

Современные методы мониторинга и технического диагностирования электрических машин

Завидей В.И.¹, Путилова И.В.², Старшинов В.А.²
¹ВНИИТФ-ВЭИ, Москва, Россия, ²ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», Москва, Россия
zavideyvi@mail.ru

Аннотация

В статье приведен анализ и выбор подходов к построению системы мониторинга и оценки технического состояния мощных электрических машин, основанных на многопараметрических методах и методе Парка. Приведены практические примеры применения многопараметрических средств на асинхронных двигателях и трансформаторах с использованием модифицированного тепловизионного метода для повышения распознаваемости дефектов. Отмечена роль подготовки и обучения персонала энергетических предприятий в освоении новых методов в области контроля состояния электротехнического оборудования.

Материалы и методы

Решение проблемы обнаружения и повышения вероятности распознавания дефектов на асинхронных двигателях достигается за счет применения двухстадийности процесса мониторинга, при котором на работающем двигателе проводится контроль напряжения и токов, обработка данных методом Парка с использованием тепловизионного метода контроля состояния оборудования. На второй стадии (на отключенном двигателе) при наличии признаков

дефекта проводится многопараметрический контроль обмоток статора и ротора по известной методологии.

Ключевые слова

асинхронные двигатели, статор, ротор, мониторинг, многопараметрические методы контроля, метод анализа векторов Парка, термографический метод, виброконтроль

Для цитирования

Завидей В.И., Путилова И.В., Старшинов В.А. Современные методы мониторинга и технического диагностирования электрических машин // Экспозиция Нефть Газ. 2023. № 4. С. 38–44. DOI: 10.24412/2076-6785-2023-4-38-44

Поступила в редакцию: 19.05.2023

ELECTRICAL ENGINEERING

UDC 621.3 | Original Paper

Modern methods of monitoring and technical diagnostics of electrical machines

Zavidey V.I.¹, Putilova I.V.², Starshinov V.A.²
¹VNIITF-VEI, Moscow, Russia, ²Moscow power engineering institute, Moscow, Russia
zavideyvi@mail.ru

Abstract

The article provides an analysis and selection of approaches to the construction of a system for monitoring and assessing the technical condition of powerful electric machines based on multiparameter methods and the Park method. Practical examples of the use of multiparameter tools on induction motors and transformers using a modified thermal imaging method to increase the recognition of defects are given. The role of training and education of personnel of energy enterprises in the development of new methods in the field of monitoring the state of electrical equipment is noted.

Materials and methods

The solution of the problem of detecting and increasing the probability of recognizing defects on induction motors is achieved through the use of a two-stage monitoring process, in which voltage and currents are monitored on a running engine, data processing by the Park method using a thermal imaging method for monitoring the condition of equipment. At the second stage (on a disconnected motor), if there

are signs of a defect, a multiparameter control of the stator and rotor windings is carried out according to a known methodology.

Keywords

asynchronous motors, stator, rotor, monitoring, multiparameter control methods, Park vector analysis method, thermographic method, vibration control

For citation

Zavidey V.I., Putilova I.V., Starshinov V.A. Modern methods of monitoring and technical diagnostics of electrical machines. Exposition Oil Gas, 2023, issue 4, P. 38–44. (In Russ). DOI: 10.24412/2076-6785-2023-4-38-44

Received: 19.05.2023

Введение

Актуальность статьи связана с острой необходимостью в теоретическом обосновании и практической разработке селективных методов диагностирования сложных внутренних повреждений мощных высоковольтных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, являющихся одним из главных элементов ответственных механизмов всех технологических процессов в топливно-энергетическом комплексе (ТЭК) и других отраслях промышленности. Как правило, спецификой работы высоковольтных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором в ТЭК, нефтегазовом секторе на стадии добычи, переработки и транспортировании ресурсов являются тяжелые условия пуска питательных насосов, мельниц, дробилок, дымососов, дутьевых вентиляторов и другого вспомогательного оборудования.

Отказы асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором на тепловых электростанциях могут приводить к снижению уровня выработки электроэнергии или отключению энергоблока. При этом, несмотря на тяжелые и порой необратимые последствия от подобного повреждения, обусловленного возникновением дефектов в короткозамкнутой обмотке ротора асинхронных двигателей, защит от данного повреждения не существует, и выявляется оно только в период капитального ремонта. Обрыв стержня ротора вызывает несимметрию роторных цепей, на начальной стадии носит скрытый характер и является причиной развития более опасных аварийных режимов. Отсутствие апробированных технических средств диагностики данного вида повреждения прежде всего связано с недоработкой математического описания процессов в асинхронных двигателях с короткозамкнутым ротором при возникновении дефектов в обмотке ротора.

Объектом анализа являются системы контроля наиболее распространенных высоковольтных асинхронных электродвигателей переменного тока с короткозамкнутым ротором.

Цели статьи: проведение сопоставительного анализа существующих методов, средств мониторинга и систем контроля асинхронных машин, адекватно отображающих

физические процессы при возникновении повреждений в элементах конструкции, а также в обмотке статора и ротора; анализ и выбор подходов к построению системы мониторинга и оценки технического состояния мощных электрических машин.

