

Л.Г. Сидельников, Д.О. Афанасьев

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

КОНТРОЛЬ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В статье освещается актуальная на сегодняшний день проблема выбора стратегии и методов диагностирования асинхронных двигателей. Проведен сравнительный анализ методов контроля технического состояния асинхронных двигателей на этапах производства, эксплуатации и ремонта. Рассмотрены методы тестовой и функциональной диагностики асинхронных двигателей. Проведен сравнительный анализ методов обслуживания оборудования роторного типа. Выявлены преимущества диагностики асинхронных двигателей по фактическому состоянию. Проанализированы современные системы и методы диагностики асинхронных двигателей. Рассмотрены основные методы контроля технического состояния асинхронных двигателей в процессе эксплуатации: анализ вибрации отдельных элементов двигателя, анализ акустических колебаний, измерение и анализ магнитного потока в зазоре двигателя, анализ внешнего магнитного поля, измерение и анализ температуры отдельных элементов двигателя, анализ электрических параметров и контроль состояния изоляции статорной обмотки асинхронного двигателя. Выявлены преимущества и недостатки рассмотренных методов. Перечислены основные виды дефектов асинхронных двигателей, выявляемые данными методами контроля технического состояния. Детально проанализированы широко распространенные на практике методы диагностики асинхронных двигателей: метод спектрального анализа тока статора асинхронного двигателя, метод анализа спектров Парка тока и напряжения, контроль состояния изоляции статора асинхронного двигателя по уровню и распределению частичных разрядов. Рассмотрен вопрос выбора необходимого набора первичных датчиков частичных разрядов и определения оптимального места их установки. Также в статье определены основные проблемы, возникающие при проведении измерений частичных разрядов в асинхронных двигателях в процессе эксплуатации.

Ключевые слова: асинхронные электродвигатели, тестовая и функциональная диагностика, методы обслуживания, методы и системы диагностики, дефект, спектральный анализ, изоляция статорной обмотки, частичный разряд.

Введение

Отечественный и зарубежный опыт показывает, что внедрение средств диагностирования является одним из важнейших факторов повышения экономической эффективности использования оборудования в промышленности [1]. Назначение диагностики – выявление и предупреждение отказов и неисправностей, поддержание эксплуатационных показателей в установленных пределах, прогнозирование состояния в целях полного использования ресурса [1].

Короткозамкнутые асинхронные электродвигатели - самые распространенные машины в приводах современных технологий. Оптимальному использованию таких электродвигателей препятствует их высокая повреждаемость. Ежегодно выходят из строя 20-25 % от общего количества установленных электродвигателей [2]. Возникающий в связи с этим ущерб связан с простоем технологического оборудования вследствие аварии двигателя. Дополнительно к прямым убыткам добавляются снижение электро- и пожаробезопасности, что связано с короткими замыканиями, которые могут присутствовать в обмотке статора или ротора поврежденного электродвигателя [3].

Таким образом, задачи снижения уровня прямых и косвенных затрат в процессе эксплуатации асинхронных двигателей, повышения качества их диагностики, а также

повышения их надежности актуальны на сегодняшний день в любой отрасли производства. В качестве объектов исследования в статье рассмотрены наиболее широко применяемые общепромышленные асинхронные двигатели средней мощности (от 1 до 4000 кВт).

Целью работы является:

- анализ современных методов и средств диагностики технического состояния асинхронных двигателей;
- определение методов, целесообразных при диагностике общепромышленных асинхронных двигателей средней мощности.

1. Диагностика асинхронных двигателей на этапах производства, эксплуатации и ремонта

Выбор стратегии и методов диагностирования асинхронных двигателей определяется рядом факторов. Первостепенное значение имеет конечная цель диагностирования, которая зависит от того, на каком этапе жизненного цикла определяется техническое состояние двигателя: на этапе производства, эксплуатации или ремонта.

На этапе производства важно обеспечить оптимальное проектирование и доводку конструкции, ориентируясь на обеспечение надежности и долговечности, а также контроль качества изготовления деталей и их монтажа. Основные виды неисправностей в условиях серийного производства: кинематические ошибки изготовления деталей, выход параметров за допустимые пределы по точности и дефекты сборки, к которым относятся неуравновешенность, наличие эксцентриситета, различного рода перекосы, зазоры, относительные смещения взаимодействующих деталей, несоблюдение технологии смазки и т.п. На этапе эксплуатации, вследствие естественного процесса старения элементов со временем наработки, происходят изменения параметров двигателей, приводящие к неисправностям и поломкам.

По скорости развития эксплуатационные дефекты делят на две категории: быстро развивающиеся, которые вызывают внезапные отказы, и медленно развивающиеся. К первой категории относятся трудно прогнозируемые отказы, которые являются следствием производственных технологических дефектов или разрушения под действием мгновенно возникающей нагрузки, превышающей предел прочности элементов. Ко второй категории относятся неисправности, возникновение и развитие которых может быть зарегистрировано, спрогнозировано и проконтролировано до их критического уровня.

