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

МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ

ГОСТ ISO 20958— 2015

Контроль состояния и диагностика машин

СИГНАТУРНЫЙ АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

(ISO 20958:2013, IDT)

Издание официальное

Москва
Стандартинформ
2019

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

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

Сведения о стандарте

1 ПОДГОТОВЛЕН Открытым акционерным обществом «Научно-исследовательский центр контроля и диагностики технических систем» (АО «НИЦ КД») на основе собственного перевода на русский язык англоязычной версии стандарта, указанного в пункте 5

2 ВНЕСЕН Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии

3 ПРИНЯТ Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 12 ноября 2015 г. № 82-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
Беларусь	BY	Госстандарт Республики Беларусь
Киргизия	KG	Кыргызстандарт
Россия	RU	Росстандарт
Таджикистан	TJ	Таджикстандарт

4 Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 17 марта 2016 г. № 155-ст межгосударственный стандарт ГОСТ ISO 20958—2015 введен в действие в качестве национального стандарта Российской Федерации с 1 ноября 2016 г.

5 Настоящий стандарт идентичен международному стандарту ISO 20958:2013 «Контроль состояния и диагностика машин. Сигнатурный анализ электрических сигналов трехфазного асинхронного двигателя» («Condition monitoring and diagnostics of machine systems — Electrical signature analysis of three-phase induction motors», IDT).

Международный стандарт разработан подкомитетом ISO/TC 108/SC 5 «Контроль состояния и диагностика машин» технического комитета по стандартизации ISO/TC 108 «Вибрация, удар и контроль состояния» Международной организации по стандартизации (ISO).

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

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

7 ПЕРЕИЗДАНИЕ. Март 2019 г.

*Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодноv информационном указателе «Национальные стандарты», а текст изменений и поправок — в ежемесячном информационном указателе «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ежемесячном информационном указателе «Национальные стандарты». Соответствующая информация, уведомление и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет (*gost.e-ecolog.ru

© ISO, 2013 — Все права сохраняются
© Стандартинформ, оформление, 2016, 2019

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 Методы анализа 2
Приложение А (справочное) Анализ с применением вектора Парка 19
Приложение ДА (справочное) Сведения о соответствии ссылочных международных стандартов межгосударственным стандартам 21
Библиография 22

Введение

В настоящем стандарте рассматриваются как известные, положительно зарекомендовавшие себя на практике методы сигнатурного анализа электрических сигналов трехфазных асинхронных двигателей, так и сравнительно новые процедуры, широкое применение которых ожидается в ближайшем будущем.

МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ

Контроль состояния и диагностика машин

СИГНАТУРНЫЙ АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Condition monitoring and diagnostics of machine systems. Electrical signature analysis of three-phase induction motors

Дата введения — 2016—11—01

1 Область применения

Настоящий стандарт распространяется на трехфазные асинхронные двигатели и устанавливает руководство по методам контроля их технического состояния и диагностирования на основе сигнатурного анализа электрических сигналов в реальном масштабе времени.

2 Нормативные ссылки

Для применения настоящего стандарта необходим следующий ссылочный документ. Для датированных ссылок применяют только указанное издание ссылочного документа. Для недатированных ссылок применяют последнее издание ссылочного документа (включая все его изменения).

ISO 13372, Condition monitoring and diagnostics of machines — Vocabulary (Контроль состояния и диагностика машин. Словарь)

3 Термины и определения

В настоящем стандарте применены термины по ISO 13372, а также следующие термины с соответствующими определениями.

3.1 **анализ тока** (current analysis): Анализ протекающих по фазным проводам токов с целью определения их амплитуд, несимметрии, наличия гармоник.

3.2 **сигнатурный анализ тока** (current signature analysis): Спектральный анализ линейного тока с целью выявления характерных частотных составляющих, свидетельствующих о возможных неисправностях двигателя.

Примечание — Как правило, сигнатурный анализ проводят для тока в одном проводнике, однако новые методы, например с использованием вектора Парка, позволяют получать дополнительную информацию за счет совместного анализа токов всех трех фаз двигателя.

3.3 **асинхронный двигатель** (induction motor): Электрическая машина переменного тока, включающая в себя магнитопровод, взаимосвязанный с двумя электрическими сетями, или несколько электрических сетей, вращающихся друг относительно друга, в которой передача энергии между сетями осуществляется за счет электромагнитной индукции.

Примечание — Асинхронные двигатели могут быть двух основных типов: с короткозамкнутым или фазным ротором.

3.4 **(асинхронный) двигатель с короткозамкнутым ротором** (squirrel-cage induction motor): Асинхронный двигатель, у которого вторичная обмотка ротора (так называемая «беличья клетка») со-

Издание официальное

стоит из неизолированных стержней, вставленных в пазы сердечника ротора и замкнутых с обоих концов двумя торцевыми кольцами.

Примечание — Как правило, стержни и кольца изготавливают из меди, алюминия или их сплавов.

3.5 **(асинхронный) двигатель с фазным ротором** (wound-rotor motor): Асинхронный двигатель, имеющий многофазную обмотку из многовитковых катушек, каждая из которых соединена с контактным кольцом, вращающимся вместе с валом двигателя.

Примечание 1 — Управление током статора и ротора во время пуска, вращающим моментом и скоростью вращения ротора во время работы двигателя осуществляется за счет соединения через щетки и контактные кольца каждой фазной обмотки с внешними добавочными сопротивлениями (ступенчатым реостатом) или при помощи полупроводниковых преобразователей.

Примечание 2 — Машину данного типа называют также асинхронным двигателем с контактными кольцами.

4 Методы анализа

4.1 Общие положения

Подавляющее большинство используемых в промышленности электродвигателей относятся к машинам асинхронного типа.

Анализ надежности элементов асинхронного двигателя позволил установить, что в наибольшей степени повреждениям подвержены такие его части, как подшипниковая опора, обмотка и сердечник статора, а также короткозамкнутая обмотка ротора.

В настоящее время имеется большое число публикаций, посвященных методам контроля технического состояния и диагностирования, которые могут быть отнесены к сигнатурному анализу электрических сигналов. Под электрическим сигналом понимают электрическое напряжение на клеммах электродвигателя или ток в его проводах. Некоторые из этих методов рассматриваются в 4.2—4.8.

Целью контроля технического состояния трехфазного асинхронного двигателя является оценка его целости и раннее предупреждение о возможных неисправностях. С точки зрения сигнатурного анализа изменения тока, напряжения и мощности электрического сигнала могут быть связаны с изменениями не в самом двигателе, а в его приводе, поэтому методы настоящего стандарта распространяются также на оценку технического состояния приводного оборудования.

Если питание электродвигателя осуществляется через преобразователь напряжения и частоты, то следует обратить внимание на то, чтобы изменения тока и напряжения на выходе преобразователя не были ложно истолкованы как результат неисправности двигателя. Для таких методов, как анализ тока статора (см. 4.2) или анализа параметров частичного разряда в обмотке статора электродвигателя (см. 4.5), желательно, чтобы во время проведения анализа частота и напряжение на выходе преобразователя оставались неизменными.

4.2 Анализ тока статора

4.2.1 Общие положения

Поскольку ток статора зависит, кроме всего прочего, от магнитных потоков в воздушном зазоре ротора и от тока ротора, анализ тока статора способен выявить неисправности не только в самом статоре, но и неисправности, связанные с ротором электродвигателя, а также с его приводом.

4.2.2 Анализ спектра

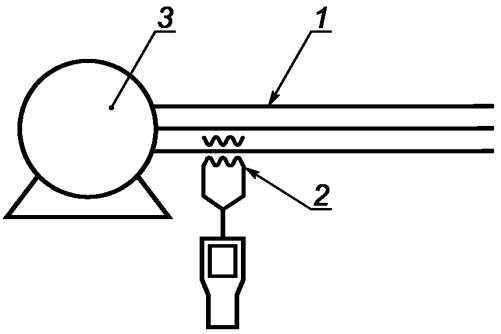
Сигнатурный анализ тока позволяет обнаруживать следующие неисправности двигателей:

- трещины стержней ротора;
- дефекты литья ротора;
- обрывы стержней короткозамкнутого ротора;
- трещины в кольцах ротора;
- повышенный эксцентриситет воздушного зазора;
- повреждения подшипников;
- межвитковые замыкания в обмотке статора;
- неисправности привода.

Из данного перечня наиболее существенными неисправностями являются те, что связаны с подшипниками электродвигателя, клеткой ротора, а также изменением зазора между ротором и статором.

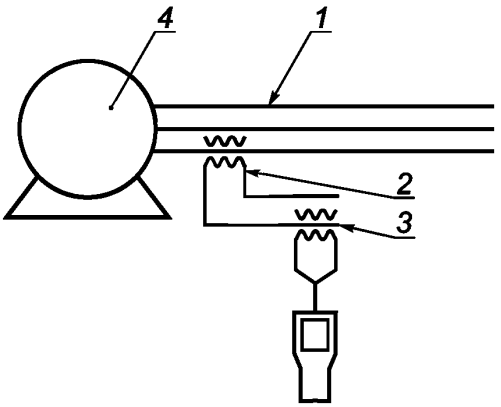
Для выявления дефектов элементов качения подшипников может быть эффективно использован также анализ вибрации двигателя.

Сигнатурный анализ тока выполняют в реальном масштабе времени при полной нормальной нагрузке. Частотный состав тока в фазном проводе определяют с использованием токоизмерительных клещей, охватывающих кабель питания электродвигателя (см. рисунок 1) или вторичную обмотку трансформатора тока (см. рисунок 2). В новых методах анализа исследуются одновременно все три фазы тока с установлением соотношения между током и напряжением.



