для обмоток, имеющих одну конструкцию, номинальные параметры и выполненных одним производителем. Обмотки с более высоким Q_m, при том же испытательном напряжении или более низким PDIV и PDEV, в общем случае будут более изношены. При таких испытаниях следует использовать одно и то же испытательное оборудование и диапазон частот

10.3 Разработка моделей ЧР

10.3.1 Общие сведения

При испытаниях отключенных от сети электрических машин, если данные для каждого ЧР в период измерения записаны в соответствии с указаниями п. 6.3, может быть использован альтернативный метод интерпретации ЧР. При этом используются $\varphi - q - n$ диаграммы рассеяния импульсов, представленные на рисунке 4. Так как степень износа, а значит и риск разрушения изоляции существенно зависят от конкретного типа частичного разряда, важно иметь надежную информацию об источнике любой ЧР активности, т. е. о его типе и местоположении в статорной обмотке или ее элементе.

Используя $\varphi - q - n$ диаграммы рассеяния импульсов, можно отделить различные источники ЧР импульсов один от другого, чтобы оценить по отдельности риски и тенденции их развития. Если знать физические процессы или местоположение отдельных источников ЧР, также возможно оценить их риск по отдельности. Это должно быть сделано, поскольку связь между параметрами ЧР и процессом старения, индицируемым диаграммами рассеяния ЧР, незначительна.

Например, может случиться, что две частные диаграммы рассеяния, снятые для одного процесса ЧР, показывают близкие значения параметров ЧР. одна из них, к примеру, обусловлена расслоени-

ем внутри основной изоляции паза, а другая — поверхностными эффектами где-то в лобовых частях обмоток. Хотя обе причины приводят к одинаковым значениям амплитуды ЧР, расслоение изоляции является более существенной причиной, т. к. является следствием перегрева или термоциклирования, а поверхностный разряд на лобовых частях может быть вызван загрязнением или повышенной влажностью.

10.3.2 Базовая интерпретация

Основная процедура, реализуемая для идентификации и определения местоположения типичных источников ЧР в обмотках с использованием $\varphi - q - n$ диаграмм рассеяния импульсов, представлена на рисунке 9. Каждая частная диаграмма, выделенная из общей картины распределения ЧР, может быть представлена так, как показано на данном рисунке.

Цель интерпретации диаграмм ЧР состоит в распознавании ЧР, получаемых от различных источников в испытуемом объекте. Одновременно с получением этой информации возможно следующее:

- оценка тенденций поведения каждого источника ЧР;
- локализация различных эффектов ЧР;
- получение приближенной информации о местонахождении для точного его определения;
- оценка состояния изоляции в зависимости от источника и расположения ЧР.

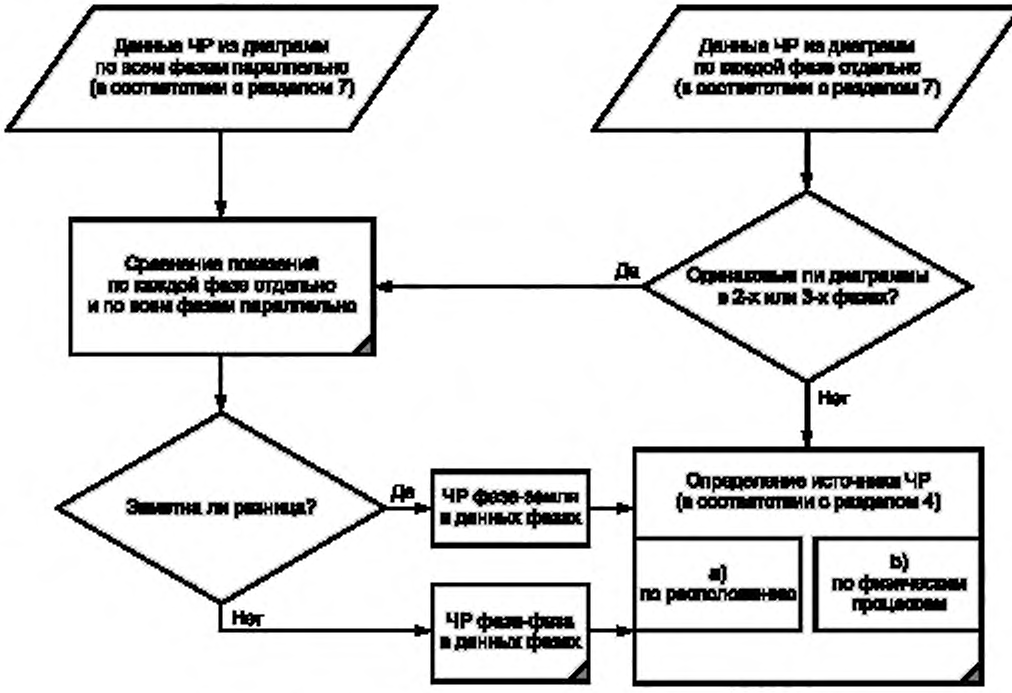


Рисунок 9 — Определение источника расположения источника ЧР

Кроме того, при анализе фазовых диаграмм ЧР наиболее представительная информация может быть получена следующим образом:

- оценка изменений диаграмм ЧР на одном и том же статоре через определенные промежутки времени с использованием одного и того же метода и оборудования с одними и теми же характеристиками;

- сравнение диаграмм ЧР на нескольких статорах одной и той же конструкции с использованием одного и того же метода и оборудования с одними и теми же характеристиками;

- сравнение диаграмм ЧР на различных фазах одного и того же статора с использованием одного и того же метода и оборудования с одними и теми же характеристиками.

Чтобы облегчить сравнение результатов, для их записи следует использовать соответствующую базу данных. В идеале она должна содержать полную историю поведения ЧР, а также условия работы и характеристики поведения каждой машины при испытаниях.

Рекомендуется, кроме того, в базу данных включить результаты испытаний на ЧР, визуализированные в соответствии с разделом 6, чтобы можно было напрямую сравнить типичные ЧР диаграммы с полученными при новых измерениях. В таких базах данных результаты испытаний на ЧР, систематизированные в соответствии с разделом 6, могут соотноситься с характерными источниками ЧР.