При правильной организации эксплуатации асинхронных двигателей вид неисправности и объем ремонта можно определить заранее, до наступления критического состояния механизма. Диагностика на этапе ремонтных работ сводится к послеремонтному контролю технического состояния. В объем диагностирования необходимо включать и предремонтную оценку технического состояния машин [4].

У электродвигателей после ремонта с разборкой и заменой деталей надежность работы часто снижается. Во время ремонта проблематично выявить скрытые дефекты, такие, например, как дефекты стержней короткозамкнутого ротора или нарушение изоляции обмотки статора [2].

В настоящее время возникает потребность диагностики состояния асинхронных электродвигателей в процессе его работы. Обнаружение дефектов в работающем электродвигателе на ранней стадии развития позволит предупредить внезапную остановку производства в результате аварии, снизить расходы на ремонт электродвигателя и увеличить срок его службы.

2. Анализ тестовой и функциональной диагностики асинхронных двигателей

Современные системы и методы диагностики асинхронных двигателей можно разделить на две группы. К первой группе относятся методы тестовой диагностики. Это измерение сопротивления изоляции, токов утечки, внутреннего сопротивления обмоток, тангенса угла диэлектрических потерь обмоток, метод высоковольтного импульса и др. Тестовое диагностирование - основной вид выявления дефектов электродвигателей в отечественной энергетике. Оно определило сложившуюся структуру технического обслуживания и ремонта по регламенту. Такая диагностика способствует не только предупреждению развития различных дефектов, но и их появлению. Например, при проведении плановых ремонтов электрических машин, после полной сборки двигатель подвергается испытаниям повышенным напряжением, которые оказывают на изоляцию машины пагубное влияние. Это вызывает появление в обмотке микродефектов, развивающихся в процессе работы электродвигателя под влиянием некачественной электроэнергии, перегрузок, частых пусков и остановок. С каждым высоковольтным испытанием при планово-предупредительных ремонтах число дефектов увеличивается. Это в конечном итоге приводит к аварийному выходу из строя электрического двигателя. Каждая разборка и сборка электродвигателя увеличивает эти микродефекты.

В настоящее время разработаны многофункциональные система диагностики изоляции асинхронных двигателей посредством высоковольтного импульсного испытания. Авторы данных систем утверждают, что выполняется неразрушающий тест изоляции, объясняя это своевременной остановкой теста. Однако тест прекращается только после превышения пределов прочности изоляции. К недостаткам тестовой диагностики можно отнести также временную приостановку работы электродвигателя, отсутствие возможности защитного отключения оборудования во время его работы для предотвращения полного выхода его из строя, отсутствие контроля ненормальных режимов работы данного оборудования и т.д.

Вторая группа включает в себя методы функциональной диагностики. Методы функциональной диагностики экономически наиболее предпочтительны, так как не требуют временного вывода электрооборудования из эксплуатации. Для подготовки к ремонту необходимо обнаружить все дефекты, влияющие на ресурс, задолго до отказа. В связи с этим необходимо применение методов диагностики не только относящихся к категории функциональных, но и позволяющих выявить дефект конкретной части электродвигателей. [3].

Сравнительный анализ методов обслуживания оборудования роторного типа показал, что при планово-предупредительных ремонтах и испытаниях не менее 50 % обслуживаний выполняется без фактической их необходимости. Для большинства машин при этом не снижается частота выхода их из строя. Надежность работы после обслуживания с разборкой и заменой деталей часто снижается. Около 70 % дефектов вызвано производством работ по обслуживанию. При обслуживании по фактическому состоянию предприятие имеет объективные данные о текущем техническом состоянии оборудования. Не нарушается нормальная работа механизма из-за не обоснованного вмешательства человека [5,7-10].

3. Методы диагностики асинхронных двигателей

В настоящее время известны следующие методы диагностики асинхронных двигателей:

1. Методы, основанные на анализе вибраций отдельных элементов агрегата.
2. Методы, основанные на анализе акустических колебаний, создаваемых работающей машиной.
3. Методы, основанные на измерении и анализе магнитного потока в зазоре двигателя и внешнего магнитного поля.
4. Методы, основанные на измерении и анализе температуры отдельных элементов машины.
5. Методы диагностики механических узлов (в частности подшипников) основанные на анализе содержания железа в масле.
6. Методы, основанные на анализе электрических параметров машины.
7. Методы диагностики состояния изоляции.