Для достижения поставленных целей применялся анализ теоретических и практических методов исследования. К ним можно отнести как теорию электрических машин и применение численных методов, так и практическое применение методов исследования на действующем оборудовании.

Системы мониторинга и технического диагностирования электрических машин и аппаратов

Асинхронные электрические двигатели широко применяются во многих отраслях экономики. Синхронными и асинхронными электроприводами потребляется более половины электроэнергии, производимой в мире. Мощными электродвигателями оснащены главные циркуляционные насосы ТЭС и АЭС, прокатные станы и др. От надежности их функционирования зависит безопасность работы энергетических установок и других систем. В этой связи решение проблемы мониторинга и технической диагностики электродвигателей является актуальной задачей.

В настоящее время поддержание эксплуатационной надежности электрических машин осуществляется методами диагностики в отключенном состоянии. Тестовое диагностирование — основной вид выявления дефектов электрооборудования в отечественной энергетике. Оно определило сложившуюся структуру технического обслуживания и ремонта по регламенту. Несмотря на то, что технические решения по созданию систем мониторинга электрических машин существуют, на сегодня эффективность их практического применения доказана частично [1, 2].

В создании систем мониторинга сформировалось два основных направления. Одно из них связано с прямым получением как можно более подробной информации о состоянии параметров важных подсистем электрической машины (рис. 1).

В данной системе мониторинга предлагается проводить контроль тока статорной

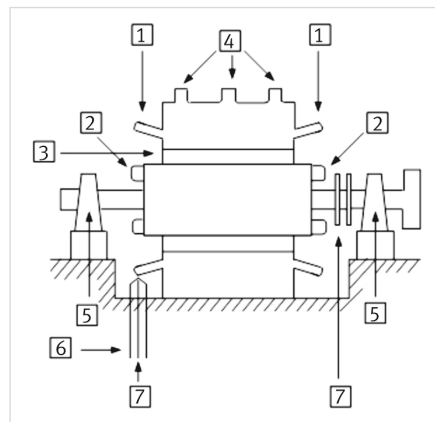


Рис. 1. Обобщенная схема системы мониторинга: 1 — контроль частичных разрядов в обмотке статора; 2 — контроль изоляции и наличия КЗ в обмотке статора; 3 — контроль воздушного зазора между ротором и статором; 4 — контроль вибрации магнитопровода статора; 5 — контроль вибрации подшипников ротора; 6 — контроль асимметрии машины по спектрам тока и мощности; 7 — мониторинг технологических параметров машин

Fig. 1. Generalized scheme of the monitoring system: 1 — control of partial discharges in the stator winding; 2 — control of insulation and the presence of short circuit in the stator winding; 3 — control of the air gap between the rotor and the stator; 4 — control of the vibration of the stator magnetic circuit; 5 — vibration control of rotor bearings; 6 — control of the asymmetry of the machine by the spectra of current and power; 7 — monitoring of technological parameters of machines

обмотки и его последующий спектральный анализ, а также контроль уровня вибрации и температуры корпуса и подшипников. Кроме того, внутренними датчиками, установленными в статор, проводится контроль асимметрии положения ротора. Контроль состояния изоляции производится по частичным разрядам, а температурный режим активной стали

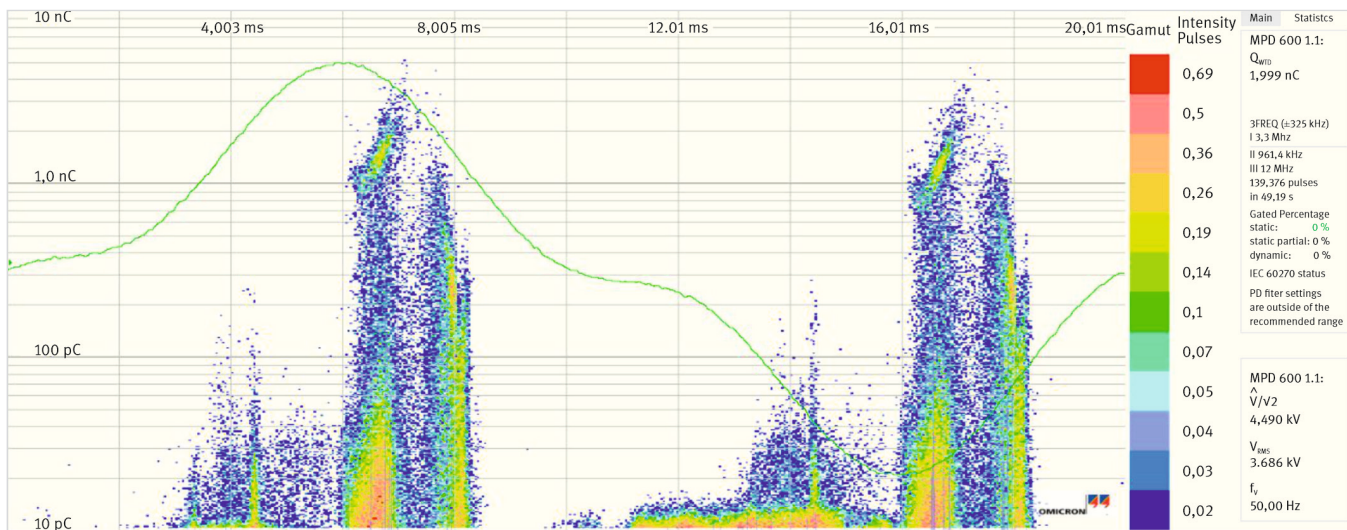


Рис. 2. Панорама разрядных явлений, зафиксированная системой контроля частичных разрядов MPD-600 при высоковольтных испытаниях нового асинхронного электродвигателя типа А-310 с заторможенным ротором при номинальном напряжении от сети в пределах периода рабочего напряжения