Характерная взаимосвязь между источником ЧР, типичным поведением ЧР и его влиянием на опасность повреждения изоляции, как правило, основана на проверенном практикой предыдущем опыте. Базы данных также могут быть использованы для прямого сравнения результатов испытаний на ЧР машин сходной конструкции и имеющих подобные системы изоляции.

11 Отчет об испытаниях

Отчет об испытаниях должен содержать как все необходимые данные для дальнейшего анализа тенденций, так и ясную информацию о состоянии машины для ее пользователя.

Отчет об испытаниях должен содержать следующие позиции.

- Данные двигателя
  - Производитель
  - Тип и заводской номер
  - Год выпуска
  - Исходная обмотка/дата перемотки
  - Номинальное напряжение
  - Номинальный ток
  - Номинальная полная мощность
  - Номинальный коэффициент мощности
  - Номинальная частота
  - Класс изоляции / максимальная допустимая температура обмотки
  - Система изоляции
  - Система / среда охлаждения статора
    - Косвенное охлаждение/водород/углекислый газ
    - Прямое охлаждение/воздух/водород/вода
- Информация о владельце
  - Владелец
  - Местоположение
  - Установка
- Условия работы[1)]
  - Режим работы (постоянный / повторно-кратковременный)
  - Приводной инвертор
  - Общее / или эквивалентное число часов работы на дату испытания
  - Общее число пусков, если возможно, по отдельности горячих, теплых, холодных
  - Общее число автоматических выключений на дату испытания
  - Максимальная температура обмотки и сопутствующие условия
  - Средняя температура обмотки
  - Важные события на дату испытания
- Схема испытания и оборудование
  - Описание схемы испытания
  - Испытательное оборудование
    - Производитель
    - Тип
    - Заводской номер
    - Дата калибровки и номер аттестата
    - Емкость соединительного конденсатора (если имеется)
  - Полоса пропускания системы измерения ЧР

[1)] Рекомендуемые для обеспечения удовлетворительной интерпретации результатов испытаний на ЧР.

● Условия испытания
- Испытатель
- Дата испытания
- Внешняя температура при испытании
- Температура обмотки статора
- Относительная влажность
- Внешнее атмосферное давление
- Состояние машины / статорной обмотки (система охлаждения, хладагент, давление)

● Результаты испытания
- Сопротивление изоляции
- Режимы измерительных приборов
- Уровень испытательного напряжения / темп нарастания
- Процесс доводки
- Коэффициент приведения / калибровки соединения, если необходимо
- Уровень шума
- Источники внешних возмущений, если известны
- PDIV, PDEV, $Q_m = f(U)$
- Пороговое значение PDIV и PDEV
- Повторяющееся значение Q_m, если известно
- Распределение числа разрядов в зависимости от фазы, если известно
- Распределение амплитуды разрядов в зависимости от фазы, если известно
- Осциллограммы импульсов, если имеются
- Фазовые диаграммы распределения ЧР, если имеются

● Выводы и рекомендации
- Основываются на
    - ○ результатах измерений
    - ○ сравнении с предыдущими измерениями, если те доступны
    - ○ наблюдениях в процессе измерений
    - ○ использовании Базы данных для определения природы измеренных частичных разрядов

Примечание — Результаты измерений рекомендуется сохранять в исходном формате для удобства использования в будущем.

Приложение А
(справочное)

Измерения частичных разрядов на включенных в сеть вращающихся электрических машинах

Испытания на включенных в сеть электрических машинах выполняются при работе генератора или двигателя в нормальных условиях. Такие испытания могут проводиться с включенными временно или постоянно соединительными устройствами. Такие устройства разработаны различными организациями и ряд из них имеется в коммерческом доступе. Детали всех методов, важных для промышленного использования, предусмотрены в IEEE 1434-2000 [1]. Данный документ содержит широкое обсуждение и описание происхождения, последствий и способов определения частичных разрядов с использованием техники испытаний при включенных и отключенных от сети электрических машин.

Главное преимущество измерений на включенных в сеть электрических машинах состоит в том, что машина при этом находится под воздействием температурных, электрических, механических и внешних факторов. Соответственно, если измерения проведены правильно, данный метод дает наиболее надежный прогноз о дальнейшей надежной работе машины.

Испытания на включенных в сеть электрических машинах имеют следующие преимущества:

- правильное распределение напряжения в обмотках;
- измерения проводятся при рабочей температуре;
- присутствуют рабочие механические нагрузки.

Первое преимущество уменьшает риск получения излишне пессимистичных результатов измерения ЧР на машине, так как оно делает измерения чувствительными к наиболее электрически нагруженным частям обмоток. Второе преимущество также весьма важно, ввиду зависимости ЧР от температуры в обмотках вращающихся электрических машин, равно как и в иных изоляционных системах. Помимо влияния температуры на характеристики полостей, известно сильное влияние изменения температуры на поведение ЧР, реализуемое через такие механизмы, как

- различие между осевым расширением медного проводника и изоляции,
- радиальное расширение изоляции в термопластичных изоляционных системах.

Соответственно, важно обеспечить уверенность, что условия работы машины остаются теми же, что и при испытаниях. Однако в ряде случаев для анализа результатов измерения ЧР бывает полезно провести испытания при различных нагрузках и температурах, чтобы разделить влияние температуры и вибрации от электромагнитных сил, действующих на обмотки. Основными значимыми параметрами работы являются:

- напряжение на клеммах;
- активная и реактивная мощность;
- давление водорода, если присутствует;
- температура статора;
- ток статора.

Руководство в отношении отклонений этих параметров дано в IEC 1434-2000. Возможность выполнить испытания на ЧР при рабочих нагрузках является основным преимуществом испытаний на включенных в сеть электрических машинах перед испытаниями на отключенных от сети машинах. При должным образом проведенных, проанализированных и интерпретированных испытаниях на отключенных от сети машинах возможно обстоятельно оценить состояние изоляции, однако останется неопределенность, обусловленная температурой и отсутствием электромагнитных сил. По этой причине в таких испытаниях не удается определить неплотную упаковку обмотки, пока истирание полупроводниковой оплетки из-за относительного перемещения обмотки или стержня и железом сердечника не станет значительным.