Методы вибродиагностики получили наиболее широкое распространение. Суть методов заключается в анализе вибрационных параметров в различных точках электродвигателя. К вибрационным параметрам относятся виброперемещение, виброускорение и виброскорость. Регистрации подлежат как действующие (среднеквадратичные) значения, так и пик-фактор. Большое распространение получили также методы спектрального анализа, в которых в качестве диагностических параметров используют значения амплитуды отдельных гармонических составляющих вибрационного сигнала. Контроль вибрационных параметров производят в нескольких точках. Регистрации подлежат вибрационные параметры в вертикальном, горизонтальном и осевом направлениях. В качестве первичных преобразователей используются как контактные датчики (обычно пьезоакселерометры), так и бесконтактные (оптические датчики перемещения). Главным недостатком вибродиагностики является необходимость использования специальных виброакустических датчиков, сложность их установки и сложность интерпретации результатов. Вибродиагностика позволяет определять дефекты подшипникового узла, эксцентриситета, и в меньшей степени - дефекты обмотки статора. При этом анализ отказов электродвигателей показывает, что до 80% электродвигателей выходят из строя из-за дефектов обмотки статора [8,11]. Методы акустической эмиссии также не достаточно чувствительны именно к электрическим повреждениям низковольтных двигателей [11].

Установлено, что внешнее магнитное поле электрических машин в значительной мере определяется различного рода несимметричностью обмоток статора и магнитной системы. Несимметричности, обусловленные возникшими дефектами, изменяют характер внешнего магнитного поля, вызывая спектр пространственных гармоник индукции. Это дает возможность использовать анализ индукции внешнего магнитного поля для диагностирования асинхронного двигателя.

Теоретически доказана зависимость между наличием в двигателе дефектов и проявлением определенных гармоник в спектре внешнего магнитного поля двигателя, а именно:

- наличие статического эксцентриситета ротора приводит к появлению во внешнем магнитном поле асинхронных двигателей пространственных гармоник, порядок которых ниже порядка основной пространственной гармоники и которые в значительной мере определяют уровень внешнего магнитного поля электрической машины;
- наличие во внешнем магнитном поле двигателя гармоник $k-1$ и $k+1$, где k – основная гармоника, может служить диагностическим признаком выработки подшипников;

- наличие во внешнем магнитном поле двигателя гармоник $3k$ может служить диагностическим признаком межвитковых и межфазных замыканий обмотки статора.

На основе результатов, автором [11] разработаны основные принципы регистрации внешнего магнитного поля двигателей, интерпретации полученных результатов и суждения о наличии в двигателе дефектов. Данные принципы явились основой метода диагностики асинхронных электродвигателей на основе анализа параметров их внешнего магнитного поля. Суть метода заключается в размещении рядом с двигателем электромагнитного датчика, позволяющего фиксировать внешнее магнитное поле, образующееся вокруг двигателя в процессе его работы, и представляющее собой отголоски мультипликативного поля в магнитном зазоре асинхронного двигателя. Сигнал с датчика поступает на персональный компьютер, где он оцифровывается и записывается. Далее производится спектральный анализ полученного сигнала и по определенным характеристикам полученной картины определяется вид неисправности. Достоверность результатов диагностики данного метода составляет 92 % [11,12].

Методы, основанные на измерении и анализе магнитного потока в зазоре двигателя распространены для высоковольтных машин (от 6 кВ и выше). Установка датчиков магнитного поля требует непосредственного доступа к объекту диагностирования. Установка датчиков магнитного поля (элементов Холла или магниторезисторов) возможна только при изготовлении машины или ремонте.

Методы тепловизионного контроля позволяют достаточно точно определять состояние подшипниковых узлов электрических машин. Однако, для контроля внутренних повреждений изоляции машины они не пригодны. В качестве датчиков температуры могут быть использованы бесконтактные инфракрасные пирометры. Это позволяет их использовать при отсутствии непосредственного доступа к диагностируемой машине. Однако закрытое исполнение приводов не позволяет использовать бесконтактные датчики [8].

Методы, основанные на анализе содержания железа в масле, широко применяются для диагностики механических узлов приводов. Однако эти методы определяют состояние механизма по косвенным признакам, что не позволяет своевременно выявить развивающиеся повреждения [8].

В последнее время широко развиваются методы диагностики состояния асинхронных двигателей, основанные на контроле потребляемого тока с последующим выполнением специального спектрального анализа полученного сигнала. Это позволяет с высокой степенью достоверности определять состояние различных элементов двигателя. Физический принцип, положенный в основу этого метода, заключается в следующем. Любые возмущения в работе электрической и/или механической части электродвигателя и связанного с ним устройства приводят к изменениям магнитного потока в зазоре электрической машины и, следовательно, к слабой модуляции потребляемого электродвигателем тока. Наличие в спектре тока двигателя характерных частот определенной величины свидетельствует о наличии повреждений электрической и/или механической части электродвигателя и связанного с ним механического устройства [13-17].

Токи статора предоставляют информацию об обрывах стержней, несоосности, статическом или динамическом эксцентриситете, межвитковых замыканиях обмоток статора. Механические повреждения, такие как разрушение подшипников также выявляются по спектру тока [13,18].

Серьезность повреждений определяется сравнением величины сигнала на характерной частоте повреждения с величиной сигнала на частоте питающей сети.