1 — фазный провод; *2* — токоизмерительные клещи; *3* — двигатель с короткозамкнутым ротором

Рисунок 1 — Измерения тока в фазном проводе



1 — фазный провод; *2* — токовый зонд; *3* — токоизмерительные клещи; *4* — двигатель с короткозамкнутым ротором

Рисунок 2 — Измерения тока во вторичной обмотке трансформатора тока

Если механическая нагрузка двигателя изменяется со временем, то при спектральном анализе тока статора следует учитывать то, что появление одних и тех же частотных составляющих может быть вызвано разными причинами. Для точного определения причин появления данного диагностического признака может потребоваться привлечение дополнительной информации.

4.2.3 Дефекты клетки ротора

Сигнатурный анализ тока существенно продвинул вперед технологию обнаружения обрывов стержней и выявления трещин в контактных кольцах короткозамкнутого ротора. Появление характерных частотных составляющих в сигнале тока нормально работающего двигателя свидетельствует о наличии повреждения обмотки ротора. Обрыв стержней, обнаруженный посредством сигнатурного анализа, может быть в некоторых случаях подтвержден анализом вибрации подшипниковой опоры. Первые работы по сигнатурному анализу тока асинхронного двигателя появились в конце 70-х годов прошлого века ([19], [27]).

Суть метода состоит в том, что ток, протекающий в обмотке статора, зависит не только от подаваемой мощности и электрического импеданса обмотки, но также включает в себя дополнительную составляющую, наведенную магнитным полем от вращающегося ротора. Таким образом, в данном случае обмотка статора выступает как элемент, чувствительный к дефектам ротора, и задача состоит в том,

чтобы отделить ток статора, необходимый для вращения ротора, от дополнительного тока, наведенного самим ротором в случае его неисправности. Данное разделение выполняют в частотной области с применением спектрального анализатора с высоким разрешением по частоте, поскольку характерные частоты f неисправностей ротора формируют боковые полосы основной частоты питания вида

$$f = (1 \pm 2ks) f_1, \quad (1)$$

где s — скольжение асинхронного двигателя;

f_1 — основная частота питания;

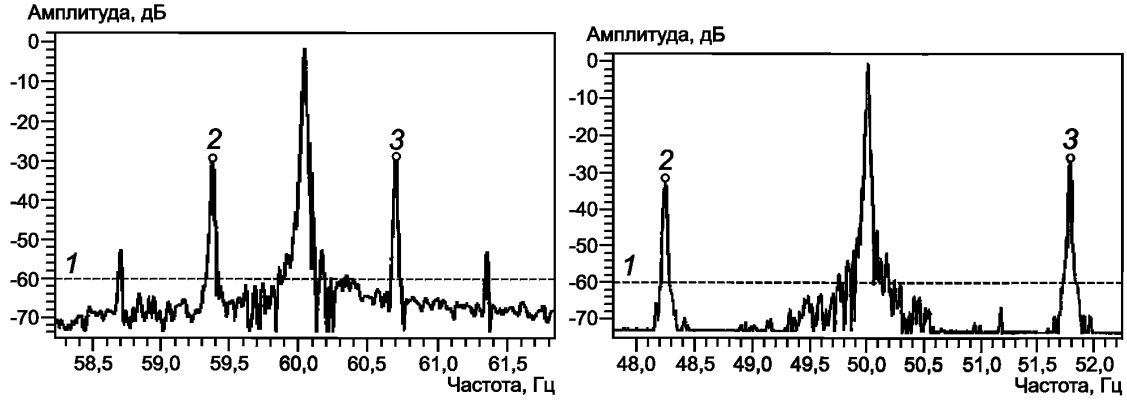
k — номер частотной составляющей в боковой полосе, k = 1, 2, 3, ...

Токи в обмотке ротора создают эффективное трехфазное магнитное поле с тем же числом полюсов, что и у магнитного поля статора, вращающееся с частотой скольжения по отношению к вращающемуся ротору. При асимметрии токов ротора возникает результирующее вращающееся поле, отстающее на частоту вращения от частоты вращения ротора. Причиной такой асимметрии могут быть обрывы одного или нескольких стержней ротора или разрывы в короткозамыкающем кольце, препятствующие протеканию по нему тока. Можно показать, что «отстающее» магнитное поле вращается в том же направлении, что и ротор, с частотой, равной частоте тока питания обмоток статора, умноженной на коэффициент $(1 - 2s)$. Это приводит к появлению в обмотке статора составляющей тока с частотой $(1 - 2s)f_1$, которую называют нижней боковой частотой, вызванной обрывом стержня ротора. В свою очередь, данная составляющая вызывает модуляцию тока статора, что приводит к колебаниям вращающего момента ротора на удвоенной частоте скольжения $2sf_1$ и соответствующим колебаниям скорости вращения ротора. Колебания скорости вращения ротора приводят к появлению составляющей на верхней боковой частоте $(1 + 2s)f_1$ в токе статора (см. [21]). Таким образом, обрыв стержня ротора приводит к появлению боковых частот f_{sb} в токе статора, вычисляемых по формуле

$$f_{sb} = (1 \pm 2s) f_1. \quad (2)$$

На изображенном в логарифмическом масштабе графике зависимости амплитуды тока статора от частоты (см. рисунок 3) составляющие, связанные с обрывом стержней ротора, отстоят от частоты питания (50 или 60 Гц) на частоту $2sf_1$. Важно отметить, что самые боковые составляющие будут наблюдаться в токе статора в том случае, если число ребер опорной крестовины ротора совпадает с числом полюсов обмотки статора (см. [16]).

Кроме того, появление симметричных составляющих на боковых частотах, похожих на описываемые формулой (2), может быть связано с дефектами коробки передач в цепи привода электродвигателя. Поэтому важно различать боковые полосы вокруг частоты питания, обусловленные обрывами в клетке ротора, от вызываемых дефектами приводного оборудования (например, промежуточными валами коробки передач). Лучшим способом для разделения указанных неисправностей является выполнение измерений при двух существенно различающихся нагрузках и наблюдении, имеются ли боковые частоты, изменяющие свое положение пропорционально изменению скольжения ротора.



1 — уровень шумового пьедестала (-60 дБ);
2 — левая боковая частота (59,36 Гц; -29,33 дБ);
3 — правая боковая частота (60,68 Гц; -28,71 дБ)
a) Конденсатный насос (частота питания 60 Гц)

1 — уровень шумового пьедестала (-60 дБ);
2 — левая боковая частота (48,24 Гц; -33,19 дБ);
3 — правая боковая частота (51,79 Гц;-26,15 дБ)
b) Электромясорубка (частота питания 50 Гц)

Рисунок 3 — Примеры спектров сигналов тока электродвигателей в случае обрывов стержней клетки ротора

Анализ сигнала тока осуществляют с помощью анализатора спектра или другого устройства цифровой обработки данных (см. рисунок 3). Боковые частоты отстоят на незначительное расстояние (приблизительно от 0,3 до 3 Гц) от частоты питания, а амплитуда этих составляющих, как правило, в 100—1000 раз меньше амплитуды тока на частоте питания. Скольжение s зависит как от числа полюсов и пазов ротора, так и от материала его обмотки. Частота модуляции тока статора зависит не только от значения скольжения при номинальной нагрузке, но также от отношения I/I_n, где I — ток, протекающий в обмотке статора, а I_n — ток двигателя при полной нагрузке. С учетом этих обстоятельств к средствам анализа тока, используемым для обнаружения возможного обрыва стержней ротора, предъявляются повышенные требования с точки зрения как динамического диапазона измерений, так и разрешения по частоте. Большим динамическим диапазоном анализа объясняется также использование логарифмической шкалы амплитуд. При отсутствии обрыва стержней ротора составляющие на боковых частотах отсутствуют или их уровень очень низок.

При диагностировании обрыва стержней ротора важно точно знать частоту скольжения. Ранее в этих целях использовался стробоскоп, позволявший определять скорость ротора, а значит, и частоту скольжения. Альтернативным средством измерения скольжения мог быть датчик плотности осевого магнитного потока, устанавливаемый вблизи обмотки ротора (см. [19]). В настоящее время устройства сигнатурного анализа тока могут определять скольжение ротора исходя из анализа самого тока (см. [16]), что значительно упрощает реализацию метода. Точность анализа может ухудшиться в тех случаях, когда контролю подлежат двигатели малых размеров, двигатели с большим числом полюсов, а также двигатели с пульсирующими нагрузками.

В целях контроля используют, в первую очередь, составляющую на левой боковой частоте. Опыт показывает, что если уровень этой частотной составляющей отличается от уровня составляющей на частоте питания не более чем на 50 дБ, то вероятность обрыва стержней ротора велика. Чем выше составляющая боковой частоты, тем серьезнее повреждение клетки ротора. Как и во многих других методах контроля состояния, целесообразно наблюдать тренд изменения уровня боковой частоты в течение ряда лет. Если в процессе наблюдений при действии приблизительно тех же нагрузок отмечается повышение уровня составляющей на боковой частоте, то следует предположить увеличение числа оборванных стержней и точек разрыва. Приведенные на рисунке 3 примеры соответствуют электродвигателям с несколькими оборванными стержнями. В определенный момент времени рост повреждений данного вида приведет к невозможности запуска ротора или к отрыву частей ротора, что способно привести к повреждению обмотки статора. Метод сигнатурного анализа тока может не позволить обнаружить обрывы стержней крупных двух- или четырехполюсных двигателей, если эти обрывы случились под бандажным кольцом, поскольку бандажное кольцо обеспечивает сохранение условий протекания тока в обмотке ротора.

В прежние годы применение метода сигнатурного анализа тока сопровождалось достаточно частыми появлениями ошибок ложной тревоги (т. е. указаний на наличие неисправностей ротора, которых в действительности не было) и, в меньшей степени, ошибками пропуска неисправного состояния. Однако с развитием теории, программного обеспечения и средств измерений достоверность результатов, обеспечиваемых методом, значительно повысилась (см. [16]).