Однако испытания на включенных в сеть электрических машинах имеют и ряд недостатков:

- электрические помехи;
- объем данных
- интерпретация.

Первый из этих недостатков — проблема электрического шума — широко обсуждался ранее. Объем данных может стать проблемой для производителей и пользователей, требуя испытания большого количества машин, особенно в ситуациях, когда интервалы испытаний составляют несколько месяцев. Эта проблема усугубляется при использовании постоянно включенного оборудования для испытания включенных в сеть электрических машин. Очевидным решением при этом является использование различных способов сжатия данных и обработки сигналов, которые соответствуют характерным процедурам обработки данных испытаний на ЧР и избирательно анализируют отклонения данных от норм, требующие дальнейшего внимания. Для решения таких задач в принципе могут использоваться методы нейронных сетей и экспертных систем. К сожалению, сегодняшнее понимание причин, механизмов и явлений частичного разряда не дает достаточных оснований для принятия всеобъемлющих решений по автоматизации данных процессов. Очевидна необходимость дальнейшей работы в данной области. Аналогичные комментарии можно отнести к интерпретации данных. В то время как основные правила представления данных содержатся в литературе, согласованы усилиями CIGRE и формализованы в технической брошюре 226 CIGRE [2], полное понимание смысла и значения регистрируемого поведения ЧР еще не достигнуто. Вопреки притязаниям на успех в статистической обработке данных ЧР, их автоматизированной расшифровке и представлению, доверие к ним еще не достигло того уровня, которого достоин искусный и опытный эксперт.

Приложение В
(справочное)

Неэлектрические методы измерения ЧР и методы определения их местоположения

Ниже приведены методы, которые не являются сопоставимыми и количественными.

a) Визуальное определение. Испытание в затемненном помещении при переменном напряжении: определение наличия и местоположения поверхностных разрядов.

b) Оптическое определение. Испытание с ультрафиолетовым оборудованием [см. перечисление a)].

c) Акустическое определение. Испытание при переменном напряжении в заглушенном помещении: определение местоположения невооруженным ухом или с помощью звуковода (с электрической защитой), например изолированным стетоскопом. Следует отметить, что обычно таким способом в двигателях с корпусной изоляцией невозможно определить недостаточно активные ЧР.

d) Ультразвуковое определение. Испытание с ультразвуковым оборудованием [см. перечисление c)].

e) Определение по наличию озона. Присутствие поверхностных разрядов вызывает химические реакции. Одним из сопутствующих продуктов при реакции является озон, который обладает характерным запахом.

Приложение С
(справочное)

Внешний шум, помехи и чувствительность

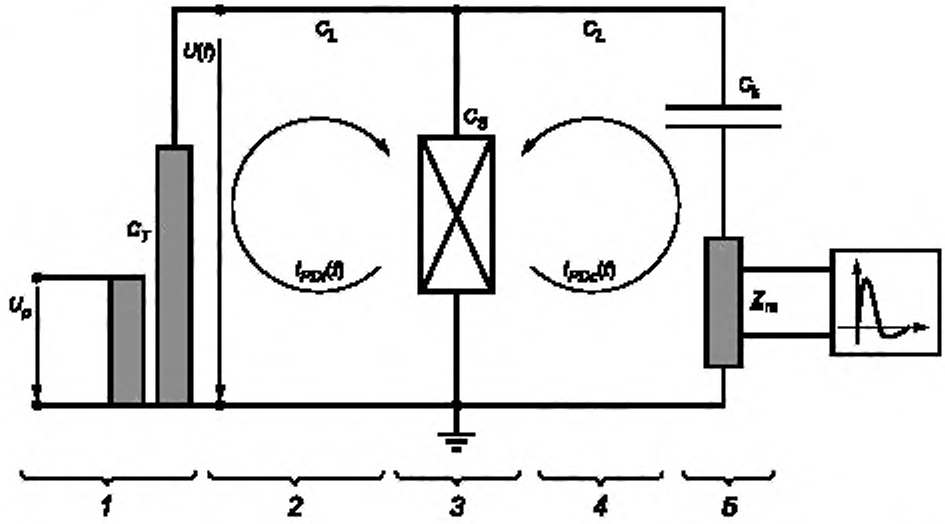
С.1 Общие сведения

Шум и помехи могут быть определены как нежелательная составляющая анализируемого электрического сигнала. Особенности измерений ЧР требуют, чтобы шум был классифицирован как вызванный внешними помехами атрибут, присущий средствам измерений. Внешние помехи от постоянных волновых или пульсирующих источников существуют в виде кондуктивных и эфирных. Существует тесная связь между чувствительностью, шумом и помехами. Поэтому невозможно обсуждать по отдельности эти три параметра. Поскольку испытания с отключенными от сети двигателями или испытания на производстве обычно уже предполагают определенные средства измерений, в следующих разделах содержатся лишь основополагающие проблемы и способы их решения.

С.2 Чувствительность

Чувствительность устройства для определения ЧР может быть приближенно определена как отношение фактической энергии ЧР в месте его возникновения к энергии, достигшей датчика в месте его установки. В момент возникновения ЧР все измерительное оборудование, условно представленное на рисунке С.1, содержащее емкости, трансформатор (i_{PDt}), проводники (i_{PDl}), соединительное устройство (i_{PDc}) и собственно испытуемый объект (i_{PDs}), участвует в процессе ЧР. Очевидно, сумма всех составляющих токов, с учетом не показанных на рисунке паразитных, равна току в месте разряда: $i_{PD} = i_{PDt} + i_{PDl} + i_{PDc} + i_{PDs}$. Соответственно, отношение $i_{PDc}/(i_{PDt} + i_{PDl} + i_{PDs})$, т. е. относительное смещение заряда на соединительном конденсаторе, отражает чувствительность измерения и, таким образом, чем больше емкость соединительного устройства, а при этом — и отношение соединительной емкости к емкости испытуемого объекта, тем выше чувствительность измерения.