Частоты, характерные для отдельных видов повреждений, совпадают очень редко. Диагностика тока и последующий спектральный анализ позволяют обеспечить разрешение по частоте до 0,01 Гц. Когда частоты от различных повреждений совпадают необходимо дальнейшее уточнение характера дефекта с использованием традиционно применяемых методов диагностики. В ситуации, когда на двигателе установлены два одинаковых подшипника и токовая диагностика показала повреждения на «подшипниковых» частотах, дальнейшее определение дефектов подшипников надо выполнять с помощью вибродиагностики или тепловизора (пирометра) [13].

Недостатком спектрального анализа тока асинхронного двигателя является сложность оценки результатов. Любая амплитудно-модулируемая частота учитывается в спектре дважды, по обе стороны питающего напряжения. Двойной учет модулируемой частоты обуславливает недостаточную точность диагностирования и отсутствие возможности увеличения числа анализируемых гармоник [19,20]. Для исключения наложения частот от различных повреждений и, как следствие, искажения картины реального состояния двигателя, используется метод анализа спектров векторов Парка тока (PI) и напряжения (PU).

Питающее напряжение не является идеально синусоидальным, поэтому в получаемых спектрах PI и PU присутствуют гармоники, обусловленные качеством питающего напряжения. Неисправности электродвигателя и механической нагрузки вызывают соответствующие гармоники только в спектре тока.

В отличие от простого спектрального анализа сигналов тока, при формировании спектров модуля вектора Парка любая модулируемая амплитудной модуляцией характерная частота учитывается в спектре вектора Парка только один раз. Гармоники в спектре PI, соответствующие различным видам неисправностей, отличаются друг от друга. Таким образом, выявление в спектре PI характерных гармоник достоверно и однозначно свидетельствует о наличии электрических и механических неисправностей в электродвигателе и приводимом им в действие устройстве.

Для обнаружения неисправностей электродвигателя выделяются характерные частоты электродвигателя и связанных с ним механических устройств. Характер и степень развития неисправности выявляются путем сравнения значений амплитуд PI на характерных частотах со значением PI на частоте 0 Гц.

Вывод о наличии неисправности электродвигателя можно сделать на основе сравнения значений амплитуд PI на частотах, которые характерны для повреждений, с уровнем сигнала при частоте, равной нулю. Если амплитуды PI на характерных частотах, ниже амплитуды модуля PI на частоте 0 Гц на заданную величину, делается вывод о хорошем техническом состоянии электродвигателя и связанных с ним механических устройств. В случае если указанная разница между амплитудами больше заданной величины, делается заключение о наличии соответствующего данной характерной частоте PI повреждения. Спектральный анализ полученного сигнала и сравнение амплитуд PI производят преимущественно в области от - 100 дБ до 0 дБ путем выявления признаков неисправностей в виде пиков на характерных частотах [20].

Метод диагностирования состояния асинхронных двигателей на основе спектрального анализа векторов Парка тока и напряжения, по сравнению с другими способами диагностики, обладает рядом преимуществ:

- расширение перечня диагностируемых повреждений и повышение точности диагностирования;
- диагностика состояния электродвигателя методом спектрального анализа спектров модуля векторов Парка позволяет выявить основные виды дефектов электродвигателя и связанного с ним механического устройства;

- снижение трудоемкости процедуры диагностирования. Это обусловлено тем, что при совпадении линий в спектрах модуля вектора Парка тока и напряжения отсутствует необходимость проверки состояния спектра на каждой характерной частоте при каждой операции диагностики каждого электродвигателя;
- обеспечение возможности дистанционного диагностирования (на расстоянии от электродвигателя – в электрошите питания и/или управления);
- упрощение процедуры диагностирования: не требуется отключение электродвигателя и/или снятие нагрузки;
- обеспечение возможности полной автоматизации процесса диагностики.

Упрощенная процедура диагностирования, возможность проведения диагностики в дистанционном режиме и полной автоматизации процесса диагностики позволяют проводить регулярные измерения даже при значительном парке электродвигателей, накапливать базу данных измерений, отслеживать динамику фактического развития отдельных повреждений и прогнозировать их дальнейшее развитие и остаточный ресурс оборудования. Применение данного метода позволяет в полной мере реализовать технологию обслуживания оборудования по фактическому состоянию. Это обеспечивает снижение до минимума ущерба предприятия от аварийных отказов оборудования, за счет раннего обнаружения зарождающихся дефектов и контроля развития повреждений [19].

Общим недостатком метода спектрального анализа тока статора и спектрального анализа модулей векторов Парка тока и напряжения является необходимость учета влияния на электрические параметры привода параметров питающей сети, характера нагрузки, влияния внешних электромагнитных полей, переходных процессов в приводе. При использовании регулируемого электропривода на основе силовых полупроводниковых преобразователей в спектрах токов возникают частоты, обусловленные коммутацией вентиля. Это также необходимо учитывать [8]. Для достоверного диагностирования состояния электродвигателя необходимо осуществлять обработку осциллограмм статорного тока относительно большой длительности при постоянной частоте и слабо меняющейся нагрузке. Для двигателей, постоянно работающих в динамических режимах (частые пуски и торможения), рассмотренные методы непригодны [21].