4.2.4 Эксцентриситет воздушного зазора

Эксцентриситет воздушного зазора также может быть обнаружен по характерным частотным составляющим в спектре тока. Частоты f_{ec} этих составляющих могут быть рассчитаны по формуле (см. [25])

$$f_{ec} = f_1\left(R_s \frac{1-s}{p} \pm \eta_{ws}\right) \pm f_1\left(\frac{1-s}{p}\right), \quad (3)$$

где f_1 — частота питания;

R_s — число пазов (стержней) ротора;

η_{ws} — нечетное целое число, $\eta_{ws} = 1, 3, \ldots$;

s — скольжение асинхронного двигателя;

p — число пар полюсов.

Правая часть формулы (3) состоит из двух слагаемых (см. [26]): частоты прохождения пазов ротора f_{rs}, вычисляемой по формуле

$$f_{rs} = f_1\left(R_s \frac{1-s}{p} \pm \eta_{ws}\right), \quad (4)$$

и субгармоники частоты вращения ротора f_r, вычисляемой по формуле

$$f_r = f_1\left(\frac{1-s}{p}\right). \quad (5)$$

Таким образом, диагностическими признаками для эксцентриситета воздушного зазора являются составляющие на частотах прохождения пазов ротора и составляющие на их боковых частотах, отстоящих на величину f_r.

Опыт показывает, что проще всего обнаружить неисправность в виде эксцентриситета воздушного зазора для трехфазного асинхронного двигателя с ротором с нескошенными пазами. Это связано с тем, что скошенные пазы ротора уменьшают составляющие магнитного потока на частотах прохождения пазов ротора и, соответственно, действующие в двигателе электромагнитные силы, что приводит к уменьшению вибрации сердечника статора и акустического шума. Обнаружить и измерить составляющие на частотах прохождения пазов ротора и их боковых составляющих можно с помощью средств измерений, реализующих преобразование Фурье с достаточным разрешением по частоте.

Оценку эксцентриситета воздушного зазора в двигателе осуществляют следующим образом. Определяют составляющую на одной из частот прохождения пазов ротора, амплитуда которой максимальна. Вычисляют разность между амплитудой указанной составляющей и полусуммой амплитуд составляющих на ее боковых частотах, отстоящих на величину f_r (все расчеты выполняют для логарифмических значений). Чем больше разность, тем больше эксцентриситет воздушного зазора между ротором и статором (см. пример на рисунке 4).

4.2.5 Межвитковые замыкания в обмотке статора

Установлено (см. [2]), что межвитковые замыкания в обмотке статора низковольтного электродвигателя приводят к появлению составляющих тока f_{st} на частотах, вычисляемой по формуле

$$f_{st} = f_1\left[\frac{n}{p}(1-s)\pm k\right], \quad (6)$$

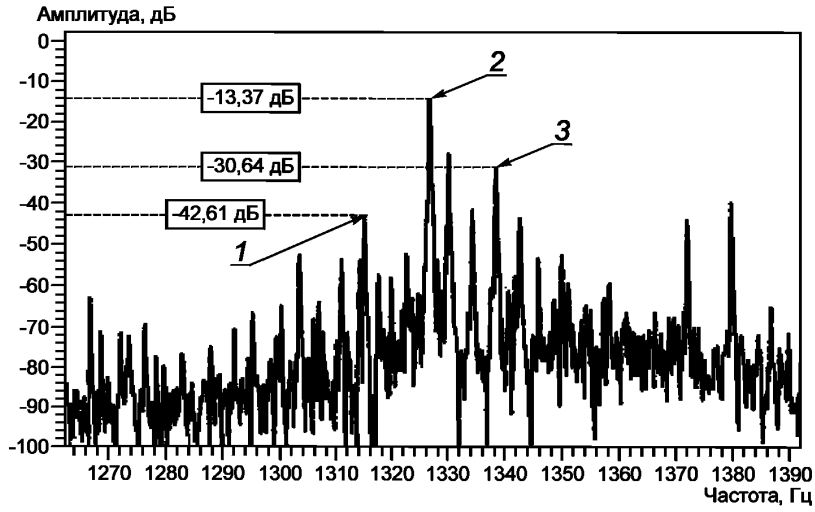
где f_1 — частота питания;

n — нечетное целое число, n = 1, 3, ...;

k — нечетное целое число, k = 1, 3, ...;

p — число пар полюсов;

s — скольжение асинхронного двигателя.



1 — левая боковая частота; *2* — частота прохождения пазов ротора; *3* — правая боковая частота

Рисунок 4 — Пример спектра сигнала тока двигателя в случае значительного эксцентриситета воздушного зазора

4.2.6 Дефекты подшипника

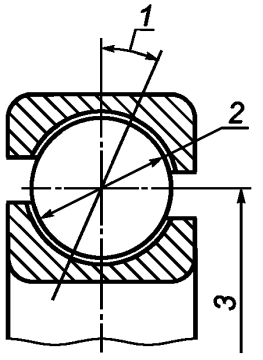
Разные дефекты подшипника качения обусловливают появление в токе статора составляющих на характерных частотах (диагностических признаков). Эти частоты зависят от размеров подшипника,

вида и места повреждения. Контроль составляющих на характерных частотах позволяет выявить дефекты внутренней и внешней дорожек качения, а также тел качения. В таблице 1 приведены формулы для расчета характерных частот в случае шарикового подшипника с известными размерами (см. рисунок 5) и известным числом тел качения (см. [19]).

Таблица 1 — Характерные частоты, связанные с дефектами подшипника

Место повреждения	Характерная частота
Тело качения	$f_{rb} = \left(D_{pit}/D_{ball}\right) f_{rm} \left[1 - \left(D_{ball}/D_{pit} \cos\beta\right)^2\right]$
Внешняя дорожка	$f_{ro} = (n/2) f_{rm} \left[1 - \left(D_{ball}/D_{pit} \cos\beta\right)\right]$
Внутренняя дорожка	$f_{ri} = (n/2) f_{rm} \left[1 + \left(D_{ball}/D_{pit} \cos\beta\right)\right]$

В формулах таблицы 1 использованы следующие обозначения:
f_{rm} — частота вращения ротора;
n — число шариков в подшипнике;
β — угол контакта;
D_{pit} — диаметр окружности центров шариков;
D_{ball} — диаметр шарика.



1 — угол контакта; *2* — диаметр шарика D_{ball}; *3* — диаметр окружности центров шариков D_{pit}

Рисунок 5 — Размеры шарикового подшипника

Если число шариков находится в диапазоне от 6 до 19, то для расчета характерных частот для дефектов внутренней и внешней дорожек подшипника можно использовать следующие формулы соответственно:

$$f_i = 0{,}6nf_{rm}, \quad f_r = 0{,}4nf_{rm} \tag{7}$$

Формулы (7) можно использовать также для роликовых подшипников с числом роликов от 12 до 18.

Таким образом, с помощью средств измерений, позволяющих измерять и идентифицировать составляющие тока статора на характерных частотах, можно локализовать дефекты подшипников качения. Кроме того, старение подшипника и связанные с ним неисправности можно контролировать по тренду гармоник, связанных с характерными частотами.

Ряд программных средств сигнатурного анализа тока содержит характеристики разных подшипников и позволяет рассчитывать характерные частоты для них по формулам таблицы 1.

4.2.7 Другие механические дефекты

Изменения эксцентриситета воздушного зазора приводят к изменению формы магнитного потока в зазоре. Периодические изменения воздушного зазора в радиальном направлении вызывают колебания ротора и появление соответствующих составляющих в токе статора на частотах f_e, вычисляемых по формуле

$$f_e = f_1 + mf_r, \quad (8)$$

где f_1 — частота питания;

m — целое число, m = 1, 2, 3, ...;

f_r — частота вращения ротора.

По изменениям составляющих на этих частотах можно выявлять несоосности в соединениях, износ подшипника скольжения и другие механические дефекты, включая те из них, что связаны с приводным оборудованием.

4.2.8 Анализ с использованием вектора Парка

Вектор Парка представляет собой используемый для упрощения анализа математический инструмент, позволяющий описывать три фазные переменные в двух ортогональных плоскостях (см. приложение А). Его используют в промышленности для выявления таких неисправностей трехфазных асинхронных двигателей, как несимметрия напряжения питания, эксцентриситет воздушного зазора, межвитковые дефекты в обмотке статора, несоостность механических соединений, обрыв в обмотке фазного ротора и дефекты стержней и колец короткозамкнутого ротора ([11]—[14]).

Применение расширенного метода вектора Парка повышает достоверность диагностирования, выполняемого в реальном масштабе времени (см. приложение А). Его используют для двигателей с питанием непосредственно от сети или через инвертор для обнаружения как одиночных неисправностей, так и их сочетаний.

Для того чтобы разделить неисправности двигателя и неисправности приводного оборудования, создающего переменную нагрузку, применяют представление вектора Парка в синхронизированной системе координат (см. приложение А).

4.3 Анализ электрического тока, напряжения и мощности

4.3.1 Общие положения

Для получения дополнительной информации о состоянии двигателя помимо анализа тока статора полезно проводить анализ напряжения питания, а также входной мощности, которая непосредственно связана с током и напряжением питания.

Контроль токов в трех фазных проводах статора, линейных напряжений питания и входной мощности через автоматический выключатель двигателя или через щит управления двигателями во время пуска либо в стационарном режиме работы позволяют на ранней стадии выявить повреждения в обмотках статора или ротора.