Fig. 2. Panorama of discharge phenomena recorded by the MPD-600 partial discharge monitoring system during highvoltage tests of a new A-310 type asynchronous electric motor with a locked rotor at rated mains voltage within the operating voltage period

и обмоток — с помощью термодатчиков, установленных в статорной обмотке. В последнее время на мощных турбогенераторах систему мониторинга дополняют температурными датчиками, установленными на сливных коллекторах охлаждения обмоток статора. Есть примеры установки датчиков вибраций на выводных и соединительных шинах статорной обмотки.

Достаточно очевидно, что такой подход требует установки многочисленных датчиков, а при их значительном количестве возрастает вероятность их выхода из строя и снижения надежности контроля. В системе REMM предложена установка более 30 чувствительных элементов в конструкцию двигателя, и это не предел, поэтому подобные технические решения можно рассматривать только на стадии проектирования двигателя. Из-за громоздкости, сложности систем подобного типа их применение целесообразно на мощных турбо- и гидрогенераторах. Включение в систему мониторинга подсистемы контроля частичных разрядов не всегда представляется рациональным из-за слабой помехоустойчивости этих подсистем, особенно в условиях повышенного электромагнитного фона. На рисунке 2 показана панорама разрядных явлений, зафиксированная при высоковольтных испытаниях нового асинхронного двигателя ГЦН с рабочим напряжением 6,3 кВ.

Фиксируемый уровень частичных разрядов в изоляции статорной обмотки достигал практически предельного значения порядка 8пС при линейном напряжении 4,5 кВ. Подобный результат был обусловлен проникновением сетевой помехи в канал контроля частичных разрядов. По этой причине введение в систему мониторинга канала контроля уровня частичных разрядов, по убеждению авторов, может рассматриваться исключительно в качестве дополнительного информационного канала. Системы мониторинга подобного типа в единичном и усеченном исполнении нашли применение на мощных турбо- и гидрогенераторах.

Другое направление в области создания систем мониторинга основано на предположении, что информация о состоянии всех подсистем электрической машины заложена в токе его статорной обмотки. Метод нашел свое отражение в ГОСТ ISO 20958-2015 [3] и известен под названием сигнатурного анализа электрических сигналов потребляемого тока, напряжения питания и мощности электродвигателя. Статорная обмотка работающего двигателя является неким универсальным «датчиком» состояния цепей питания машины и других ее подсистем, в том числе и информационных. Информационными сигналами служат питающее напряжение и потребляемые токи, которые модулируются самим двигателем в работе под нагрузкой и формируют выходной сигнал в виде спектра гармоник тока статора. Нарушения в работе двигателя могут быть обнаружены по составляющим гармоникам потребляемого тока. Речь идет не только о нарушениях в электрической части обмоток, но и о механических неисправностях, которые вызывают характерные спектральные изменения в потребляемом токе.

Методом спектрального анализа потребляемого электродвигателем тока, а также методу анализа векторов Парка тока статорных обмоток посвящены работы ряда отечественных и зарубежных авторов [5–9]. Согласно доступным данным, сигнатурный анализ позволяет выявлять в работающем электродвигателе ряд серьезных дефектов и неисправностей.

Для выявления развивающихся дефектов роторных машин заводом «ВИБРАТОР» освоен выпуск системы диагностики роторных машин (СДРМ) [4]. В системе использована методика, в основу которой положена математическая модель, описывающая идеальную роторную машину и систему, в которой она работает. Как и в реальной роторной машине, в математической модели входными величинами являются напряжения, а выходными — токи. В процессе моделирования сравниваются измеренный и рассчитанный спектры

тока. По их разнице делается вывод о степени дефекта. Чем больше различие при сравнении параметров, тем более отчетливо проявляется дефект. Более подробная информация о дефектах может быть получена при анализе дополнительных параметров. Механические дефекты выявляются по изменению параметров математической модели. Таким образом, данная технология чувствительна не только к электрическим дефектам, но также и к механическим. По сведениям производителя, система СДРМ предназначена для:

- анализа электрических и механических параметров роторной машины;
- обнаружения и отслеживания развития различных дефектов.