В динамических режимах, когда многократно возрастают нагрузки во всех узлах электродвигателя многие дефекты, даже на стадии развития, проявляются более заметно в токовых и акустических сигналах. Для их распознавания необходимо создавать базу данных признаков той или иной неисправности на основе математической обработки осциллограмм статорного тока. Методы подобного рода диагностирования в настоящее время находятся в развитии. Одним из перспективных направлений являются компьютерные исследования на моделях электромеханических устройств, в составе которых удастся имитировать различные дефекты.

В настоящее время известные модели двигателей достаточно точно отражают характер протекания электромагнитных и электромеханических процессов в исправном электродвигателе и не позволяют исследовать влияние различных дефектов и неисправностей на основные характеристики двигателей. Актуальной становится разработка новых моделей электродвигателя, на основе которых реализуется возможность проведения исследований влияния на контролируемые параметры различных неисправностей. Так в [21] был разработан алгоритм, реализующий конечно-элементную математическую модель асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Данный метод может быть положен в основу диагностики повреждений ротора по осциллограмме пускового тока двигателя.

Контроль состояния изоляции высоковольтных асинхронных двигателей в процессе эксплуатации может быть осуществлен несколькими методами. Современные, наиболее эффективные методы диагностики параметров изоляции следующие:

- контроль вибрации секций обмоток статора в пазах и в зоне лобовых частей;
- контроль пульсаций радиальной составляющей магнитного поля в зазоре;
- контроль частичных разрядов в изоляции обмотки статора.

Частичные разряды содержат информацию о степени развитости дефекта. Амплитудные и амплитудно-фазовые распределения частичных разрядов являются наиболее информативными признаками наличия различных дефектов в изоляции высоковольтных электрических машин [22-24]. Остановимся на данном методе контроля состояния изоляции подробнее.

Контроль состояния изоляции статоров асинхронных двигателей по уровню и распределению частичных разрядов возможен для двигателей, рабочее напряжение которого составляет от 4 кВ и выше. Для двигателей, работающих при меньших рабочих напряжениях статорной обмотки, возникновение дефектов в изоляции не всегда сопровождается появлением частичных разрядов. По этой причине эффективность применения этого метода для низковольтных двигателей невысока.

Для контроля состояния изоляции асинхронных двигателей в процессе эксплуатации используются следующие системы диагностики:

- система непрерывного контроля состояния изоляции при помощи стационарных систем, смонтированных на каждом контролируемом электродвигателе;
- система периодического мониторинга состояния изоляции при помощи стационарно установленных датчиков и использования переносного прибора;
 - система выборочного контроля состояния изоляции электродвигателей.

При выборочном контроле установка датчиков производится непосредственно перед проведением измерений. Недостатком такой системы является то, что для установки датчиков частичных разрядов двигатель часто необходимо выводить из работы.

Эти системы диагностики для контроля состояния изоляции статора достаточно часто применяются на практике. Стоимость и эффективность этих систем в основном зависят от стоимости контролируемого электродвигателя и его технологической значимости.

Одним из наиболее важных вопросов, возникающий при проведении диагностики состояния изоляции по частичным разрядам, является выбор диапазона частот, в котором предполагается проводить измерения параметров частичных разрядов. Вопрос выбора оптимального частотного диапазона для проведения измерений частичных разрядов неоднозначен, в нем есть несколько противоположных аспектов. Без решения этого вопроса трудно быть уверенным в достоверности конечных диагнозов. На практике используется измерительное оборудование, работающее в высокочастотном диапазоне (от 0,5 до 80 МГц). Для регистрации частичных разрядов в обмотках статоров асинхронных двигателей используются высокочастотные трансформаторы тока и конденсаторы связи. Измерительное оборудование, работающее в других диапазонах частот, получило малое распространение.

Применение акустического метода регистрации частичных разрядов затруднено из-за экранирования активных частей статора элементами конструкций машин. Для приборов, работающих в сверхвысокочастотном диапазоне частот, корпус статора также является непреодолимым препятствием на пути регистрации электромагнитного излучения от частичных разрядов.

Все проблемы с изоляцией обмотки статора асинхронного двигателя возникают, обычно, в следующих трех основных зонах:

- в пазах пакета статора между секцией обмотки и сталью пакета статора или между двумя секциями обмотки, принадлежащими разным фазам обмотки;
- на срезе пакета статора при фазном напряжении из-за проблем полупроводящего покрытия в изоляции секций;
- в лобовых частях секций обмотки статора под воздействием линейного напряжения между фазами обмотки.

Во всех этих трех основных местах расположения обмотки статора или максимально близко к ним, где потенциально могут и обычно возникают частичные разряды, следует монтировать первичные датчики частичных разрядов.

