

ОБЗОР МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Л.Г. Сидельников, Д.О. Афанасьев

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

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. 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. Также 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.

CONTROL METHODS REVIEW OF INDUCTION MOTORS TECHNICAL STATE DURING OPERATION

L.G. Sidel'nikov, D.O. Afanas'ev

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

Actual to date, the problem of choosing the strategy and methods of diagnostics of induction motors is covered in the article. Comparative analysis of methods for monitoring the technical state of induction motors on the stages of production, exploitation and repairs is carried. Methods of test and functional diagnostics of induction motors are reviewed. Comparative analysis of methods for maintenance of equipment rotary type is carried. Diagnostic advantages of induction motors on the actual state are identified. Modern systems and methods of diagnostics induction motors are analyzed. The article deals with the main methods of control the technical state of induction motors during operation: vibration analysis of individual elements of motor, analysis of the acoustic vibrations, measurement and analysis of the magnetic flux in the gap of motor, analysis of the external magnetic field, temperature measurement and analysis of individual elements of motor, analysis of electrical parameters and control of isolation of stator winding induction motor. Advantages and shortcomings of the considered methods are revealed. Main types of defects of induction motors, revealed by these control methods of a technical state are listed. Methods of diagnostics of induction motors are analyzed: method of the spectral analysis of a current of a stator of induction motors, method of the analysis of ranges of Park of a current and voltage, control condition of isolation of stator induction motors on level and distribution of partial discharges. The question of choice of necessary set of primary sensors of partial discharges and definition of optimum place of their installation is considered. Also in article the main problems arising at carrying out measurements of partial discharges in induction motors in operation are defined.

Keywords: induction motors, test and functional diagnostics, service methods, methods and diagnostics systems, defect, spectral analysis, stator winding isolation, partial discharges.

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, 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 400 кВт).

Целями работы являются:

- анализ современных методов и средств диагностики технического состояния асинхронных двигателей;

- определение методов, целесообразных при диагностике общепромышленных асинхронных двигателей средней мощности.

Диагностика асинхронных двигателей на этапах производства, эксплуатации и ремонта

Выбор стратегии и методов диагностирования асинхронных двигателей оп-

ределяется 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 неуровненность, 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 происходит изменение параметров двигателей, приводящее к неисправностям и поломкам.

По скорости развития эксплуатационные дефекты делят на две категории: быстро развивающиеся, которые вызывают внезапные отказы, и медленно развивающиеся. К 1-й категории относятся труднопрогнозируемые отказы, которые являются следствием производственных технологических дефектов или разрушения под действием мгновенно возникающей нагрузки, превышающей предел прочности элементов. Ко 2-й 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.

Анализ тестовой и функциональной диагностики асинхронных двигателей

Современные системы и методы диагностики асинхронных двигателей можно разделить на две группы. К 1-й 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, которое оказывает на изоляцию машины пагубное влияние. Это вызывает появле-

ние 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 системы 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. Они 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 необоснованного вмешательства человека [5, 6–9].

Методы диагностики асинхронных двигателей

В настоящее время известны следующие методы диагностики асинхронных двигателей:

- основанные на анализе вибраций отдельных элементов агрегата;
- на анализе акустических колебаний, создаваемых работающей машиной;
- на измерении и анализе магнитного потока в зазоре двигателя и внешнего магнитного поля;
- на измерении и анализе температуры отдельных элементов машины;
- диагностики механических узлов (в частности, подшипников), основанные на анализе содержания железа в масле;
- основанные на анализе электрических параметров машины;
- диагностики состояния изоляции.

Методы вибродиагностики получили наиболее широкое распространение. Суть методов заключается в анализе вибрационных параметров в различных точках электродвигателя. К вибрационным параметрам относятся вибропеременение, 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 гармо-

нических составляющих вибрационного сигнала. Главными недостатками вибродиагностики являются: 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 [7, 10]. Методы акустической эмиссии также недостаточно чувствительны именно к электрическим повреждениям низковольтных двигателей [10].

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.

Автором работы [10] разработаны основные принципы регистрации внешнего магнитного поля двигателей, предложены 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 % [10, 11].

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 непригодны. 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 [7].

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 [7].

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. 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 [12–16].

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 [12, 17].

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 [18, 19]. 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 в приводимом им в действие устройстве [19].

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 электрощите питания и/или управления);

- упрощение процедуры диагностирования: не требуется отключение электродвигателя и/или снятие нагрузки;

- обеспечение возможности полной автоматизации процесса диагностики [18].