В процессе работы СДРМ измеренные параметры двигателя сравниваются с параметрами опорной модели, полученными в ходе обучения математической модели устройства. Если параметры значительно отличаются друг от друга, то система указывает на наличие в ней неисправностей или дефектов. Чем выше это отличие, чем больше оно продолжается и чем больше отличающихся контролируемых параметров, тем выше степень и серьезность развития дефекта. Согласно заявленным возможностям, СДРМ обнаруживает:

- ослабленное крепление опор;
- разбалансировку ротора;
- нарушение сцепления двигателя с приводными механизмами;
- дефекты подшипников;
- дефекты элементов трансмиссии/приводного оборудования;
- дефекты ротора и обмотки статора;
- дефекты контактных соединений.

Параметры, измеряемые и рассчитываемые системой:

- фазное напряжение;
- потребляемый ток;
- активная мощность.

К основным электрическим и механическим параметрам, при превышении которых принимается решение об отключении электрической машины, относят:

Табл. 1. Частотные диапазоны параметров электродвигателя
Tab. 1. Frequency ranges of the electric motor parameters

Параметр, ρ	Минимум частоты, Гц	Максимум частоты, Гц
M1 — состояние контактов	0,00	8,54
M2 — несоосность соединений	8,54	26,86
M3 — частота питающей сети	26,86	43,95
M4 — балансировка ротора	43,95	57,37
M5 — балансировка нагрузки	57,37	70,80
M6 — обмотка статора	70,80	96,44
M7 — подшипники двигателя	96,44	108,64
M8 — 3-я гармоника	108,64	141,60
M9 — подшипники нагрузки	141,60	158,69
M10 — 4-я гармоника	158,69	168,46
M11 — крепление двигателя	168,46	191,65
M12 — 6-я гармоника	191,65	499,27

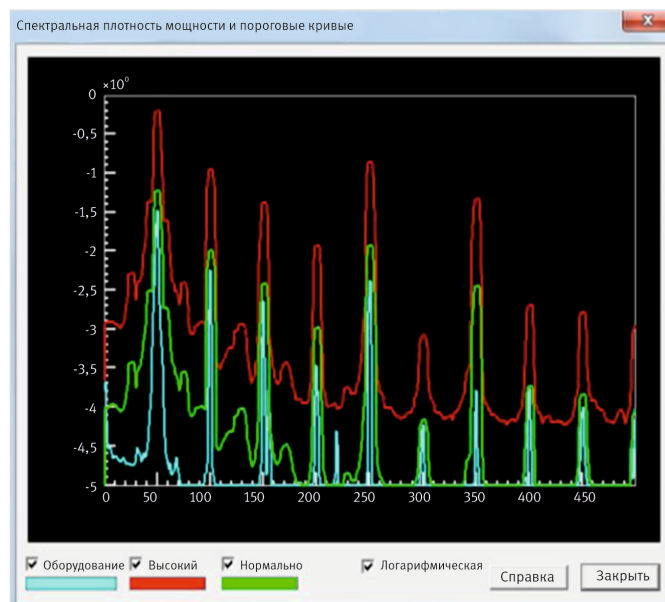


Рис. 3. Огибающие частотного спектра плотности мощности двигателя по результатам мониторинга. Огибающая спектра, обозначенная красным цветом, — предельно допустимый уровень
Fig. 3. Envelopes of the frequency spectrum of the engine power density based on the results of monitoring. The envelope of the spectrum, marked in red — the maximum allowable level

- работу с повышенной нагрузкой, снижение КПД и перегрев двигателя;
- повышенный пусковой ток;
- вибрации;
- повышенный уровень температуры узлов двигателя.

В техническом описании системы приведен перечень возможных дефектов, обнаруживаемых системой, но отсутствуют сведения, каким образом они соотносятся с наблюдаемым спектром мощности гармоник. Отклонения этих параметров выше уровня огибающей спектра мощности рассматриваются как наличие повреждения. Каждой полосе частот приписаны функциональные элементы электрической машины (табл. 1).

Достаточно очевидно, что при наличии скольжения вала положение гармоник изменяется по частоте, что требует расширения полосы окна анализа, и тогда чувствительность к распознаванию дефектов снижается. Различные по природе механические и электрические дефекты могут генерировать близкие гармоники, что не позволяет отделить их друг от друга. К таким причинам можно отнести:

- качество питающего напряжения (дисбаланс напряжения между фазами или недопустимый уровень высокочастотных гармоник);
- дефекты литья вала и ротора;
- дефекты обмоток и систем возбуждения;
- повреждение или обрыв статорных обмоток и стержней ротора;
- дефекты подшипников;
- эксцентриситет ротора;
- неправильную установку и перекося торцевых крышек электродвигателя;
- нарушение центровки между электродвигателем и ведомым агрегатом;
- изменение жесткости креплений электродвигателя к фундаменту.

В сегодняшней отечественной практике работы, посвященные вопросам контроля состояния, мониторинга и диагностики двигателей методом спектрального анализа потребляемого тока, практически отсутствуют.

Все изменения электрических параметров обмоток и изоляции ведут к увеличению потерь, повышению температуры. Достаточно очевидно, что различные причины могут приводить к интегральным изменениям спектральных параметров. Проблемным звеном в успешном применении систем является интерпретация полученных данных. Отсутствие таких наработок и является основным препятствием внедрения систем мониторинга и диагностики в практику.