Высокой информативностью, с точки зрения регистрации частичных разрядов в статоре асинхронного двигателя, обладают входные высоковольтные клеммы обмотки статора, к которым подключается питающий кабель. Обычно здесь устанавливают конденсаторы связи.

Монтировать конденсаторы связи необходимо как можно ближе к обмотке статора, внутри внешнего корпуса статора асинхронного двигателя, чем достигается максимальная чувствительность измерительной схемы. Оптимальной точкой являются входные зажимы обмотки. Ближе к обмотке установить конденсаторы связи часто затруднительно.

Существует несколько способов подключения конденсаторов связи к измерительным приборам, предназначенных для регистрации частичных разрядов в изоляции асинхронных двигателей. Различные технические решения, применяемые в этих схемах, позволяют, помимо выделения высокочастотного сигнала частичных разрядов, решить несколько дополнительных проблем регистрации частичных разрядов. Например, возможность регистрировать не только высокочастотные импульсы, но и иметь синхронизирующий сигнал, позволяющий определить фазовую связь импульсов частичных разрядов с питающим напряжением, приложенным к контролируемой фазе обмотки статора. Знание угловой фазы возникновения импульсов частичных разрядов позволяет в дальнейшем проводить углубленную экспертизу, определять тип дефекта в изоляции, оценивать реальную степень его развития. Помимо этого, в схемах подключения измерительных конденсаторов связи используют дополнительные элементы, позволяющие снизить уровень помех, наводимых в соединительном кабеле от посторонних источников.

Конденсаторы связи являются частотно зависимыми датчиками частичных разрядов. Это отрицательно сказывается на возможности регистрации импульсов, возникших в глубине обмотки. Конденсаторы связи эффективно работают в диапазоне частот в десятки и сотни мегагерц, но значительно хуже регистрируют сравнительно низкочастотные импульсы, возникшие в обмотки на удалении от входных клемм. Чем дальше от клемм возник импульс, тем меньше шансов зарегистрировать его при помощи конденсаторов связи.

Очевидно, что на выходе конденсатора связи сигнал от импульса в глубине изоляции статора электродвигателя будет во много раз меньше амплитуды импульса в месте установки конденсатора. Такой разброс амплитуд регистрируемых импульсов частичных разрядов не позволяет корректно контролировать общее техническое состояние изоляции статора, оценивать остаточный ресурс изоляции.

Таким образом, при повышении частоты регистрации импульсов частичных разрядов, при использовании в качестве датчиков измерительные конденсаторы связи, происходит уменьшение зоны чувствительности прибора. Это явление не позволяет корректно оценивать степень развития дефектов, развивающихся в глубине обмотки, на большом удалении от входных зажимов.

Зона пазов статора, в которых располагаются секции трехфазной обмотки, является важной для проведения диагностики состояния изоляции обмотки. Чем больше осевые размеры статора контролируемого асинхронного двигателя, тем большее количество первичных датчиков частичных разрядов необходимо установить. В качестве дополнительных датчиков частичных разрядов используются различные антенны, монтируемые в пазах статора.

В практике диагностики используются датчики двух типов:

– Плоские датчики электромагнитного поля (плоские катушки или даже полоски фольги), которые клеиваются в пазы, встраиваются между секциями обмотки, вставляются под пазовые клинья обмотки статора. Эти датчики по принципу своего действия представляют собой антенны электромагнитного излучения. Недостатком использования таких датчиков электромагнитного поля является высокая трудоемкость их установки в пазы статора, при отключенном и разобранном двигателе. При этом необходимо проводить выемку ротора, чтобы получить хороший доступ к пазовым клиньям статора. Существуют также и некоторые проблемы по безопасному выводу соединительного измерительного кабеля из зазора машины к месту подключения измерительного прибора.

– Стандартные термометры сопротивления, как датчики частичных разрядов, монтируемые в пазах обмотки статора, заложенные на заводе-изготовителе асинхронного двигателя между секциями обмотки и на дне пазов статора. Эти датчики для контроля температуры, для высокочастотных сигналов частичных разрядов также являются электромагнитными антеннами. Использование таких датчиков, в отличие от дополнительно устанавливаемых датчиков электромагнитного поля, не требует существенного вложения средств и больших затрат на монтажные работы. Недостатком использования этих датчиков, при определенных параметрах статора и соединительных проводов, возможна пониженная их чувствительность к разрядам. Например, при применении в цепях проводов, не рассчитанных на пропускание высокочастотных сигналов.

В некоторых случаях для измерения частичных разрядов в асинхронных двигателях используются специальные дополнительные датчики. Основное назначение дополнительных датчиков – повышение помехоустойчивости измерительных схем, созданных на основе конденсаторов связи и электромагнитных антенн в пазах. При помощи сигналов от дополнительных датчиков удается отделить импульсы частичных разрядов, возникших в изоляции обмотки статора двигателя, от высокочастотных импульсов, наведенных от других высоковольтных объектов. Дополнительные датчики, используемые в схемах измерения частичных разрядов в изоляции статора асинхронного двигателя, могут быть установлены в различных местах.