Поэтому, выбирая конденсатор соединительного устройства, следует ожидать с ростом его емкости увеличения чувствительности. Данный конденсатор, по крайней мере, должен соответствовать полосе пропускания измерительного устройства и его импедансу Z_m.



1 — трансформатор и вспомогательные цепи; *2, 4* — линия; *3* — испытуемый объект; *5* — соединительное устройство, $U(t)$ — испытательное напряжение (вторичное напряжение трансформатора); U_p — первичное напряжение трансформатора; C_L — паразитная емкость линии; C_S — емкость объекта испытания; C_T — паразитная емкость трансформатора; $i_{PDt}(t)$ — переходный ЧР ток через трансформатор; $i_{PDc}(t)$ — переходный ЧР ток через соединительное устройство

Рисунок С.1 — Составляющие тока разряда испытуемого объекта

С.3 Шум и отношение сигнал—шум

Суммарный шум в электронных системах определяется двумя различными составляющими: основной и добавочной. Основная составляющая шума возрастает из-за перемещения дискретных зарядов в электрических

цепях и не может быть полностью устранена. Добавочную составляющую увеличивает некачественное измерительное оборудование и неидеальная работа элементов схемы; данная составляющая может быть уменьшена до незначительного уровня. Обе составляющие, в принципе, имеют амплитуду, не связанную с частотой. Поскольку добавочная составляющая шума зависит в основном от конструкции измерительных приборов, она лишь в малой степени зависит от действий персонала при проведении ЧР измерений, поэтому в дальнейшем не рассматривается.

Основная составляющая шума определяется главным образом температурным шумом (шум Джонсона) и вызвана термическим перемещением дискретных зарядов. Проходя через сопротивление, движущиеся заряды вызывают падение напряжения, которое воспринимается как шум на элементах схемы. Очевидно, уровень шума растет с повышением температуры (более быстрое термическое движение) и с повышением сопротивления (больше падение напряжения на нем).

Поскольку все ЧР измерительные системы, соответствующие IEC 60270, работают в принципе с квази-интегральными фильтрами, полоса пропускания измерительных приборов определяет одинаковое прохождение сигнала и шума: чем больше полоса пропускания, тем большая энергия сигнала может быть зафиксирована. Поэтому выходной сигнал такого интегратора растет с увеличением полосы пропускания, что выражается в росте как сигнала измеряемого ЧР, так и шума. Однако, в отличие от амплитудно-частотного спектра измеряемого ЧР, который не меняется вплоть до весьма высоких частот, спектр термического шума уменьшается с увеличением частоты.

Поскольку выходной сигнал полосового фильтра пропорционален ширине полосы пропускания для ЧР импульса и пропорционален корню квадратному полосы пропускания термического шума, соотношение сигнал—шум SNR растет примерно пропорционально квадратному корню ширины полосы пропускания — чем больше ширина полосы пропускания, тем больше SNR.

Описанные в данном разделе соотношения пригодны для соединительного устройства с фиксированным значением сопротивления измерительного резистора. Такое устройство имеет фиксированную нижнюю частоту среза и поэтому подходит для одного конкретного применения. Чтобы снизить частоту среза, необходимо увеличить соединительную емкость. Большие соединительные звенья определяют большие токи через датчик и, следовательно, большие выходные сигналы. Поэтому устройства, работающие в нижних диапазонах частот с малой шириной полосы пропускания, могут иметь то же значение SNR, что и высокочастотные устройства с широкой полосой пропускания.

С.4 Помехи

В данном разделе проводится различие между помехами и шумом в контексте их природы. Помехи возникают спонтанно или периодически от внешних источников, например преобразователей, просадок напряжения, близко расположенных коронных разрядов. При установке оборудования для испытаний на ЧР отключенных от сети электрических машин должны быть приняты меры по устранению негативного влияния помех. В таких испытаниях некоторые внешние источники помех не столь критичны, как в испытаниях включенных в сеть электрических машин. Ряд общих правил по уменьшению влияния помех приведен в разделе 9.1.6.2.

Приложение D
(справочное)

Методы уменьшения помех

D.1 Ограничение частотного диапазона

Идея данного метода состоит в том, что частотный спектр внешних помех не имеет постоянного характера, подобного представленному на рисунке 1 спектру ЧР импульсов.

Чтобы уменьшить влияние таких помех на измерительные цепи, могут быть использованы узкополосные (5.4) системы с полосой пропускания от 9 кГц до 30 кГц. Перемещая центральную частоту между помехами наибольшей амплитуды, влияние помех можно значительно ослабить. Измерительное устройство может быть подобрано к условиям испытания.

D.2 Маскировка фазовых диаграмм

Стабильные фазные помехи могут быть устранены путем исключения их, что иллюстрируется рисунками D.1 и D.2. Это может быть достигнуто электронными средствами путем блокировки измерительного канала на предварительно определенных фазовых окнах. Необходимо понимать, что таким образом маскируется как сигнал помехи, так и полезный сигнал ЧР, а исключенные данные безвозвратно теряются.