4.3.2 Контроль в стационарном режиме

Контроль в стационарном режиме работы двигателя включает в себя:

- контроль несимметрии токов, обусловленной разными входными импедансами фаз или несимметрией напряжений питания. Небольшая несимметрия фазных напряжений приводит к существенно разным токам в фазных проводах статора. Несимметрия напряжений в многофазном асинхронном двигателе эквивалентна введению некоторого «напряжения обратной последовательности», создающего в воздушном зазоре вращающееся магнитное поле противоположное тому, что имеет место при симметричных фазных напряжениях, и приводящего к увеличению токов в обмотке статора. Это, в свою очередь, приводит к перегреву обмоток ротора и статора двигателя, работающего под нагрузкой. Несимметрия токов может возникнуть также вследствие несимметрии импедансов, связанной с такими дефектами, как плохой контакт проводников или повреждения изоляции витков катушки статора. Последнее повреждение, как правило, может быть обнаружено только в том случае, если место повреждения расположено далеко от ближайшей точки заземления;

- контроль несимметрии напряжений, обусловленной несимметрией нагрузок на систему питания или высокими сопротивлениями в точках контакта. Как указывалось ранее, небольшая несимметрия напряжений может вызывать большую несимметрию токов;

- контроль входной мощности двигателя. Повышение потребления мощности свидетельствует о снижении производительности приводного оборудования вследствие ухудшения состояния частей этого оборудования или самого двигателя;

- анализ гармоник напряжения. Он позволяет обнаружить наличие гармоник в напряжении питания, обусловленное другими устройствами, например частотно-регулируемого привода. Такие гармоники могут вызывать дополнительные потери мощности двигателя, что приводит к повышению рабочей температуры обмоток статора (см. [27]).

4.3.3 Контроль в режиме пуска

Контроль в режиме пуска двигателя включает в себя:

- контроль времени разгона двигателя. Его увеличение свидетельствует о возможных обрывах в клетке ротора или повышении момента вращения приводного оборудования вследствие ухудшения состояния его частей;

- контроль тока. Измерение тока в течение первых нескольких периодов и до момента достижения номинальной скорости двигателя позволяет выявить наличие переходных процессов, обусловленных сверхпереходной реактивностью высокопроизводительного двигателя или другими средствами защиты от превышения мощности.

4.3.4 Модельный анализ тока и напряжения

Данный метод анализа позволяет использовать информацию о токе и напряжении по всем трем фазам одновременно. Модельный анализ позволяет выявлять многие из тех явлений, которые обнаруживаются также обычными средствами анализа тока, вибрации и рабочих характеристик двигателя (см. [17]).

Схема системы, реализующей модельный анализ, показана на рисунке 6. Ее работа состоит в измерении тока и напряжения в процессе работы двигателя и сопоставлении с математической моделью отношения между током и напряжением. Разность между измеренным и расчетным током характеризует отклонения в работе двигателя и системы привода, которые могут быть исследованы с применением вектора Парка, Фурье-анализа и алгоритма оценки диагностических признаков для выявления разных видов неисправностей.

Систему чаще используют в целях непрерывного контроля состояния двигателя, чем для кратковременных измерений в целях диагностирования, а ее выходы интегрируют в общую систему управления оборудованием предприятия. Это позволяет осуществлять автоматическую регистрацию трендов контролируемых параметров.

Выходными устройствами системы могут быть: экраны контроля отдельных параметров; светофорные дисплеи, показывающие общее состояние оборудования вместе с результатами диагностирования, а также графики изменения контролируемых параметров со временем. Такая система предполагает возможность управления обычным оператором и обслуживания без привлечения специальных методов интерпретации данных, хотя такие данные системой предоставляются и при необходимости могут быть подвергнуты соответствующему анализу.

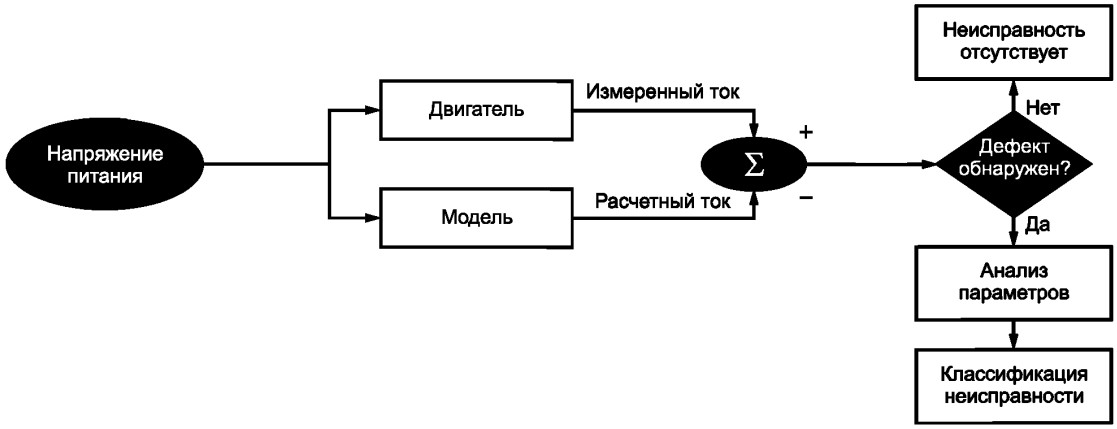


Рисунок 6 — Схема модельного анализа тока и напряжения

Виды неисправностей, обнаруживаемых системой, включают в себя механические неисправности двигателя и приводного оборудования, такие как дисбаланс, несоосность, дефекты подшипников, а также неисправности электрической природы, такие как пробой изоляции, ослабление обмотки статора, дефекты пазов ротора, несимметрию токов и напряжений, наличие гармоник. Поскольку при работе системы выполняются измерения как тока, так и напряжения, она позволяет также осуществлять контроль мощности и выявлять проблемы, связанные с нарушением условий работы двигателя и понижением его производительности.

То, что в алгоритме модельного анализа исследуется разность между измеренным и расчетным токами, означает, по сути, удаление составляющих электрического сигнала, которые соответствуют

нормальной работе двигателя и которые в первую очередь видны при обычном спектральном анализе тока. Данная процедура существенно упрощает исследование именно тех составляющих, которые являются диагностическими признаками неисправностей.

Поскольку алгоритм анализа основан на соотношении между напряжением и током, он хорошо подходит для приводных систем с входным напряжением переменной частоты, в котором могут присутствовать значительные шумовые составляющие. В ходе обработки при получении сигнала тока данные составляющие удаляются, а остаются только те, что обусловлены отклонениями в работе двигателя.

Эта простота алгоритма, а также низкая стоимость оборудования, посредством которого он может быть реализован, обусловливают его применимость при контроле некритичных и недорогих машин.

4.4 Анализ магнитного потока

Любые искажения плотности магнитного потока в воздушном зазоре вследствие дефектов в роторе или в статоре приводят к появлению однонаправленного продольного магнитного потока в вале ротора, который может быть обнаружен с помощью насаженной на вал катушки. Степень развития дефекта можно оценить по спектру осевого потока, полученного в результате Фурье-преобразования тока в катушке. Этот метод анализа применим к широкому классу двигателей, однако для двигателей некоторых конструкций с защитным кожухом последний может существенно ослабить магнитный поток в катушке за пределами кожуха. Это осложняет получение количественной оценки повреждения, если только система измерений не настроена специально на конкретный двигатель.

4.5 Анализ частичного разряда

4.5.1 Природа частичного разряда

Проводимое в процессе работы двигателя измерение частичного разряда в обмотке статора позволяет выявить зарождающиеся повреждения электрической природы. Постепенное ухудшение состояния изоляции проводов обмотки приводит к усилению частичного разряда, хотя установить количественные соотношения между величиной разряда и оставшимся сроком службы изоляции затруднительно.

Частичные разряды представляют собой искровые пробои, наблюдаемые в двигателях с частотой питания 50 или 60 Гц и номинальным напряжением питания 3,3 к Вт и выше (см. [6] и [23]). При хорошем состоянии обмотки частичные разряды отсутствуют или незначительны. Однако они появляются в случае дефектов изготовления обмотки или ухудшения ее свойств вследствие нагревов, смещения катушек или загрязнений. Анализ частичного разряда состоит в непосредственном измерении производимых им импульсов тока в обмотке и может быть реализован многими способами (см. [5], [7]). В настоящем стандарте рассматриваются методы для работающего двигателя в режиме нормальной нагрузки.

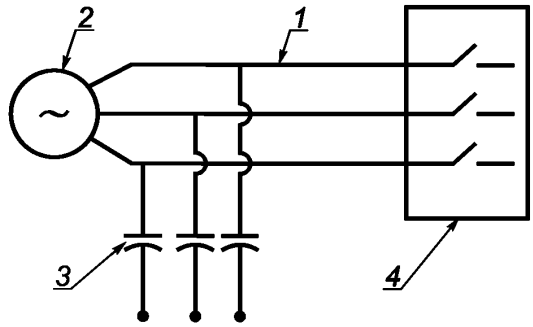
Частичный разряд возможен только при наличии заполненных воздухом полостей в межвитковой изоляции или с поверхности изоляции (см. [6]). При нормальном атмосферном давлении, когда пиковая напряженность электрического поля в полости достигает 3 кВ/мм, происходит искровой пробой в виде потока быстролетящих между границами полости электронов. Вызванный этим импульс тока имеет очень короткую длительность (порядка нескольких наносекунд) и очень широкую полосу частот (от нуля до нескольких сотен мегагерц) (см. [7]).