Места установки дополнительных датчиков определяются целями проводимых исследований и возможностями самого датчика, а именно:

– В нейтрали обмотки статора асинхронного двигателя, если она включена в звезду. Если у обмотки статора нейтральная точка изолирована от земли, то в этом случае используют стандартные конденсаторы связи, монтируемые внутри корпуса электрической машины. Если нейтральная точка трехфазной обмотки статора подключена к земле, то на проводнике заземления нейтрали монтируют высокочастотные импульсные трансформаторы тока.

– Датчики высокочастотного электромагнитного излучения внутри корпуса статора. При помощи этих датчиков контролируются поверхностные и коронные разряды в изоляции обмотки статора, возникающие в зоне лобовых частей обмотки и в местах выхода секций обмотки из пакета активной стали. Обычно это антенны

различной конструкции, регистрирующие импульсы частичных разрядов в сверхвысокочастотном диапазоне частот.

При измерении частичных разрядов в процессе эксплуатации асинхронных двигателей присутствует большой уровень наведенных высокочастотных помех. Борьбе с этими помехами приходится уделять наибольшее внимание при организации контроля состояния изоляции статорной обмотки. Проблемой, возникающей при проведении измерений частичных разрядов в асинхронных двигателях в процессе эксплуатации, являются высокие требования к надежности работы и монтажа конденсаторов связи. Подключение конденсаторов связи может быть произведено только на отключенном оборудовании. Конденсаторы связи должны надежно работать в условиях высокой температуры, сильных магнитных полей и других внешних воздействий [24].

Анализ современных диагностических комплексов показал, что для повышения достоверности диагностики технического состояния асинхронных двигателей необходимо совершенствование существующих и разработка новых методов и средств диагностики асинхронных двигателей в процессе эксплуатации. А также необходима разработка средств комплексной диагностики асинхронных двигателей малой и средней мощности на основе электрического, магнитного, теплового и вибрационного методов [25].

Выводы

1. Все рассмотренные методы диагностики технического состояния асинхронных двигателей имеют свои достоинства и недостатки. При диагностике общепромышленных асинхронных двигателей средней мощности возможно применение методов, основанных на анализе электрических параметров двигателя (ток, напряжение, мощность, тангенс угла диэлектрических потерь и т.д.), а также методов тепловизионной диагностики узлов. Это обусловлено простотой реализации, относительно низкой стоимостью, высокой производительностью и широкими возможностями для автоматизации диагностирования [25].

2. Для контроля состояния изоляции статорной обмотки асинхронного двигателя целесообразно дополнительно использовать метод контроля частичных разрядов, предоставляющий наиболее полную информацию о наличии различных дефектов в изоляции асинхронного двигателя на ранней стадии их развития. Однако данный метод, как говорилось ранее, можно применять лишь для высоковольтных двигателей.

3. Методы, основанные на измерении внешнего магнитного поля, малоприменимы при диагностике ряда общепромышленных асинхронных двигателей. Эффект экранирования ферромагнитным корпусом полей оказывает значительное влияние на достоверность результатов диагностики по внешнему магнитному полю. Метод применим для машин с немагнитным корпусом.

4. Методы вибродиагностики являются достаточно дорогими и трудоемкими, требующими применения специальной измерительной техники и программного обеспечения.

5. Для получения наиболее достоверной информации при оценке технического состояния асинхронных двигателей, необходимо рассмотренные методы применять в совокупности. Это может быть реализовано в диагностических комплексах.

6. Методы функциональной диагностики экономически наиболее предпочтительны, так как не требуют временного вывода электрооборудования из эксплуатации.

7. При обслуживании по фактическому состоянию предприятие имеет объективные данные о текущем техническом состоянии оборудования. Не нарушается нормальная работа механизма из-за не обоснованного вмешательства человека [5,7-10].

8. Широко развиваются методы диагностики состояния асинхронных двигателей, основанные на контроле потребляемого тока с последующим выполнением специального спектрального анализа полученного сигнала.

Заключение

Не смотря на большое количество методов диагностики электродвигателей, вопрос продолжает оставаться актуальным по ряду причин. Среди этих причин отсутствие надежных критериев оценки технического состояния, динамики развития дефектов, отсутствие методов прогнозирования остаточного ресурса, недостаточно исследованы отдельные неисправности двигателей и не определены специальные диагностические параметры, характеризующие изменение процессов функционирования при возникновении соответствующих неисправностей. Имеющиеся критерии учитывают только предельные или допустимые состояния параметров, что не позволяет оценивать дефекты на ранней стадии их развития.

Таким образом, проблема диагностики асинхронных двигателей состоит в необходимости создания универсального, простого метода определения технического состояния электродвигателей. Это позволит до минимума снизить ущерб от повреждений асинхронных двигателей, за счет раннего обнаружения возникающих дефектов [5]. Желательным условием является измерение диагностических параметров функционирующего привода без вывода двигателя из процесса производства и транспортировки его на специализированные стенды [6]. Исключением является диагностика после ремонта машин.