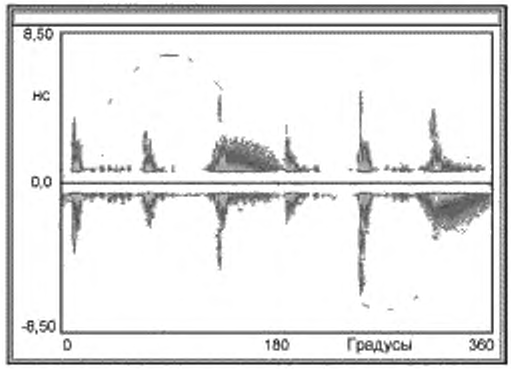


Рисунок D.1 — Диаграмма без маскировки

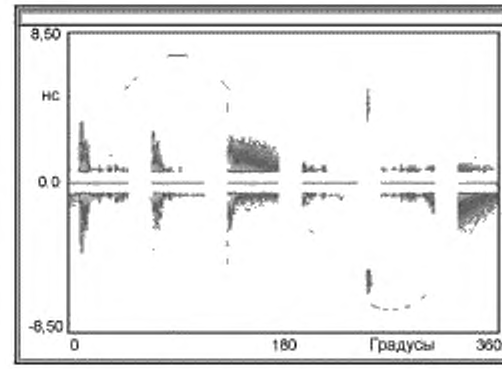


Рисунок D.2 — Диаграмма с маскировкой

D.3 Маскировка путем переключения на сигнал шума

При данном способе измерительная схема должна быть укомплектована по крайней мере двумя входными каналами: кроме измерительного необходим второй, работающий в режиме стробирования. При пропускании сигнала вторым каналом, настроенным точно на источники помех, первый канал в течение этого периода не работает.

D.4 Определение шума измерением времени распространения сигнала

Импульс частичного разряда распространяется, как волна, через испытуемый объект и кабели. Поэтому данный импульс оказывается в различных местах в различное время. При установке двух соединительных ЧР устройств в различных местах может быть зафиксировано направление распространения импульса. Внешние ЧР сигналы, равно как и внешние помехи, таким образом могут быть отделены от ЧР сигналов испытуемого объекта. Если внешние помехи интегрируются в испытуемый объект, они и расшифровываются как ЧР испытуемого объекта.

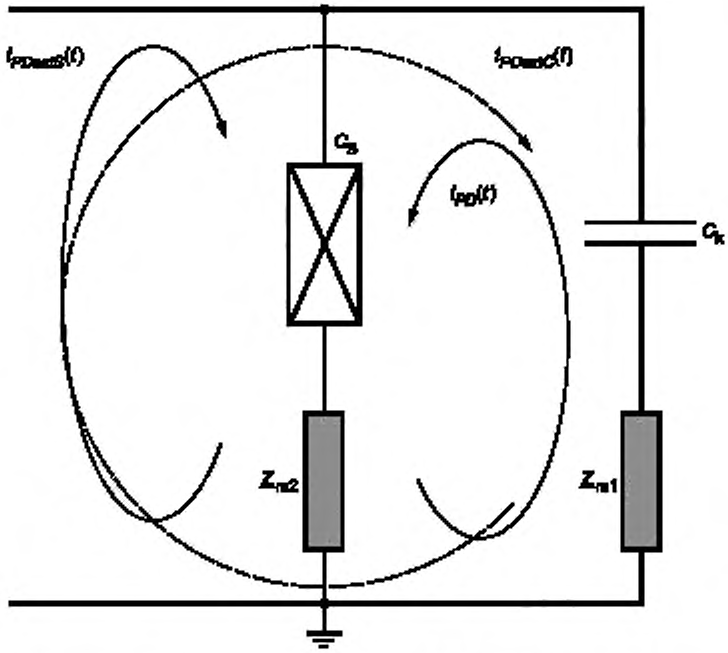
D.5 Двухканальный дифференциальный метод

Если внешние сигналы и сигнал ЧР в изоляции проходят через испытуемый объект и соединительное устройство, они могут быть измерены в двух местах.

Очевидно, падение напряжения на обоих измерительных сопротивлениях имеют одну и ту же полярность от внешних источников и противоположную — от ЧР в испытуемом объекте, как показано на рисунке D.3.

Возможны два варианта присоединения измерительного устройства к низковольтным соединительным устройствам.

Первый предполагает измерительное устройство с двумя входами, каждый для своего соединительного устройства, измеряющего соответствующее падение напряжения. С учетом полярности, внешние сигналы могут со временем исчезать.



C_S — емкость объекта испытания; C_k — соединительный конденсатор; Z_{m1}, Z_{m2} — измерительные сопротивления соединительных звеньев, $i_{PD}(t)$ — ЧР ток, вызванный ЧР в испытуемом объекте; $i_{PDextC}(t)$ — ЧР путь тока в соединительном устройстве от внешних источников ЧР; $i_{PDextS}(t)$ — ЧР ток через испытуемый объект от внешних источников ЧР

Рисунок D.3 — Импульсные токи по измерительным цепям

Второй способ состоит в присоединении измерительного устройства к верхним выводам соединительных сопротивлений. Если принять одинаковыми измерительные сопротивления и отсутствие фазового сдвига токов через две цепи, измеренная разность напряжений для измеренных внешних сигналов и помех равна нулю, а для ЧР для испытуемого объекта равна двойной.

D.6 Подавление незатухающих сигналов цифровыми фильтрами

Незатухающие сигналы шума в данном контексте представляют собой узкополосные сигналы синусоидальной формы, например несущие частоты радиостанций. Мощным методом подавления таких сигналов является установка цифровых фильтров высокого порядка, настроенных на те полосы частот, в которых замечены сигналы помех. Такие фильтры применяются с цифровыми измерительными устройствами в виде встроенных в них алгоритмов. По сравнению с узкополосными измерительными системами, описанными в Приложении D.1, преимущество систем с цифровыми фильтрами состоит в большей мощности измеряемого в обмотке ЧР сигнала, а следовательно в более высоком соотношении сигнал—шум. Кроме того, сохраняется информация о полярности импульсов.

Чтобы нивелировать нежелательные сигналы, необходимо знать их частоту. Поэтому данный метод требует частотного анализа сигналов. Определение коэффициентов фильтра основано на анализе области шума в частотном диапазоне, позволяющем зафиксировать и оценить количественно эти частоты и в последующем снизить шум. Таким образом, оптимальные параметры фильтра зависят от оборудования, с которым проводятся испытания на ЧР.

Измеренные в испытаниях сигналы ЧР впоследствии обрабатываются с учетом соответствующих характеристик фильтра.

D.7 Подавление шума методами обработки сигналов

Импульсный шум на производстве может быть обусловлен рядом факторов, например коронным разрядом (ЧР вне испытуемого объекта) или импульсами от электронных устройств, таких как возбудители.