4.5.2 Измерения частичного разряда емкостными соединителями

Датчик, используемый для обнаружения частичного разряда, должен иметь широкую полосу частот. Для того чтобы измерить частичные разряды всех обмоток статора в целом, используют, как правило, высоковольтные конденсаторы, соединенные с клеммами статорной обмотки каждой фазы. В этих целях используют емкости от 80 пФ до 2 нФ, соединяющие через коаксиальный кабель клеммы электродвигателя с клеммной колодкой, как показано на рисунке 7. В области высоких частот импульсного разряда конденсатор обладает очень малым импедансом и очень высокой проводимостью. Выход конденсатора соединен с активной нагрузкой в виде резистора. Импульс частичного разряда, проходя через конденсатор, создает импульс напряжения на резисторе, который можно наблюдать на экране осциллографа, на экране анализатора спектра или с помощью специального устройства измерения импульсов разряда. Если датчик частичного разряда расположен достаточно близко к источнику разряда, то наблюдаемый сигнал будет содержать все частотные составляющие от нуля до нескольких сотен мегагерц. Возмущения в виде коротких импульсов могут быть связаны с разными источниками, но их вклад в сигнал на выходе датчика частичного разряда будет ниже того, что обусловлен собственно частичным разрядом в обмотке статора. Например, импульсы с полосой частот до нескольких мегагерц могут быть

вызваны пробоем в плохом электрическом соединении или аналогичными явлениями в другой аппаратуре, удаленной от исследуемого двигателя. Поэтому средство измерений частичного разряда должно предусматривать аналоговую или цифровую фильтрацию сигнала, позволяющую выделить частотные составляющие, характерные именно для частичного разряда в обмотке статора.

Измерительная цепь (датчик с последующим электронным устройством) характеризуется нижней и верхней частотами среза. Обычно средства измерений частичного разряда работают в низком диапазоне частот (менее 3 МГц), высоком диапазоне частот (от 3 до 30 МГц), очень высоком диапазоне частот (от 30 до 300 МГц) и ультравысоком диапазоне частот (от 300 МГц до 3 ГГц) (см. [1]). Если используется измерительная система в низком диапазоне частот ([18]), то необходимо предусмотреть способ ограничения влияния на сигнал в этом диапазоне составляющей на частоте питания, переключений двигателя с питанием от конвертора, возмущений в системе возбуждения. Подавление всех помех, не связанных с частичным разрядом в обмотке статора, является важной задачей, и для ее решения подходит применение емкостных соединителей и длинных (более 30 м) питающих кабелей.



1 — питающий кабель; *2* — электродвигатель; *3* — емкость для измерений частичного разряда; *4* — размыкатель цепи

Рисунок 7 — Типичная схема установки емкостных соединителей для измерений частичного разряда в статоре электродвигателя

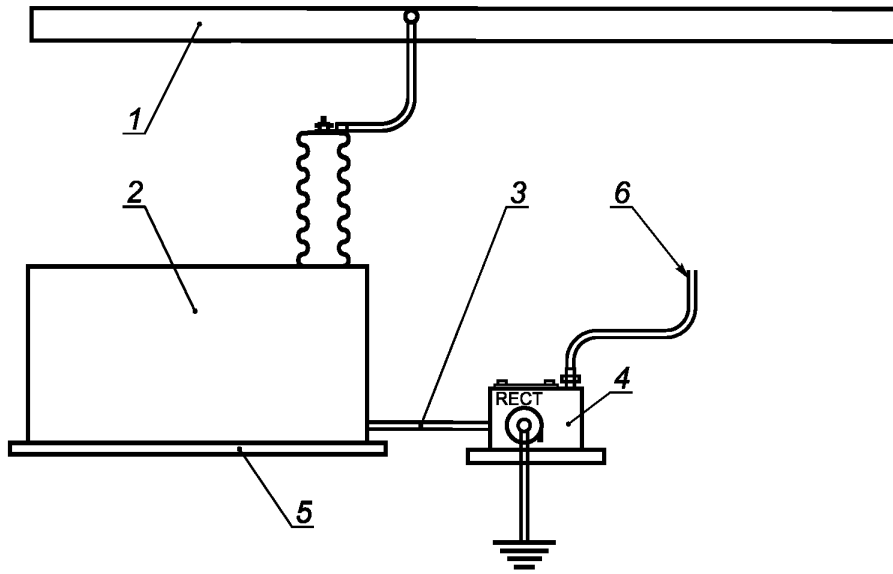
Как правило, чем выше верхняя частота среза измерительной системы, тем больше отношение «сигнал/шум» и тем меньше риск неправильного решения при поиске неисправностей. При этом чем выше нижняя частота среза, тем меньше вероятность обнаружить частичный разряд, если тот находится не в непосредственной близости от места установки датчика. В предположении, что датчик снимает сигнал с высоковольтных клемм обмотки статора, получим, что система измерений в низкочастотном диапазоне в среднем (по всем катушкам статора) будет более чувствительна к частичному разряду, чем выполняющая измерения в высокочастотном диапазоне. Следует учитывать, что, хотя наибольшему риску частичного разряда подвергаются катушки, ближайшие к высоковольтным клеммам, поскольку напряжение на этих катушках выше, чем на других, система измерений частичного разряда способна выявлять наличие иных разрядных и подобных им процессов, способных привести к значительным повреждениям изоляции, на всех катушках статора, в том числе близких к нейтральному проводу. Примером таких процессов являются обусловленные вибрацией искровые разряды от изоляции провода катушки, если эта изоляция сделана из полупроводникового материала со слишком низким удельным сопротивлением. Ухудшение состояния изоляции вследствие явлений подобного типа с большей вероятностью будет обнаружено системой измерений с соединителями более высокой емкости.

4.5.3 Измерения частичного разряда с использованием высокочастотных трансформаторов

Высокочастотные трансформаторы тока являются эффективным инструментом для контроля электродвигателей и другого электрического оборудования, в котором предполагается появление частичных разрядов (см. [17]). Широкое применение этих устройств обусловлено простотой их установки и отсутствием необходимости работать в условиях высоких напряжений. Для измерений высокочастотных импульсов частичного разряда применяют имеющие широкополосную импульсную характеристику трансформаторы тока с ферритовым сердечником, как правило, в защитном металлическом корпусе. Для того чтобы исключить переходные колебательные процессы в выходном сигнале трансформатора, необходимо обеспечить правильное согласование его импеданса. Кроме того, в этом сигнале могут присутствовать значительные шумовые процессы, что требует применения методов их различения или подавления.

Катушка высокочастотного трансформатора тока может быть установлена на кабеле заземления, идущем от конденсатора для защиты от перенапряжений, как показано на рисунке 8 (см. [15]), на кабеле у клемм двигателя, на проводнике заземления двигателя и на проводе заземления оболочки кабеля. Для способа, показанного на рисунке 8, характерно значительное ослабление сигнала частичного разряда перед его поступлением на вход трансформатора, что затрудняет его выделение на фоне помех. При использовании только заземляющего провода двигателя невозможно будет различить частичные разряды от разных фаз двигателя.

Если сердечник высокочастотного трансформатора охватывает основной провод кабеля, по которому протекает ток частоты питания, то должен быть обеспечен соответствующий воздушный зазор в магнитной цепи трансформатора для защиты от насыщения.



1 — шина к обмотке двигателя; *2* — конденсатор для защиты от перенапряжений; *3* — кабель заземления; *4* — высокочастотный трансформатор тока; *5* — изоляция: *6* — соединительный кабель измерительной цепи

Рисунок 8 — Схема установки высокочастотного трансформатора тока на кабеле от конденсатора для защиты обмотки статора от перенапряжений

4.5.4 Дефекты изоляции, выявляемые посредством измерений частичного разряда

Каждый частичный разряд создает отдельный импульс, и эти импульсы могут отличаться друг от друга. В общем случае пиковое значение импульса пропорционально размеру полости и степени развития дефекта, с которыми связан данный частичный разряд. Преимущество анализа частичных разрядов в том, что он позволяет исключить из рассмотрения слабые импульсы и сосредоточиться только на импульсах с большими значениями сигнала, т. е. на обнаружении наиболее значительных дефектов, которые с большей вероятностью могут служить причинами отказов двигателя.

Основной задачей измерения частичного разряда является определение пикового значения импульса Q_m. Обычно эту величину определяют при заданной частоте повторения импульсов. На рисунке 9 показан пример для случая частоты повторения импульсов, равной 10 импульсам в секунду. Величина Q_m может иметь разные единицы измерения (мВ, пК, мА или мкВ) в зависимости от измеряемой физической величины, описывающей импульс частичного разряда.

Причем не существует стандарта для постоянной времени датчика пикового разряда. Полоса частот измерений и другие характеристики измерительной системы у разных изготовителей могут быть разными, что затрудняет сопоставление результатов измерений, выполненных разными измерительными системами. Однако результаты могут быть сопоставлены при использовании одной и той же измерительной системы и способа вычисления Q_m. Это позволяет обнаружить фазу, которой соответствуют наибольшие значения Q_m и для которой, следовательно, риск повреждения максимален. Существует также возможность сравнить значения Q_m для разных двигателей. Наконец, можно сравнивать изменяющиеся со временем результаты измерений Q_m от одного статора, т. е. наблюдать тренд данных. В общем случае можно считать рост повреждения быстрым, если Q_m увеличивается вдвое каждые 6 мес.



1 — частота следования импульсов отрицательной полярности (–PD) с пиковым значением меньше заданного;
2 — частота следования импульсов положительной полярности (+PD) с пиковым значением меньше заданного;
3 — значение Q_m для импульсов отрицательной полярности для частоты следования 10 импульсов в секунду;
4 — значение Q_m для импульсов положительной полярности для частоты следования 10 импульсов в секунду

Рисунок 9 — Результаты анализа частичных разрядов

Анализ частичных разрядов для определения их характеристик позволяет идентифицировать повреждения изоляции обмотки и дефекты изготовления. В таблице 2 собраны сведения об общих повреждениях изоляции обмоток статора, которые, согласно заявлениям изготовителей оборудования для контроля частичных разрядов, могут быть выявлены по расположению импульсов частичного разряда в пределах одного цикла фазного напряжения двигателя с заземленным нейтральным проводом.