Проведенные эксперименты, направленные на идентификацию дефекта короткого замыкания статорной обмотки синхронного двигателя, показали следующее:

- амплитуды спектра тока на боковых частотах любой нечетной гармоники имеют различные значения и между собой могут отличаться на порядок и более;
- амплитуды спектра боковых частот уменьшаются с ростом частоты нечетной гармоники;
- величина амплитуд боковых спектральных составляющих диагностических частот увеличивается примерно пропорционально степени короткого замыкания. При этом чем большее число витков обмотки подвергается короткому замыканию, тем на более ранней стадии развития обнаруживается дефект.

Определение спектральных составляющих тока от ослабления крепления или обрывов стержней ротора показало, что:

- амплитуды спектра тока на боковых частотах первой гармоники имеют существенные изменения от обрыва стержней ротора, а на боковых частотах гармоник большего порядка быстро уменьшаются;
- величина амплитуд боковых спектральных составляющих диагностических частот возрастает с увеличением числа оборванных стержней ротора, но закономерности их изменения выявить не удалось;
- при малых нагрузках на валу, когда коэффициент скольжения ротора стремится к нулю, дефекты обрыва обмотки ротора не определяются.

При определении составляющих спектра тока от износа подшипников обнаружено следующее:

- дефекты дорожек колец и тел качения в виде отдельных сколов, раковин, вмятин методом спектрального анализа спектра тока идентифицируются слабо;
- дефекты износа тел качения, если они приводят к увеличению люфта подшипника, хорошо идентифицируются методом спектрального анализа спектра тока на диагностических частотах;
- амплитуда составляющих спектра тока воздушного зазора или эксцентриситета идентифицируется в диапазоне частот от 200 до 1 500 Гц, их значения в каждом поддиапазоне могут отличаться на несколько порядков. Идентификацию наличия и развития дефекта эксцентриситета наиболее целесообразно проводить на поддиапазонах в пределах от 500 до 1 200 Гц, где изменение амплитуд наибольшее по величине и интенсивности;
- при оценке степени развития эксцентриситета, как динамического, так и статического, следует учитывать возможность влияния на него других дефектов: короткозамкнутых витков статора, обрывов стержней ротора, несоосности валов и качества питания электродвигателя;
- при расчете значений диагностических частот эксцентриситета требуется более высокая точность в определении величины скольжения ротора, поскольку ошибки в ее оценке влияют на чувствительность обнаружения эксцентриситета.

Спектральные составляющие тока от несоосности валов, ослабления крепления станины, колебаний ротора показывают, что идентифицировать дефект подобных вибраций не представляется возможным. Дефект автоколебаний ротора в подшипниках является частным случаем общего износа подшипника (люфта) с той же оценкой величины амплитуд спектральных составляющих тока.

Проведенные экспериментальные исследования асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором указывают на принципиальную возможность оценки ряда дефектов или неисправностей и позволяют оценить их пороговые значения обнаружения. Однако в части интерпретации данных спектрального анализа энергетического спектра по току статора еще предстоит немалая работа. В качестве иллюстрации на рисунке 3 приведен вид экрана монитора, по которому принимается решение о выводе двигателя из работы.

Определение дефектов, как правило, возлагается на следующее техническое диагностирование двигателя в отключенном состоянии и применение так называемых дополнительных — «многопараметрических»

методов контроля [6, 10]. Наиболее эффективными с точки зрения полноты данных представляются подходы, связанные с одновременным получением возможно более полной информации о наличии дефектов на отключенном двигателе и в работе. Корреляция статических и динамических данных испытаний дает возможность оценить реальное техническое состояние двигателя и дать надежный прогноз его работоспособности. Среди систем подобного назначения, в которых реализованы эти возможности, можно выделить анализатор цепей двигателей (МСЕ) и систему динамического анализа (DMA), производимых корпорацией PdMA.

Особенности предлагаемой методологии построения системы мониторинга и технической диагностики апробированы авторами статьи как на синхронных и асинхронных электродвигателях, так и силовых трансформаторах. Методология состоит в построении двухуровневой системы мониторинга, которая оптимально сочетает упреждающие действия персонала до возникновения повреждения оборудования и в случае обнаружения конкретных неисправностей.

1-й уровень в данной системе — контроль параметров двигателя в работе и получение предварительных данных. Производится контроль параметров токов и напряжений в работе двигателя. При этом определяются следующие показатели:

- спектральный состав питающего напряжения, тока и мощности, уровень нелинейных искажений, мгновенная нагрузка;
- температурный режим корпуса статора, подшипников и привода.

На основании этих измерений делаются выводы:

- о качестве питающего напряжения;
- о наличии и уровне нечетных боковых гармоник, связанных с дефектами обмоток статора и ротора.

До отключения двигателя проводится вибрационный и тепловой контроль состояния корпусных, подшипниковых и приводных элементов. Тепловой контроль подсистем проводится тепловизионным методом. При наличии превышений пороговых уровней спектральных, температурных и вибрационных параметров контроля электродвигатель выводится из работы.