Уменьшение импульсного шума может быть достигнуто на основе анализа формы импульсов. В действительности форма импульсов ЧР и помех различна, соответственно отличается и частотный спектр в зависимости от природы источника импульсов и передаточной характеристики звена передачи сигнала от источника к чувствительному элементу. Например, импульсы от возбудителя содержат более низкие частоты, чем импульсы ЧР изоляционной системы.

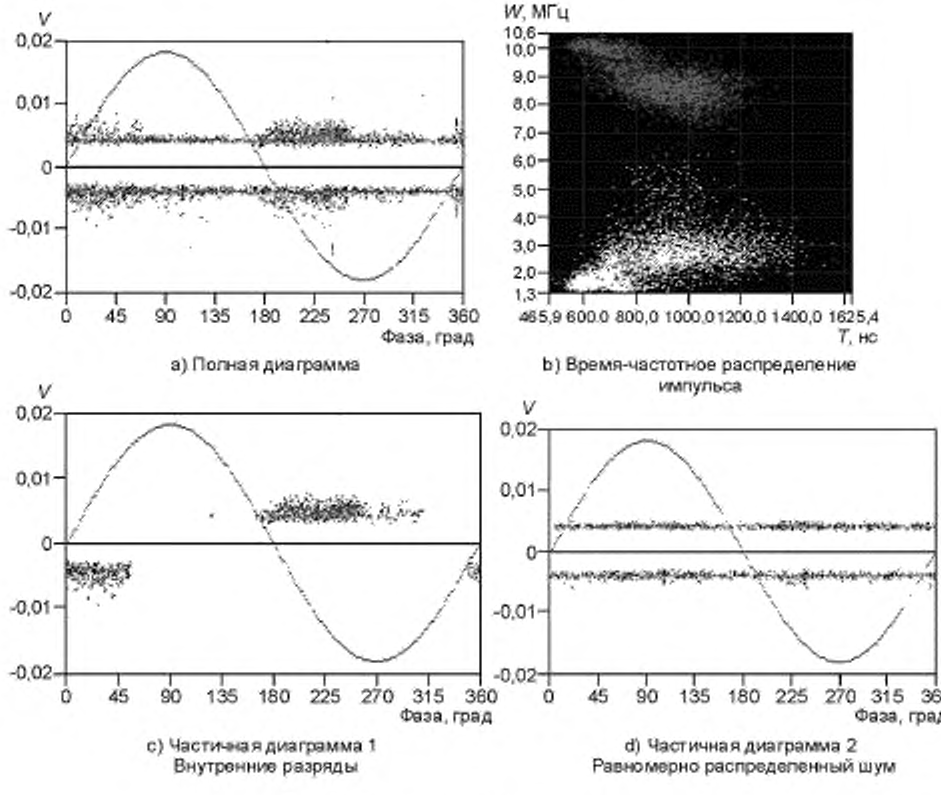
Такой подход требует оборудования, способного зафиксировать форму любого одиночного ЧР (обеспечение подходящей полосы пропускания, быстродействие и память, способность фиксировать импульсы в условиях переключений с малым временем задержки), а также адекватного программного обеспечения. Для уменьшения влияния постоянного дополнительного шума амплитудно-частотная характеристика детектора должна соответствовать подходящим фильтрам.

Классифицируя каждый измеренный импульс в соответствии с некоторыми его характерными параметрами, например шириной, формой, характеристиками затухания и т. п., возможно отделить ЧР импульсы в испытуемом объекте от посторонних и отнести каждый импульс к определенно расположенному источнику ЧР. Такая классификация может в дальнейшем обеспечить эффективный анализ каждого источника ЧР, например для выявления тенденций его развития.

В общем случае процедура отделения ЧР импульсов от шума может состоять в следующем:

- запись достаточно большого числа импульсов;
- выявление для каждого записанного импульса характерных черт, позволяющих заметить разницу между ЧР и внешними импульсами;
- разделение подобных импульсов по группам;
- получение для каждой группы фазовой ЧР диаграммы;
- отбрасывание импульсов, которые позволяют однозначно ассоциировать фазовые диаграммы ЧР с шумом; данная процедура может проводиться автоматически или усилиями опытного специалиста.

На рисунках D.4 и D.5 представлено два примера классификации импульсов в соответствии с их эквивалентным временем *T* и шириной полосы *W*. Определение данных параметров содержится в стандартной литературе по телекоммуникации.