Таблица 2 — Дефекты изоляции, обнаруживаемые при анализе частичного разряда

Дефект	Расположение импульсов в пределах цикла	Другие влияющие факторы	Примечания
Температурная деградация корпусной изоляции	Скопление отрицательных импульсов в районе 45° и равных им положительных импульсов в районе 225° (см. рисунок 11)	Температура обмотки. Чем выше температура, тем ниже импульсы	Этот тип деградации вызывает расслоение корпусной изоляции из-за теплового старения связующего материала. Распределение пустот приблизительно равномерно по толщине изоляции. Дефект также может быть обнаружен при неработающем двигателе
Тепловые циклические нагрузки	Скопление отрицательных импульсов в районе 45° и значительно менее высоких положительных импульсов в районе 225°	Температура обмотки. Чем выше температура, тем ниже импульсы	Корпусная изоляция начинает отделяться от транспонированного стержня вследствие сдвиговых напряжений, возникающих из-за того, что коэффициент теплового расширения меди много выше, чем у изоляции. Дефект чаще встречается у крупных двигателей с длинным магнитопроводом. Пустоты рядом с проводником могут образовываться также из-за неполного заполнения связующим веществом обмотки при использовании вакуумно-нагнетательной технологии. Дефект может быть обнаружен при неработающем двигателе

Окончание таблицы 2

Дефект	Расположение импульсов в пределах цикла	Другие влияющие факторы	Примечания
Ослабление обмотки в пазах	Скопление отрицательных импульсов в районе 45° и значительно более высоких положительных импульсов в районе 225°	Нагрузка двигателя. С повышением нагрузки амплитуда импульсов положительной полярности возрастает	Высота положительных импульсов зависит от тока I в обмотке статора. Электромагнитные силы на частоте 100 или 120 Гц пропорциональны I^2. Высота импульса часто снижается при повторном закреплении обмотки клиньями. Обычно не проявляется при изоляции, полученной по вакуумно-нагнетательной технологии. Дефект не может быть обнаружен при неработающем двигателе
Деградация защитного (от градиента напряжений) покрытия паза	Скопление отрицательных импульсов в районе 45° и значительно более высоких положительных импульсов в районе 225°	С повышением нагрузки амплитуда импульсов положительной полярности не возрастает	Лакокрасочное покрытие более склонно к деградации, чем покрытие в виде слоев лакоткани. Дефект может быть обнаружен в ультрафиолетовом свете при неработающем двигателе
Деградация внепазового соединительного покрытия	Скопление импульсов в районе 0° и 180° (нулевое напряжение), а также в районе 90° и 270° при большом развитии дефекта	Имеет место на катушках вблизи вывода фазы, где градиент напряжения между катушками максимален	Механизм деградации действует очень медленно, поскольку частичные разряды параллельны поверхностям изоляции. Дефект может быть обнаружен в ультрафиолетовом свете при неработающем двигателе
Неправильное расположение или загрязнение лобовых частей обмотки, соединений фаз или соединений в клеммной коробке	Скопления, отстоящие на ± 30° от 45° и 225°; в разных фазах положительные и отрицательные импульсы находятся в фазе (см. рисунок 12)	Влажность. С увеличением влажности воздуха высота импульсов обычно понижается	Импульсы, обусловленные загрязнением, можно уменьшить очисткой обмотки, а обусловленные неправильным расположением — заполнением пространства между фазами изолирующим материалом, таким как электротехнический силиконовый каучук

На рисунках 10—12 приведены примеры импульсов частичного разряда (в единицах электрического напряжения и заряда) на выходе высокочастотной и низкочастотной измерительных систем. На рисунках 10 и 11 видно, что импульсы с разными значениями Q_m сконцентрированы в областях с центрами, приблизительно соответствующими 45° и 225° фазы цикла напряжения, что свидетельствует о расслоении корпусной изоляции обмотки статора, вызванном тепловым старением связующего материала. На рисунке 10 показана зависимость пикового значения отдельного разряда, имевшем место при данном значении фазы цикла напряжения. Число разрядов в каждой точке плоскости графика показано цветом. Последовательность цветов «зеленый — желтый — красный» соответствует возрастанию плотности разрядов. На рисунке 11 показана зависимость Q_m от фазового угла цикла, при котором имел место частичный разряд. Цветом показана частота повторения следования импульсов с данным значением Q_m. На рисунке 12 показаны импульсы противоположной полярности для двух фаз двухполюсного электродвигателя, которые сосредоточены в областях, отстоящих приблизительно на ± 30° от «классических» 45° и 225°, что является признаком межфазных частичных разрядов.

Следует отметить, что анализ частичных разрядов не позволяет выявить следующие механизмы деградации обмотки статора:

- ослабление крепления лобовой части обмотки, приводящей к истиранию изоляции вследствие относительных перемещений;
- деградация межвитковой изоляции из-за теплового старения или трения вследствие потери связующего материала в скрутке провода катушки, что, в свою очередь, может быть вызвано воздействием на обмотку чрезмерных электрических напряжений.

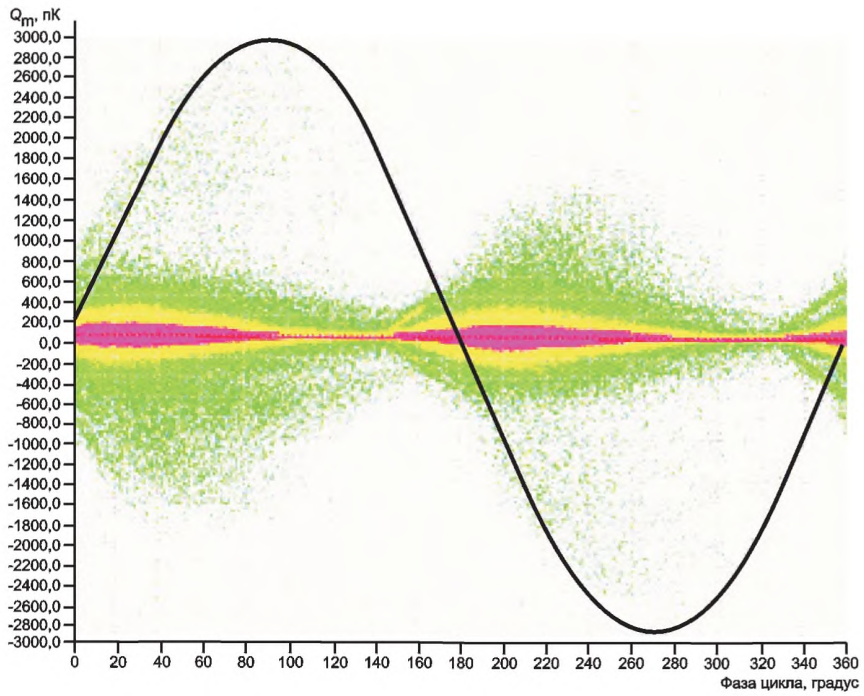


Рисунок 10 — График импульсов частичных разрядов, полученный с помощью низкочастотной измерительной системы, для фазы обмотки статора с признаками теплового старения ([18])

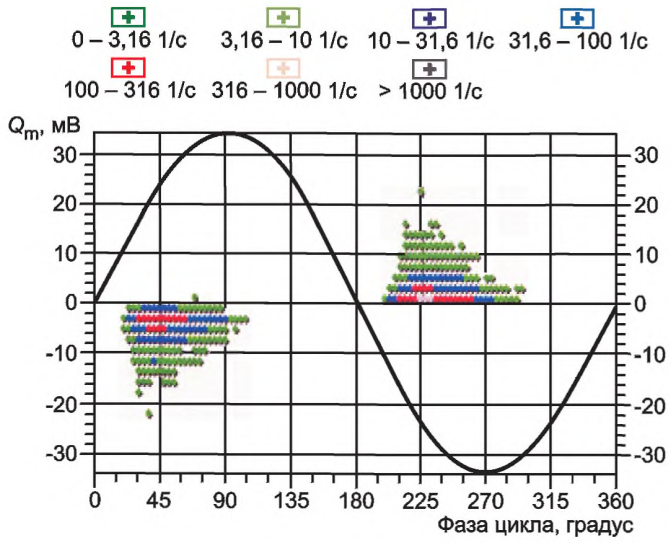


Рисунок 11 — График импульсов частичных разрядов, полученный с помощью высокочастотной измерительной системы, для фазы обмотки статора с признаками теплового старения

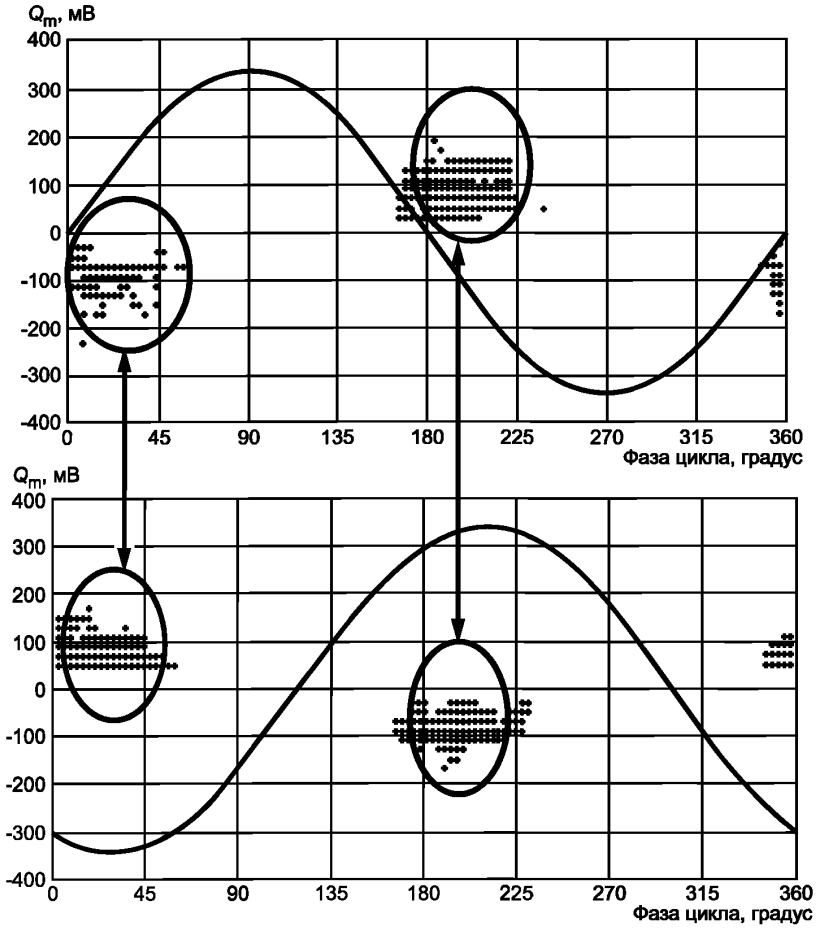


Рисунок 12 — График импульсов межфазных частичных разрядов, обусловленных неправильным расположением проводов катушки статора или загрязнением