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 вентилей. Это также необходимо учитывать [7]. 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 [20].

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 [21, 22]. 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 которых 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.

Одним из наиболее важных вопросов, возникающих 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 80,0 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 час-

тей 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 срезах 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.

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 [22].

Анализ современных диагностических комплексов показал, что для повы-

шения 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 [23].

Выводы:

1. 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 их реализации, относительно низкой стоимостью, высокой производительностью и широкими возможностями для автоматизации диагностирования [23].

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 необоснованного вмешательства человека [5, 6–9].

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

Заключение

Несмотря на большое количество методов диагностики электродвигателей, вопрос продолжает оставаться актуальным по ряду причин. Среди них отсутствие надежных критериев оценки технического состояния, динамики развития дефектов, отсутствие методов прогнозирования остаточного ресурса, недостаточная исследованность отдельных неисправностей двигателей, а также то, что 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 [24]. Исключением является диагностика после ремонта машин.

Список литературы

1. Ширман А.Р., Соловьев А.Б. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования. – М., 1996. – 276 с.
2. Полковниченко Д.В. Послеремонтная оценка технического состояния короткозамкнутых асинхронных электродвигателей / Донец. нац. техн. ун-т. – Донецк, 2005.
3. Пономарев В.А., Суворов И.Ф. Комплексный метод диагностики асинхронных электродвигателей на основе использования искусственных нейронных сетей // Новости электротехники. – 2011. – № 2 (68).
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 // Мехатроника: сб. ст. техн. тематики. – 2007.
6. Акимова Н.А., Котеленец Н.Ф., Сентюрихин Н.И. Монтаж, техническая эксплуатация и ремонт электрического и электромеханического оборудования. – М.: Академия, 2008. – 300 с.
7. Современные методы неразрушающего контроля и диагностики технического состояния электроприводов горных машин / С.В. Бабури, В.Л. Жуковский, А.А. Коржев, А.В. Кривенко; С.-Петербург. гос. горн. ин-т им. Г.В. Плеханова. – СПб., 2009. – 163 с.
8. Елифанцев Ю.А., Полищук С.В. Мониторинг и диагностика механических объектов / Сиб. гос. индустриал. ун-т. – Новокузнецк, 2009. – 61 с.
9. Хвостиченко С.Б., Якобсон П.П. Диагностика динамического оборудования: внедрение и эффективность // Химическая техника. – 2009. – № 1. – С. 32–36.
10. Тонких В.Г. Метод диагностики асинхронных электродвигателей в сельском хозяйстве на основе анализа их внешнего магнитного поля. – Барнаул, 2009. – 181 с.
11. Диагностика и прогнозирование состояния асинхронных двигателей на основе использования параметров их внешнего электромагнитного поля / А.Ю. Алексеенко, О.В. Бродский, В.Н. Веденеев, В.Г. Тонких, С.О. Хомутов // Вестник Алтай. гос. техн. ун-та им. И.И. Ползунова. – 2006. – № 2. – С. 79–83.
12. Петухов В. Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального анализа потребляемого тока // Новости Электротехники. – 2005. – № 1 (31). – С. 23–28.
13. Thorsen V., Dalva M. Condition Monitoring Methods, Failure Identification and Analysis for High Voltage Motors in Petrochemical Industry / University of Cambridge. – 1997. – № 444. – С. 1–13.
14. Motor Bearing Damage Detection Using Stator Current Monitoring / R.S. Randy, G.H. Thomas, F. Kamrah, G.B. Rodert // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1995. – Vol. 31, № 6. – P. 52–59.
15. William T.T., Fenger M. Current Signature Analysis to Detect Induction Motor Faults // IEEE Industry Application Magazine. – 2001. – № 7. – P. 23–29.
16. Kliman G.B., Stein J. Induction Motor Fault Detection Via Passive Current Monitoring // ICEM'90: Proceedings of International Conferences, MIT. – Boston, 1990.
17. Bechard P. Передовой спектральный анализ / PDMA Corporation. – 2009. – 253 с.
18. Петухов В. Диагностика электродвигателей. Спектральный анализ модулей векторов Парка тока и напряжения // Новости электротехники. – 2008. – № 1 (50). – С. 33–37.
19. Петухов В. Диагностика электродвигателей. Спектральный анализ модулей векторов Парка тока и напряжения // Новости электротехники. – 2008. – № 1 (49).
20. Купцов В.В., Горзунов А.С., Сарваров А.С. Разработка методики токовой диагностики асинхронных двигателей по осциллограммам нестационарных режимов работы // Вестник Юж.-Урал. гос. ун-та. – 2009. – № 34 (167). – С. 123–129.
21. Экспертная система контроля технического состояния вращающихся машин [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.diacs.com/ru/article.php>. (дата обращения: 29.11.2012).