2-й уровень. Контроль параметров на отключенном оборудовании для сопоставимости результатов измерений производится в автоматическом режиме по всем фазам и параметрам. Контроль выполняется по параметрам, значения которых строго регламентированы предельными уровнями. Данные контроля по всем фазам выводятся на монитор. Сопоставление параметров производится между фазами или тождественным параметрам объекта сравнения. Оперативный анализ полученных данных позволяет с вероятностью 90–95 % определить характер дефекта, степень опасности, а также его развитие и место расположения.

В качестве примера ниже представлены данные контроля асинхронного электродвигателя масляного насоса турбины 4AM-225M-4Y2 55 кВт, 0,4 кВ зав. № 12451. Контроль параметров проводился удаленно из помещения КРУ в автоматическом режиме по фазам без отключения кабеля (рис. 4). Длина кабеля электропитания — 75 м. При включении двигателя срабатывала система мониторинга в виде защиты. Причина неисправности определялась по шести параметрам.

Выводы о наличии дефекта в виде замыкания витков статорной обмотки принимались по различию фазовых сдвигов и частотному параметру (табл. 2). Процедура контроля параметров и оценки технического состояния двигателя не превышала 7 минут. При этом одновременно было обнаружено и ухудшение состояния изоляции подводящего кабеля электропитания.

В качестве сравнения в таблице 3 приведены параметры исправного асинхронного двигателя 4АОВ-400-4У3 Р = 500 кВт, U = 6,3 кВ конденсатного насоса турбины при дистанционном контроле из помещения КРУ 6–12Б. Длина кабеля питания ~ 70 м.

Одним из несомненных достоинств подобной двухуровневой системы мониторинга и определения технического состояния, а также и конкретных неисправностей электродвигателей является наличие четких критериев параметров контроля. Одни из них следуют из существующей нормативной документации («Объемы и нормы испытаний оборудования»). Другие, такие как фазовый и частотный критерии браковки, еще не нашли своего отражения в нормативной документации, но с учетом высокой информативности их, по-видимому, следует вводить на отраслевом уровне. К подобным параметрам можно отнести индекс поляризации и значения тангенса потерь, определенные методами низкочастотной диэлектрической спектроскопии и усовершенствованным тепловизионным методом контроля [6, 10], позволяющими судить о возникновении в электродвигателе повреждений, росте тепловых потерь и ускоренном старении изоляции с последующим повреждением.

В последнее время появилась информация о теоретических работах по созданию системы мониторинга асинхронных электрических двигателей, в которой использован подход, основанный на анализе расширенного вектора Парка тока статора [11, 12]. Детальный анализ параметров контроля и соответствующий алгоритм обработки измеряемых сигналов позволяют обнаруживать распространенные повреждения электродвигателя.

Анализ данных измерений питающего напряжения и тока совместно с алгоритмом обработки векторов Парка и его спектрального анализа потенциально позволяет оценить состояние источника электропитания и основные его характеристики — дисбаланс напряжений между фазами, неисправность частотно-регулируемого привода, уровень гармонических искажений, асимметрию в цепи статора из-за коротких замыканий и естественного старения обмоток,



Рис. 4. Дистанционный контроль асинхронного двигателя из помещения КРУ
Fig. 4. Remote control of an asynchronous motor from the switchgear room

Табл. 2. Значения контролируемых электрических параметров электродвигателя 4АМ-225М-4У2 55 кВт

Tab. 2. Values of controlled electrical parameters of the electric motor 4AM-225M-4U2 55 kW

Параметры	Данные контроля		
	А-В	А-С	В-С
Фазы			
Сопrotивление активное, R ₀ , Ом	0,186	0,189	0,183
Комплексное сопротивление, Z, Ом	23	25	24
Фазовый сдвиг, φ, град	73°	71°	65°
Индуктивность, L, мГн	4	5	4
Отношение Ток /частота, I/F, %	-44	-42	-50
Сопrotивление изоляции, R _i , Мом	31	31	31

Заключение: (витковое замыкание и ухудшение изоляции на землю).
Дефект статорной обмотки

Табл. 3. Асинхронный двигатель 4АОВ-400-4У3 Р=500 кВт

Tab. 3. Asynchronous motor 4AOV-400-4U3 R=500 kW

Наименование параметров	Значения параметров		
	А-В	А-С	В-С
Фазы			
Сопrotивление, R, Ом	1,35	1,36	1,36
Комплексное сопротивление, Z, Ом	218	219	220
Фазовый сдвиг, φ, град	83°	84°	83°
Индуктивность, L, мГн	14	14	14
Отношение Ток /частота, I/F, %	-44	-43	-43
Сопrotивление изоляции, R _i , Мом	≥99	≥99	≥99

Заключение: все параметры находятся в пределах нормы.
Двигатель в исправном состоянии.

асимметрию в цепи ротора из-за замкнутых или сломанных стержней, эксцентриситет ротора из-за изгиба вала, несоосность оси двигателя и нагрузки, ослабление фундамента, наличие незакрепленных или разорванных болтовых соединений, наличие механических проблем в системе приводов. Вместе с тем к настоящему времени отсутствует обоснованная методология интерпретации спектральных параметров вектора Парка и их связь с различными видами дефектов. Последнее требует применения дополнительных методов контроля, что повышает вероятность обнаружения неисправности при наличии неопределенности в интерпретации

спектров вектора Парка в электродвигателе, что иллюстрируется применением тепловизионного контроля (рис. 5).