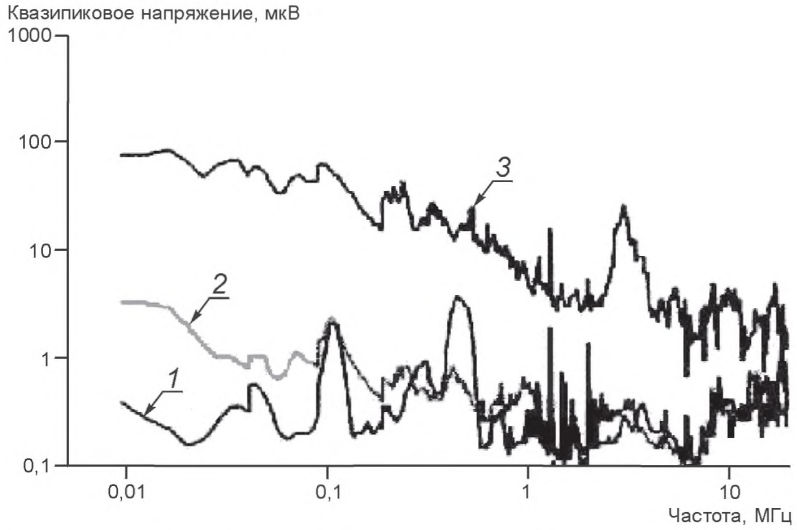
4.6 Исследование электромагнитных помех

Исследование электромагнитных помех позволяет обнаруживать и идентифицировать частичные разряды, появляющиеся вследствие дефектов изоляции, а также дуговые разряды, обусловленные механическими дефектами. Этот вид исследований широко применяют в энергетической, нефтехимической и тяжелой промышленности. Исследования проводят при нормальной нагрузке двигателя. В частотной области определяют энергию составляющих, связанных с частичными разрядами, рассмотренными в 4.5.3, или дуговыми разрядами из-за таких дефектов двигателя, как прохождение тока через подшипники и уплотнения вследствие их истираний, оборванные стержни ротора, обрыв провода в статоре, нарушение контактов, неправильное заземление вала и ряда неисправностей механической природы, таких как несоосность в соединениях.

Исследование электромагнитных помех проводят в соответствии с [18]. Они не требуют постоянной установки испытательных средств, не используют тестовые воздействия и не связаны с отключением оборудования. Исследования проводят с помощью радиочастотного трансформатора тока с разрезанным кольцом, которым охватывают провод заземления или линию питания испытуемого двигателя, после чего выполняют измерения сигналов, соответствующих тем или иным дефектам.

Анализу подвергается спектр электрического сигнала в широком диапазоне радиочастот, который сопоставляют с масками, характерными для разных явлений, таких как коронный разряд, искровой разряд в зазоре, случайный шум, электрическая дуга. Частотные составляющие спектра (квазипиковые) измеряют в микровольтах. Типичный вид спектра показан на рисунке 13. Коронный разряд, разряд в за-

зоре и случайный шум, каждому из которых соответствует своя маска, характерны для частичных разрядов. Электрическая дуга, представляющая собой непрерывный поток заряженных частиц, частичным разрядом не является, и при ее анализе средства измерений частичного разряда не могут быть использованы. Средства измерений применяются вместе с соответствующими программными средствами, позволяющими идентифицировать и локализовать каждый дефект.



1 — двигатель А (средний уровень 0,4 мкВ); *2* — двигатель В (средний уровень 0,5 мкВ); *3* — двигатель С (средний уровень 14,4 мкВ)

Рисунок 13 — Спектр электромагнитных помех двигателя циркуляционного насоса (13800 В, 4413 кВт, 324 мин$^{-1}$)

Проведение исследования требует участия опытного специалиста, способного отделить в спектре радиочастотного диапазона характерные признаки дефектов электродвигателя, выявляемых при анализе электромагнитных помех, от мешающих сигналов радиостанций, устройств беспроводной передачи данных и высоковольтных сетей.

Следует иметь в виду, что данный метод анализа не позволяет идентифицировать фазу обмотки статора, в которой наблюдается появление частичных разрядов.

На рисунке 13 показан пример спектра электромагнитных помех, полученный с использованием квазипикового детектора, для двигателей трех циркулярных насосов, условно обозначенных как А, В и С. Видно, что общий уровень электромагнитных помех для двигателя С много выше, чем для двух остальных. Высокий уровень квазипикового напряжения в диапазоне ниже 1 МГц характерен для частичных разрядов в пазах статора, а его повышение в районе 2 МГц связано с частичными разрядами на конце сердечника статора вследствие градиента напряжений и с наложением слоев изоляции паза. Высокий уровень спектральных составляющих на частотах 5 МГц и выше свидетельствует о частичных разрядах на концах стержней статора. Пики на частотах около 1 МГц связаны с работой местных радиостанций. У двигателей А и В рост спектра на частотах 100 и 500 кГц связан с помехами от высокочастотной связи в местной линии электропередачи.

4.7 Анализ тока ротора

Ток ротора легко измерить только в случае асинхронного двигателя с фазным ротором, поэтому данный метод анализа используют реже, чем анализ тока статора. Между тем в большинстве случаев применения двигателей с фазным ротором электрическая цепь ротора защищена недостаточно, а не обнаруженные вовремя дефекты в паяных соединениях и нарушения контакта с токосъемным кольцом способны привести к серьезным повреждениям машины. Небаланс токов во внешних резисторах, соединенных с токосъемным кольцом, может привести к перегреву ротора.

Обычные методы измерения тока не применимы для анализа тока ротора, поскольку его частота, равная частоте скольжения, много ниже частоты питания. Это требует применения специальных датчиков тока с воздушным сердечником или катушек Роговского.

4.8 Анализ напряжения на концах вала

Известно, что любые искажения в распределении магнитного потока в электрической машине приводят к появлению электрического напряжения на концах вала, а вызываемый этим напряжением ток вала способен привести к повреждению его подшипников.

Напряжение на концах вала является следствием асимметрии магнитной цепи ротора, связанной с изменениями свойств стали магнитного сердечника во вращающихся путях магнитного потока. Это приводит к появлению переменного напряжения в проводящей цепи, составленной из вала двигателя, подшипников, подшипниковых опор и внешней рамной конструкции двигателя. Если создаваемого напряжения достаточно для пробоя изоляции, обеспечиваемой слоем смазочного материала в подшипнике, то по цепи течет ток, который и вызывает повреждения подшипников.

Контроль напряжения на концах вала с целью обнаружения неисправностей машины до недавнего времени не находил широкого практического применения ввиду ненадежности измерений и недостаточности информации, которую можно с их помощью получить. Однако последние разработки позволили существенно повысить эффективность данного метода контроля.

Приложение А
(справочное)

Анализ с применением вектора Парка

Вектор Парка i_D, i_Q для тока питания строят на основе токов i_A, i_B, i_C в трех фазах двигателя и вычисляют по формулам:

$$i_D = \left(\sqrt{2}/\sqrt{3}\right) i_A - \left(1/\sqrt{6}\right) i_B - \left(1/\sqrt{6}\right) i_C , \quad (A.1)$$

$$i_Q = \left(1/\sqrt{2}\right) i_B - \left(1/\sqrt{2}\right) i_C . \quad (A.2)$$

В идеальных условиях симметричных токов компоненты вектора Парка имеют вид

$$i_D = \left(\sqrt{6}/2\right) i_M \sin(\omega t) , \quad (A.3)$$

$$i_Q = \left(\sqrt{6}/2\right) i_M \sin(\omega t - \pi/2) . \quad (A.4)$$

где i_M — максимальное значение тока в каждой фазе, А;

ω — угловая частота питания, рад/с;

t — время, с.

Конец вектора Парка для двигателя с симметричными фазами описывает окружность с центром в начале координат.

В аномальных условиях работы двигателя формулы (А.3) и (А.4) не выполняются, и описываемая вектором Парка кривая отличается от идеальной окружности в соответствии с имеющей место неисправностью.

Идея анализа с применением вектора Парка заключается в том, чтобы выделить в описываемой концом вектора траектории (годографе) диагностические признаки, соответствующие разным неисправностям.