a) Полная диаграмма

b) Время-частотное распределение импульса

c) Частичная диаграмма 1
Внутренние разряды

d) Частичная диаграмма 2
Равномерно распределенный шум

Рисунок D.4 — Пример шумоподавления

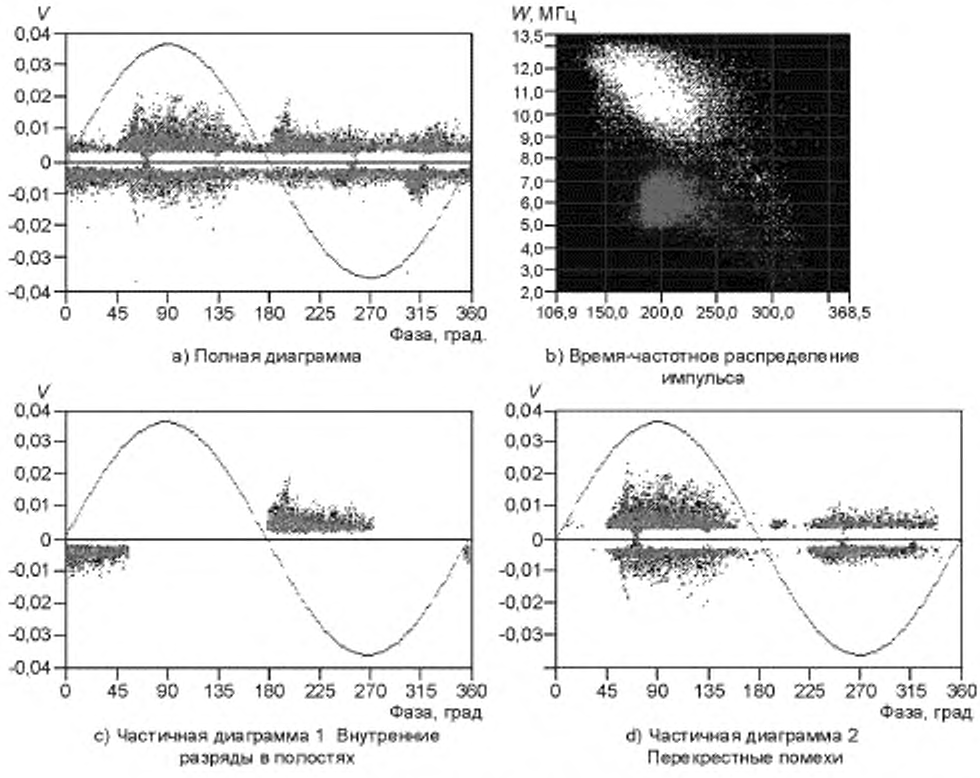


Рисунок D.5 — Пример выделения перекрестных помех

Приложение Е
(справочное)

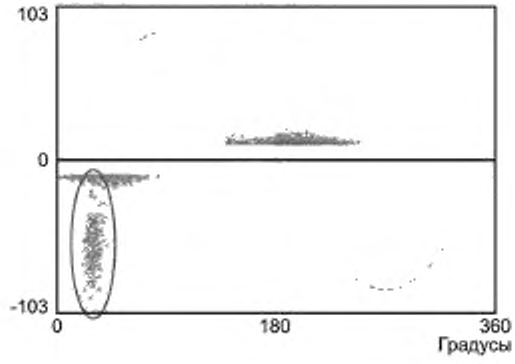
Интерпретация данных по амплитуде ЧР и фазовым диаграммам ЧР

Е.1 Руководство по интерпретации ЧР диаграмм

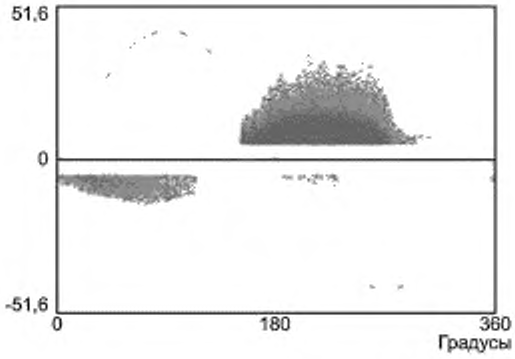
Е.1.1 Примеры ЧР диаграмм

В правильно организованных лабораторных условиях [5] были проведены измерения, позволившие хорошо зафиксировать процесс ЧР. Фазовые $\varphi - q - n$ диаграммы представляют картину измеренных ЧР с помощью соответствующих средств. Возможно сопоставление диаграмм, оценка отличий в их форме, частоты ЧР и других характеристик. Показанные ниже диаграммы могут представлять процессы при различных источниках ЧР.

Приведенные на рисунке Е.1 диаграммы ЧР были получены при помощи низковольтного соединительного устройства, включенного по схеме на рисунке 5а.

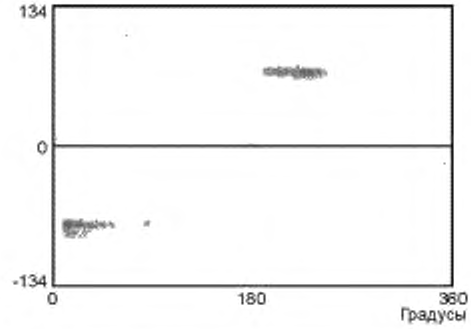


Разряды в лобовых частях обмоток
Поверхностные разряды в лобовых частях в результате загрязнения поверхности изоляция–воздух

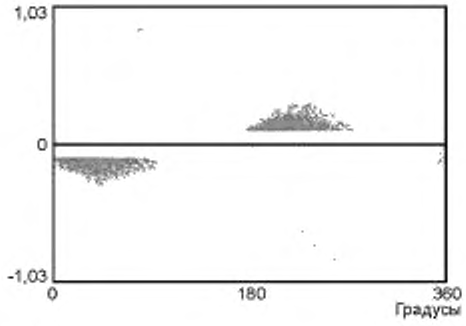


Разряды в лобовых частях обмоток
Разряды в соединениях проводящего пазового покрытия и критическое состояние покрытия из-за нарушения его поверхностных свойств

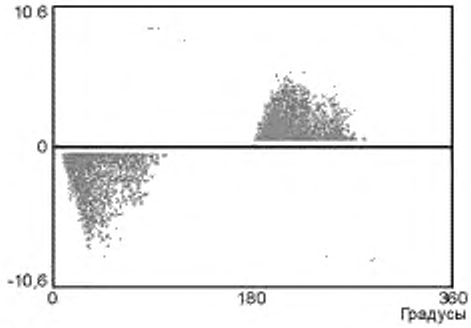
Рисунок Е.1 — Примеры диаграмм ЧР



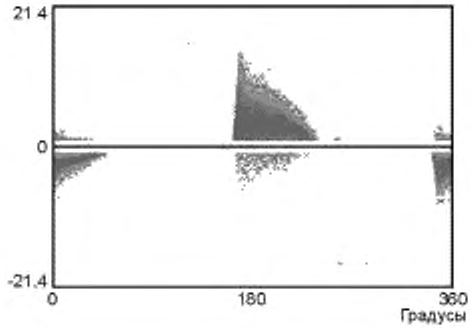
Разряды в лобовых частях обмоток
Разряды в зазорах между проводниками лобовых частей или между стержнями и арматурой сердечника



Разряды во внутренних полостях
Разряды во внутренних полостях основной изоляции



Разряды в расслоениях
Разряды из-за расслоений между основной изоляцией и медным проводником



Пазовые разряды
Пазовые разряды в воздушном зазоре между шихтованным сердечником статора и его стержнем

Рисунок Е.1, лист 2

Е.1.2 Оценка основных опасностей

Таблица Е.1 относится к разделу 4 (природа частичных разрядов во вращающихся электрических машинах) и содержит базовые соображения, относящиеся к опасностям, связанным с основными источниками ЧР.