Библиографический список

1. Ширман А.Р., Соловьев А.Б. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования. - Москва, 1996. - 276 с.
2. Послеремонтная оценка технического состояния короткозамкнутых асинхронных электродвигателей / Полковниченко Д.В., к.т.н., Донецкий национальный технический университет.
3. Комплексный метод диагностики асинхронных электродвигателей на основе использования искусственных нейронных сетей / Пономарев В.А., аспирант; Суворов И.Ф., к.т.н., доцент. Читинский государственный университет - Новости электротехники 2(68) 2011.
4. Генкин М.Д., Соколова А.Г. Виброакустическая диагностика машин и механизмов. – М.: Машиностроение, 1987. – 288 с.
5. Голубева А.М. Анализ проблемы диагностики асинхронных двигателей с поврежденным короткозамкнутым ротором, 2007.
6. Жарков В.В. Разработка и исследование методов и средств диагностики электрических машин на основе измерения их полей рассеяния: Дис. к.т.н.: 05.11.01 - Ульяновск, 2003. - 157 с.
7. Акимова Н.А., Котеленец Н.Ф., Сентюрихин Н.И. Монтаж, техническая эксплуатация и ремонт электрического и электромеханического оборудования. – М.: Академия, 2008. – 300 с.

8. Бабурин С.В., Жуковский В.Л., Коржев А.А., Кривенко А.В. Современные методы неразрушающего контроля и диагностики технического состояния электроприводов горных машин. Санкт-Петербургский государственный горный институт им. Г.В. Плеханова.
9. Епифанцев Ю.А., Полищук С.В. Мониторинг и диагностика механических объектов. – Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2009. – 61 с.
10. Хвостиченко С.Б., Якобсон П.П. Диагностика динамического оборудования: внедрение и эффективность. ООО «Ассоциация ВАСТ».
11. Тонких В.Г. Метод диагностики асинхронных электродвигателей в сельском хозяйстве на основе анализа их внешнего магнитного поля. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук.
12. Алексеенко А.Ю., Бродский О.В., Веденев В.Н., Тонких В.Г., Хомутов С.О. Диагностика и прогнозирование состояния асинхронных двигателей на основе использования параметров их внешнего электромагнитного поля. Вестник АлтГТУ им. И.И. Ползунова №2, 2006.
13. Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального анализа потребляемого тока / В. Петухов. - Журнал «Новости Электротехники» №1(31) 2005.
14. Thorsen V., Dalva M. Condition Monitoring Methods, Failure Identification and Analysis for High Voltage Motors in Petrochemical Industry, University of Cambridge, No 444, 97.
15. Randy R.S., Thomas G.H., Farrukh Kamran, Robert G.B. Motor Bearing Damage Detection Using Stator Current Monitoring, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL.31, NO. 6, 1995.
16. William T.T., Mark Fenger Current Signature Analysis to Detect Induction Motor Faults, IEEE Industry Application Magazine, 2001.
17. Kliman G.B., Stein J. Induction Motor Fault Detection Via Passive Current Monitoring, Proc Int Conf (ICEM'90), MIT, Boston, USA, 1990.
18. Передовой спектральный анализ. Pete Bechard. PdMA Corporation. Перевод: Нафтулин И.В.
19. Диагностика электродвигателей. Спектральный анализ модулей векторов Парка тока и напряжения / В. Петухов. - Журнал «Новости Электротехники» №1(50) 2008.
20. Диагностика электродвигателей. Спектральный анализ модулей векторов Парка тока и напряжения / В. Петухов. - Журнал «Новости Электротехники» №1(49) 2008.
21. Купцов В.В., Горзунов А.С., Сарваров А.С. Разработка методики токовой диагностики асинхронных двигателей по осциллограммам нестационарных режимов работы. Вестник Южно-Уральского Государственного Университета №34(167)/2009.
22. IEC 60034-27: Rotating Electrical Machines.
23. Экспертная система контроля технического состояния вращающихся машин / <http://www.diacs.com/ru/article.php>.
24. Русов В.А. Измерение частичных разрядов в изоляции высоковольтного оборудования. – Екатеринбург: УрГУПС, 2011. – 367 с.
25. Исмагилов Ф.Р., Хайруллин И.Х., Пашали Д.Ю., Бойкова О.А. Обзор современных методов и средств оперативной диагностики электромеханических преобразователей энергии. Вестник УГАТУ, Т. 14, № 4 (39). С. 73–79/2010.

Об авторах

Седунин Алексей Михайлович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электрификации и автоматизации горных предприятий Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: eagp@pstu.ru, тел.:+7(342)-298-79-54).

Афанасьев Дмитрий Олегович (Пермь, Россия) – аспирант кафедры электрификации и автоматизации горных предприятий Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: dimok_88@list.ru, тел.:+7-912-486-11-75).