Анализ с использованием вектора Парка успешно применяют при обнаружении большого числа неисправностей асинхронного трехфазного двигателя. Так, повреждения в обмотке статора приводят к эллиптической форме годографа. Степень эллиптичности пропорциональна степени развития повреждения, а ориентация осей эллипса зависит от того, обмотка какой фазы повреждена. Обрывы в пазах статора приводят к тому, что круговая траектория, описываемая концом вектора Парка, становится размазанной (имеет некоторую «толщину»), что служит диагностическим признаком данного дефекта. Особая форма годографа соответствует эксцентриситету воздушного зазора в двигателе. Информацию о степени развития повреждения получают исходя из анализа отдельных участков годографа.

В случае асинхронного привода с инвертором форма годографа, соответствующего нормальному состоянию двигателя, отличается от окружности, однако и в этом случае по значительным отклонениям в форме можно судить о наличии неисправностей в компонентах электронного управления питанием двигателя. Например, по ориентации годографа можно определять наличие короткого замыкания или разрыва цепи в полупроводниковом переключателе инвертора.

В расширенном методе вектора Парка выполняют спектральный анализ переменной составляющей модуля вектора Парка M, вычисляемого по формуле

$$M = \sqrt{i_D^2 + i_Q^2} . \quad (A.5)$$

Постоянная составляющая M, определяемая, главным образом, составляющей основной частоты тока питания, неинформативна с точки зрения выявления возможных повреждений двигателя.

Расширенный метод объединяет в себе простоту анализа с использованием вектора Парка и возможности более детальных исследований, предоставляемые спектральным анализом. Кроме того, он позволяет преодолеть ряд технических ограничений обычного спектрального анализа тока двигателя. Часто бывает сложно удалить из сигнала тока составляющую основной частоты питания, не исказив при этом составляющие ее боковых полос. В расширенном методе вектора Парка такая трудность отсутствует, поскольку составляющая основной частоты питания автоматически устраняется при преобразовании Парка. Если учесть, что в векторе Парка содержится информация о токах всех трех фаз двигателя, то расширенный метод вектора Парка предоставляет больше информации для анализа, чем обычный метод спектрального анализа тока двигателя.

Расширенный метод вектора Парка позволяет обнаруживать наличие сразу нескольких неисправностей двигателя. Вначале получают эталонный спектр, соответствующий нормальному техническому состоянию двигателя, при появлении новых составляющих в спектре судят о наличии той или иной неисправности. Так, обрывы в пазах ротора определяют при появлении в спектре составляющей на удвоенной частоте скольжения, а эксцентриситет зазора или несоосность механической нагрузки — по наличию спектральных составляющих вблизи частоты вращения ротора. Неисправности обмотки статора могут быть выявлены по наличию составляющей на удвоенной частоте питания двигателя.

Асинхронные двигатели получили широкое распространение в промышленности в разных условиях их применения, в том числе в условиях сильно изменяющихся во времени нагрузок. В частности, медленно текущие нестационарные процессы характерны для применения компрессоров. Переменные нагрузки обусловливают появление дополнительных составляющих в спектре тока питания двигателя, которые могут маскировать признаки, связанные с неисправностями самого двигателя. Вследствие этого при анализе спектра тока двигателя легко перепутать признаки, связанные с реальными неисправностями, с признаками изменений нагрузки двигателя.

Дальнейшее совершенствование метода предполагает использовать представление вектора Парка в синхронизированной системе координат, что позволит выявлять асимметрию ротора даже в условиях изменения момента нагрузки. При нормальном техническом состоянии годограф вектора Парка [$i_Q = f(i_D)$] вырождается в точку. В случае неисправности ротора он превращается в эллипс, ориентированный большой осью в сторону второго квадранта, в то время как при изменениях нагрузки будет получен эллипс, ориентированный в сторону первого квадранта.

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
ISO 13372	—	*, 1)
* Соответствующий межгосударственный стандарт отсутствует. До его принятия рекомендуется использовать перевод на русский язык данного международного стандарта.		

1) В Российской Федерации действует ГОСТ Р ИСО 13372—2013 «Контроль состояния и диагностика машин. Термины и определения».

Библиография

[1] ISO 13374-1, Condition monitoring and diagnostics of machines — Data processing, communication and presentation — Part 1: General guidelines

[2] ISO 13379 (all parts), Condition monitoring and diagnostics of machines — Data interpretation and diagnostics techniques

[3] ISO 13381-1, Condition monitoring and diagnostics of machines — Prognostics — Part 1: General guidelines

[4] ISO 17359, Condition monitoring and diagnostics of machines — General guidelines

[5] IEC/TS 60034-27-2, Rotating electrical machines — Part 27-2: On-line partial discharge measurements on the stator winding insulation of rotating electrical machines

[6] IEC 60270, High-voltage test techniques — Partial discharge measurements

[7] IEEE 1434, IEEE guide to the measurement of partial discharges in rotating machinery

[8] CISPR 16-1-1, Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods — Part 1-1: Radio disturbance and immunity measuring apparatus — Measuring apparatus

[9] NEMA MG 1-2011, Revision 1-2010, Motors and generators

[10] Benbouzid M.E.H. Bibliography on induction motors faults detection and diagnosis. IEEE Trans. Energ. Convers. 1999, 14 pp. 1065—1074

[11] Cardoso A.J.M., Cruz S.M.A., Fonseca D.S.B. Inter-turn stator winding fault diagnosis in three-phase induction motors, by Park's vector approach. IEEE Trans. Energ. Convers. 1999, 14 pp. 595—598

[12] Cardoso A.J.M., & Saraiva E.S. Computer-aided detection of air-gap eccentricity in operating threephase induction motors by Park's vector approach. IEEE Trans. Ind. Appl. 1993, 29 pp. 897—901

[13] Cruz S.M.A., & C ardoso A.J.M. Rotor cage fault diagnosis in three-phase induction motors by extended Park's vector approach. Electric Machines and Power Systems. 2000, 28 pp. 289—299

[14] Cruz S.M.A., & C ardoso A.J.M. Stator winding fault diagnosis in three-phase synchronous and asynchronous motors by the extended Park's vector approach. IEEE Trans. Ind. Appl. 2001, 37 pp. 1227—1233

[15] Culbert I.M., Dhirani H., G upta B.K. On-line measurement of partial discharges on large motors in a generating station. In: Proceedings: Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing and Coil Winding Conference, Cincinnati, OH, pp. 537—540, 2001

[16] Culbert I.M., & Rhodes W. Using current signature analysis technology to reliably detect cage winding defects in squirrel cage induction motors. IEEE Trans. Ind. Appl. 2007, 43 pp. 422—442

[17] Duyar A., & Bates A. Motor condition monitoring; MCM; An inexpensive, simple to use model based condition monitoring technology. J. Maintenance Asset Management. 2006, 21 pp. 13—22

[18] Gross D.W. Partial discharge monitoring of rotating machines — application networking and interpretation, 10th EPRI Steam Turbine-Generator Workshop, Phoenix, AZ, 2007—08

[19] Kilman G.B., & Stein J.Induction motor fault detection via passive current monitoring, Proc Int. Conference (ICEM'90), MIT, Boston, MA, 1990, pp. 13—17

[20] Schoen R.R., Habetler T.G., Kamran F., Bartfield R.G. Motor bearing damage detection using stator current monitoring. IEEE Trans. Ind. Appl. 1995, 31 pp. 1274—1279

[21] Stone G.C., Boulter E.A., Culbert I.M., Dhirani H. Electrical insulation for rotating machines — Design, evaluation, aging, testing and repair. Hoboken, NJ: Wiley — IEEE Press, 2004

[22] Stone G.C., & Warren V. Objective methods to interpret partial-discharge data in rotatingmachine stator windings. IEEE Trans. Ind. Appl. 2006, 42 pp. 195—200

[23] Tavner P.J., & Penman J. Condition monitoring of electrical machines. Letchworth: Research Studies Press, 1987

[24] Thomson W.T., & Fenger M. Current signature analysis to detect induction motor faults. IEEE Ind. Appl. Mag. 2001, 7 (4) pp. 26—34

[25] Thomson W.T., Fenger M., Lloyd B. Development of a tool to detect faults in induction motors via current signature analysis, 2003 IEEE-IAS/PCA Cement Industry Conference, Dallas, T X, 2003-05-04/09

[26] Thomson W.T., & Gilmore R.J. Motor current signature analysis to detect faults in induction motors — Fundamentals, data interpretation and industrial case histories. In: Proceedings of the 32nd Turbomachinery Conference, 2003

[27] Thomson W.T., & Rankin D. Case histories of rotor winding fault diagnosis in induction motors. In: 2nd Int. Conf Proc on Condition Monitoring, University College Swansea, 1987—03

[28] Timperley J.E., & Chambers E.K. Locating defects in large rotating machines and associated electrical systems through EMI Diagnostics. 34th Session of CIGRE, paper 11—311, Paris, 1992—09

[29] Timperley J.E., & Michalec J.R. Reliability of operation through proper specification of rotating machinery. IEEE Trans. Ind. Appl. 1993, 29 pp. 225—232

[30] Timperley J.E., & Nichols D.K. Measurement of 2,300 volt motor defects with on-line EMI diagnostic techniques. In: IEEE DEIS International Symposium on Electrical Insulation, Arlington, VA, 1998—06

УДК 631.242.1.0723:006.354	МКС 29.160.30 17.160	Е61	IDT

Ключевые слова: контроль технического состояния, диагностирование, двигатели асинхронные трехфазные, сигнатурный анализ электрических сигналов

Редактор *Л.С. Зимилова*
Технический редактор *В.Н. Прусакова*
Корректор *М.В. Бучная*
Компьютерная верстка *Е.О. Асташина*

Сдано в набор 04.03.2019. Подписано в печать 20.03.2019. Формат 60×84 1/8. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 3,72. Уч.-изд. л. 3,37.
Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

Создано в единичном исполнении ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ» для комплектования Федерального информационного фонда стандартов, 117418 Москва, Нахимовский пр-т, д. 31, к. 2.

gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru

gost.e-ecolog.ru