22. Русов В.А. Измерение частичных разрядов в изоляции высоковольтного оборудования / Урал. гос. ун-т путей сообщ.-я. – Екатеринбург, 2011. – 367 с.

23. Обзор современных методов и средств оперативной диагностики электромеханических преобразователей энергии / Ф.Р. Исмагилов, И.Х. Хайруллин, Д.Ю. Пашали, О.А. Бойкова // Вестник Урал. гос. авиац. техн. ун-та. – 2010. – Т. 14, № 4 (39). – С. 73–79.

24. Жарков В.В. Разработка и исследование методов и средств диагностики электрических машин на основе измерения их полей рассеяния: дис. ... канд. техн. наук. – Ульяновск, 2003. – 157 с.

References

1. Shirman A.R., Solov'ev A.B. Prakticheskaia vibrodiagnostika i monitoring sostoianii mekhanicheskogo oborudovaniia [Practical vibration diagnostics and monitoring of mechanical equipment]. Moscow, 1996. 276 p.

2. Polkovnichenko D.V. Posleremontnaia otsenka tekhnicheskogo sostoianii korotkozamknytykh asinkhronnykh elektrodvigatelei [Post-maintenance technical evaluation of cage induction motors]. Donetskii natsional'nyi tekhnicheskii universitet, 2005. 256 p.

3. Ponomarev V.A., Suvorov I.F. Kompleksnyi metod diagnostiki asinkhronnykh elektrodvigatelei na osnove ispol'zovaniia iskusstvennykh neironnykh setei [An integrated method for diagnosis of asynchronous motors based on the use of artificial neural networks]. *Novosti elektrotekhniki*, 2011, no. 2 (68).

4. Genkin M.D., Sokolova A.G. Vibroakusticheskai diagnostika mashin i mekhanizmov [Vibration diagnostics of machines and mechanisms]. Moscow: Mashinostroenie, 1987. 288 p.

5. Golubeva A.M. Analiz problemy diagnostiki asinkhronnykh dvigatelei s povrezhdennym korotkozamknutym rotorom. [Analysis of the problem of diagnosis of induction motors with squirrel-cage rotor damaged]. *Mekhatronika*, 2007.

6. Akimova N.A., Kotelnets N.F., Sentiurikhin N.I. Montazh, tekhnicheskaia ekspluatatsiia i remont elektricheskogo i elektromekhanicheskogo oborudovaniia [Installation, maintenance and repair of electrical and electromechanical equipment]. Moscow: Akademiia, 2008. 300 p.

7. Baburin S.V., Zhukovskij V.L., Korzhev A.A., Krivenko A.V. Sovremennye metody nerazrushaiushchego kontrolya i diagnostiki tekhnicheskogo sostoianii elektroprivodov gornyykh mashin [Modern methods of nondestructive testing and diagnostics of technical state of electric mining machinery]. St.-Peterburgskii gosudarstvennyi gornyi institut imeni G.V. Plekhanova, 2009. 163 p.

8. Epifantsev Iu.A., Polishchuk S.V. Monitoring i diagnostika mekhanicheskikh ob'ektov [Monitoring and diagnostics of mechanical objects]. Novokuznetsk: Sibirskii gosudarstvennyi industrial'nyi universitet, 2009. 61 p.

9. Khvostichenko S.B., Iakobson P.P. Diagnostika dinamicheskogo oborudovaniia: vnedrenie i effektivnost' [Diagnosis of dynamic equipment: implementation and effectiveness]. *Khimicheskai tekhnika*, 2009, no. 1, pp. 32–36.

10. Tonkikh V.G. Metod diagnostiki asinkhronnykh elektrodvigatelei v sel'skom khoziaistve na osnove analiza ikh vneshnego magnitnogo polia [Method of asynchronous motors diagnosis in agriculture on the basis of their external magnetic field]. Barnaul, 2009. 181 p.