Авторы статьи считают, что при дополнении данного метода усовершенствованным дистанционным методом тепловизионного мониторинга для контроля элементов двигателя в работе и системой многопараметрического анализа обмоток в отключенном состоянии создаются предпосылки перехода к технологии обслуживания электрических машин по техническому состоянию, актуальной для отечественной энергетики и других отраслей промышленности.

На данный момент достоверность диагностики обслуживания описанным методом превышает 97 %. К показателям эффективности данной методологии можно отнести:

- снижение традиционных затрат на техническое обслуживание на 25 %;
- сокращение незапланированных простоев на 70 %;
- сокращение энергетических потерь на 15 %.

Для широкого применения рассматриваемого подхода необходимо постоянно совершенствовать квалификацию персонала энергетических предприятий и производств в профильных энергетических вузах, например, в НИУ «МЭИ».

О необходимости квалификации персонала энергетических компаний

В современном мире для эффективной работы на энергетических предприятиях

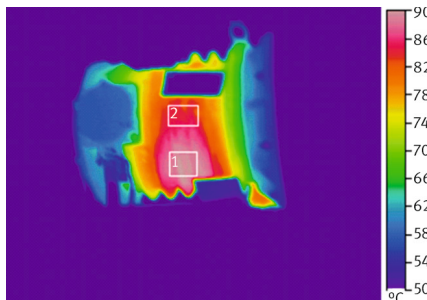


Рис. 5. Нагрев корпуса статора электродвигателя, вызванный замыканием витков обмотки
Fig. 5. Heating of the stator housing of the electric motor, caused by the closure of the winding turns

и производствах требуются высококвалифицированные специалисты, имеющие профильное энергетическое образование, регулярно повышающие квалификацию в области энергетики и обладающие всем спектром необходимых знаний и навыков. Кроме технической грамотности и соответствующей квалификации специалисты должны быстро ориентироваться в потоке поступающей информации, уметь решать разного рода производственные задачи в постоянно изменяющихся условиях. Постоянное совершенствование квалификации персонала является необходимым условием внедрения наилучших доступных технологий в энергетику страны, а также новой техники, подходов и методов.

Именно с этой целью в 1997 году в НИУ «МЭИ» был создан Центр повышения квалификации и переподготовки специалистов «Экология энергетики» (ныне Научно-образовательный центр «Экология энергетики»), сотрудниками которого разработано и реализовано большое количество программ повышения квалификации и профессиональной переподготовки по направлениям «Теплоэнергетика и теплотехника» и «Электроэнергетика и электротехника».

Основными направлениями учебной деятельности Центра являются повышение квалификации ИТР по различным программам дополнительного профессионального образования в области энергетики; профессиональная переподготовка ИТР по программам «Тепловые электрические станции», «Электрические станции» и «Электроэнергетические системы и сети». В рамках учебных программ слушатели среди прочего осваивают такие дисциплины, как надежность работы оборудования ТЭС, где изучают методы и подходы, используемые в тепловизионной диагностике, вопросы эксплуатации, диагностики и ремонта электрического оборудования ТЭС и др. Повысить эффективность обучения помогают используемые в Центре современные информационно-коммуникационные технологии, в т.ч. технологии виртуальной реальности для визуализации элементов энергетического оборудования, а также практикоориентированный подход к обучению слушателей с введением большого количества практических и лабораторных работ. Без постоянного совершенствования навыков и знаний персонала энергетических предприятий в такой стратегически важной отрасли, как энергетика, невозможно внедрять наилучшие технические решения, в том числе и по продлению срока эксплуатации

энергетического оборудования, установленного на ТЭС и промышленных предприятиях.

Итоги

Проведен анализ основных концепций существующих технических решений по созданию систем мониторинга и оценки технического состояния мощных электрических машин, отмечены их достоинства и недостатки. Показано, что системы мониторинга и диагностики, основанные на анализе токов статора, в настоящее время решают поставленную задачу частично из-за отсутствия обоснованной методологии интерпретации спектральных параметров контроля расширенного вектора Парка.

Выводы

- Отмечено, что применение систем мониторинга, основанное на широком охвате параметров контроля, следует принимать во внимание уже на стадии проектирования и изготовления электрических машин. В систему мониторинга следует включать необходимое количество важных и надежно контролируемых параметров, обеспечивающих защиту электрической машины от серьезных повреждений. Из-за слабой помехоустойчивости в систему мониторинга нерационально включать измерения частичных разрядов.
- Основным препятствием при внедрении существующих систем мониторинга являются интерпретация полученных данных и отсутствие статистических данных по отказам.
- Оперативное обнаружение возникших дефектов после отключения электрической машины следует возлагать на многопараметрическую систему контроля, которую можно рассматривать как более высокий уровень системы мониторинга и технической диагностики.
- Применение комплексных систем диагностики электродвигателей позволяет реализовать технологию обслуживания оборудования по фактическому состоянию, актуальную для отечественной энергетики.