Таблица Е.1 — Степень опасности, связанная с источником ЧР во вращающихся машинах

Источник ЧР	Степень опасности	Примечания
Внутренние полости 4.2.2.1	Низкая	Внутренние разряды возникают внутри образовавшихся в основной изоляции полостей, наполненных воздухом или газом. Полости образуются при производстве и не являются признаком старения. В нормальных условиях внутренние разряды не приводят к ускоренному старению.
Внутреннее расслоение 4.2.2.2	Высокая	Данные разряды возникают внутри образовавшихся в основной изоляции удлиненных в продольном направлении полостей, наполненных воздухом или газом. Полости часто возникают в результате перегрева или чрезмерных механических усилий, что приводит к расслоению изоляции на большой площади.
Расслоение между проводником и изоляцией 4.2.2.3	Высокая	Данные разряды возникают внутри наполненных воздухом или газом удлиненных в продольном направлении полостей, образовавшихся между основной изоляцией и выравнивающим поле проводящим материалом. Полости часто возникают в результате перегрева или чрезмерных механических усилий, что приводит к расслоению изоляции на большой площади.
Пазовые разряды 4.2.3	Высокая	Пазовые разряды образуются из-за отсутствия или плохого контакта между выравнивающим слоем и стенкой паза статора. Обычно такие разряды возникают при работе машины. Искрение, регистрируемое как пазовый разряд, образуется под влиянием электромеханических усилий и вибрации. При измерениях на отключенной от сети машине такие разряды могут быть замечены только при сильном разрушении выравнивающего слоя и описаны как источник ЧР в соответствии с разделом 4.2.3.
Разряды в лобовых частях и поверхностные разряды 4.2.4	Средняя	Разряды в лобовых частях и поверхностные возникают где-либо на поверхности изоляции и поэтому обычно расположены в лобовых частях. Как правило, они образуются из-за проводящих загрязнений (сажа, масляная пыль, абразив и т.п.) или поврежденных выравнивающих покрытий. Поскольку такие разряды появляются только на поверхности изоляции, они не приводят к ее заметному старению. Однако при наличии иных факторов, как например высокая концентрация озона или загрязнения, старение может ускориться.
Проводящие частицы 4.2.5	Средняя	Разряды от проводящих частиц возникают где-либо на поверхности изоляции и поэтому обычно расположены в лобовых частях. Как правило, они образуются на проводящих загрязнениях большой площади (сажа, масляная пыль, абразив и т. п.) или отдельных частях выравнивающего покрытия. Поскольку такие разряды появляются только на поверхности изоляции, они не приводят к ее заметному старению. Однако при наличии иных факторов, как например высокая концентрация озона или загрязнения, старение может ускориться.

Данная оценка опасностей основана на опыте работы с современными высоковольтными изоляционными системами на основе пропитанной смолой слюдяной пленки. Эта оценка может зависеть от материала изоляции, расположения источников ЧР разряда, состояния поверхности и ряда других факторов.

Е.1.3 Оценка амплитуды

Оценка амплитуды возможна без знания действительного расположения ЧР. Например, поверхностные ЧР могут в десятки и сотни раз превышать внутренние ЧР и разряды от расслоения при отсутствии заметных явлений старения, ведущих к разрушению изоляции, тогда как, к примеру, процессы расслоения, независимо от амплитуды ЧР свидетельствуют о быстром старении, что требует срочного ремонта.

Приложение ДА
(справочное)

Сведения о соответствии ссылочных международных стандартов межгосударственным стандартам

Таблица ДА.1

Обозначение ссылочного международного стандарта	Степень соответствия	Обозначение и наименование соответствующего межгосударственного стандарта
IEC 60060-1	—	
IEC 60060-2	—	*1)
IEC 60270:2000	—	*2)
* Соответствующий межгосударственный стандарт отсутствует. До его принятия рекомендуется использовать перевод на русский язык данного международного стандарта. Перевод данного международного стандарта находится в Федеральном информационном фонде технических регламентов и стандартов Российской Федерации.		

1) На территории Российской Федерации действует ГОСТ Р 55193—2012 (МЭК 60060-2—2010).
2) На территории Российской Федерации действует ГОСТ Р 55191—2012 (МЭК 60270:2000).

Библиография

[1] Rust, St. Seinsch, H.O. Monitoring of winding faults in the rotor of slip-ring induction motors, Elektrie, 50, 1996, 347—355

[2] Chen, S. Lipo, T. A. Circulating type motor bearing currents in inverter drives IEEE IAS Conf., 1996, 162—167

[3] Chen, S. Lipo, T. A. Fritzgerald, D. Source of induction motor bearing currents caused by PWM inverters, IEEE Trans. Energy Conv., vol. 11, 1996, 25—32

[4] Erdmann, J. M. Kerkman, R. J. Schlegel, D. W. Skibinski, G. Effect of PWM Inverters on AC motor bearing currents and shaft voltages, IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 32, 1996, 243—252

[5] Bradley, K.J. Tami, A. Reluctance mesh modelling of induction motors with healthy and faulty rotors, Proc. 31st IAS Ann. Meeting, 1996, 625—632

УДК 621.313.04:006.354 МКС 29.160 IDT

Ключевые слова: машины электрические вращающиеся; офлайн измерения; частичные разряды; изоляция обмотки статора

Редактор *Н.В. Верховина*
Технический редактор *В.Н. Прусакова*
Корректор *В.Е. Нестерова*
Компьютерная верстка *Л.А. Круговой*

Сдано в печать 01.06.2016. Подписано в печать 27.06.2016. Формат 60 ×84 $^{1}/_{8}$. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 5,12. Уч.-изд. л. 4,35. Тираж 27 экз. Зак. 1578
Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта.

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

gost.e-ecolog.ru