11. Alekseenko A.Iu., Brodskij O.V., Vedenev V.N., Tonkix V.G., Xomutov S.O. Diagnostika i prognozirovanie sostoianii asinkhronnykh dvigatelei na osnove ispol'zovaniia parametrov ikh vneshnego elektromagnitnogo polia [Diagnosis and forecasting the state of asynchronous motors based on the parameters of their use of an external electromagnetic field]. *Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni I.I. Polzunova*, 2006, no. 2, pp. 79–83.

12. Petukhov V. Diagnostika sostoianii elektrodvigatelei. Metod spektral'nogo analiza potrebliaemogo toka [Diagnostics of motors condition. Spectral analysis of current consumption]. *Novosti Elektrotekhniki*, 2005, no. 1 (31), pp. 23–28.

13. Thorsen V., Dalva M. Condition Monitoring Methods, Failure Identification and Analysis for High Voltage Motors in Petrochemical Industry. University of Cambridge, 1997, no. 444, pp. 1–13.

14. Randy R.S., Thomas G.H., Kamrah F., Rodert G.B. Motor Bearing Damage Detection Using Stator Current Monitoring. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1995, vol. 31, no. 6, pp. 52–59.

15. William T.T., Fenger M. Current Signature Analysis to Detect Induction Motor Faults. *IEEE Industry Application Magazine*, 2001, no. 7, pp. 23–29.

16. Kliman G.B., Stein J. Induction Motor Fault Detection Via Passive Current Monitoring. *Proceedings of International Conferences "ICEM'90"*, Boston, 1990.

17. Bechard P. Peredovoi spektral'nyi analiz [Advanced spectral analysis]. PdMA Corporation, 2009. 253 p.

18. Petukhov V. Diagnostika elektrodvigatelei. Spektral'nyi analiz modulei vektorov Parka toka i napriazheniia [Diagnosis of electrical motors. Spectral analysis of the magnitude of the Park current and voltage]. *Novosti elektrotehniki*, 2008, no 1 (50), pp. 33–37.

19. Petukhov V. Diagnostika elektrodvigatelei. Spektral'nyi analiz modulei vektorov Parka toka i napriazheniia [Diagnosis of electrical motors. Spectral analysis of the magnitude of the Park current and voltage]. *Novosti elektrotehniki*, 2008, no 1 (49).

20. Kuptsov V.V., Gorzunov A.S., Sarvarov A.S. Razrabotka metodiki tokovoi diagnostiki asinkhronnykh dvigatelei po ostsillogrammam nestatsionarnykh rezhimov raboty [Development of methodology for current diagnosis of induction motors from oscillograms unsteady of operating modes]. *Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta*, 2009, no. 34 (167), pp.123–129.

21. Ekspertnaia sistema kontrolya tekhnicheskogo sostoiianiia vrashchaisushchikhsia mashin [The expert system technical condition monitoring of rotating machinery], available at: <http://www.diacs.com/ru/article.php> (accessed 29 November 2012).

22. Rusov V.A. Izmerenie chastichnykh razriadov v izoliatsii vysokovol'tnogo oborudovaniia [Measurement of partial discharges in the insulation of high voltage equipment]. Ekaterinburg: Ural'skii gosudarstvennyi universitet putei soobshcheniia, 2011. 367 p.

23. Ismagilov F.R., Xajrullin I.X., Pashali D.Yu., Bojkova O.A. Obzor sovremennykh metodov i sredstv operativnoi diagnostiki elektromekhanicheskikh preobrazovatelei energii [The review of modern methods and means of operational diagnosis of electromechanical energy converters]. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta*, 2010, vol. 14, no. 4 (39), pp. 73–79.

24. Zharkov V.V. Razrabotka i issledovanie metodov i sredstv diagnostiki elektricheskikh mashin na osnove izmereniia ikh polei rasseianiia. [Development and research of methods and diagnostics of electrical machines based on the measurement of their stray fields], abstract thesis of the candidate of technical sciences. Ul'ianovsk, 2003. 157 p.

Об авторах

Сидельников Леонид Григорьевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры электрификации и автоматизации горных предприятий Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: eagr@pstu.ru).

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).

About the authors

Sidel'nikov Leonid Grigor'evich (Perm, Russia) – Ph.D. in technical sciences, associate professor of the electrification and automation of mining companies department of Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolskiy ave., 29; e-mail: eagr@pstu.ru).

Afanas'ev Dmitrii Olegovich (Perm, Russia) – doctoral student of the electrification and automation of mining companies department of Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolskiy ave., 29; e-mail: dimok_88@list.ru).

Получено 15.06.2013