Литература

1. Афанасьев Д.О., Сидельников Л.Г., Седунин А.М. Методы и проблемы вибродиагностики асинхронных двигателей. Пермь: Пермский государственный технический университет, ООО «ТестСервис», 2013. 20 с.
2. Барков А.В., Баркова Н.А., Азовцев А.Ю.

Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации. СПб.: СПбГМТУ, 2000. 169 с.

3. ГОСТ ISO 20958-2015. Контроль состояния и диагностика машин. Сигнатурный анализ электрических сигналов трехфазного асинхронного двигателя. М.: Стандартинформ, 2016.
4. Система диагностики роторных машин (СДРМ). Руководство по эксплуатации ВРМЦ.411112.001 РЭ. СПб.: АО «ВИБРАТОР», 2017.
5. Барков А.В. и др. Методика диагностирования механизмов с электроприводом по потребляемому току. СПб.: НОУ «Северо-западный учебный центр», 2012. 67 с.
6. Завидей В.И., Милованов С.В. Комплексный подход в оперативной диагностике электрических машин // Экспозиция. Нефть. Газ. 2012. № 5. С. 121–124.
7. Bonnett A.H., Sonknp G.C. Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors. IEEE Trans. Industry Applications, 1992, Vol. 28, issue 4, P. 921–937. (In Eng).
8. Thomson W.T., McRae C.J. On-Line current monitoring to detect inter-turn stator winding faults in induction motors. Proceedings of the 24th Universities Power Engineering Conference, September, 1989. (In Eng).
9. Leonard R.A., Thomson W.T. Vibration and stray flux monitoring for unbalanced supply and inter-turn winding fault diagnosis in induction motors. British journal of non-destructive testing, 1986, Vol. 28, issue 4, P. 211–215. (In Eng).
10. Завидей В.И., Крупинин Н.В., Ваньков С.М., Печенкин В.И., Каланчин С.В. Критерий Колмогорова-Смирнова и возможности его применения в диагностике электрооборудования методами ИК-термографии // Вестник РАЭН. 2012. № 3.
11. Сафин Н.Р. Совершенствование методики токовой диагностики асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Диссертация. Екатеринбург: 2017, 152 с.
12. Зюзев А.М., Метельков В.П. О проблеме перегрева обмотки ротора асинхронных двигателей в пусковых режимах высокоинерционных электроприводов нефтегазовой и горной промышленности // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329. № 7. С. 96–103.

ENGLISH

Results

The analysis of the main concepts of conventional solutions for the creation of monitoring systems for medium-sized machines was carried out, their advantages and drawbacks were noted. It was shown that a monitoring system based on the analysis of stator currents currently solves the problem partly due to the absence of a reasonable methodology for choosing the spectral parameters for monitoring the extended Park vector.

Conclusions

- It was noted that the use of monitoring systems based on a wide range of control parameters should be taken into account at the stage of design and manufacture of electrical machines. The monitoring system should include the necessary number of important and reliably controlled parameters that protect the electrical machine from

serious damage. Due to the weak noise immunity, it is not rational to include measurements of partial discharges in the monitoring system.

- The main obstacle in the implementation of existing monitoring systems is the interpretation of the received data and the lack of statistical failure data.
- Concurrent detection of the defects arisen after the electric machine is turned off should be assigned to a multiparameter control system, which can be considered as a higher level of the monitoring system and technical diagnostics.
- The use of complex systems for diagnosing electric motors makes it possible to implement the technology of equipment maintenance according to the actual state, which is relevant for the domestic energy sector.

References

1. Afanasev D.O. Sidelnikov L.G., Sedunin A.M. Methods and problems of vibro-asinhronnyh engines. Perm: Perm State Technical University, JSC "TestServis", 2013, 20 p. (In Russ).
2. Barkov A.V., Barkova N.A., Azovtsev A.Yu. Monitoring and diagnostics of rotary machines by vibration. Sankt-Peterburg: SMTU, 2000, 169 p. (In Russ).
3. ISO 20958-201. Condition monitoring and diagnostics of machine systems. Electrical signature analysis of three-phase induction motors. Moscow: Standartinform, 2016. (In Russ).
4. Diagnosis system of rotating machines. Manual, VRMC 411112.001 RE, "Vibrator" JSC, 2017. (In Russ).
5. Barkov A.V. et al. Method of diagnosing electrically driven mechanisms on the machine's current. St. Petersburg: Northwest training center, 2012, 67 p. (In Russ).
6. Zavidyev V.I., Milovanov S.V. Integrated approach operational diagnostics of electrical machines. Exposition Oil Gas, 2012, issue 5, P. 121–124. (In Russ).
7. Bonnett A.H., Sonknp G.C. Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors. IEEE Trans. Industry Applications, 1992, Vol. 28, issue 4, P. 921–937. (In Eng).
8. Thomson W.T., McRae C.J. On-Line current monitoring to detect inter-turn stator winding faults in induction motors. Proceedings of the 24th universities power engineering conference, September, 1989. (In Eng).
9. Leonard R.A., Thomson W.T. Vibration and stray flux monitoring for unbalanced supply and inter-turn winding fault diagnosis in induction motors. British journal of non-destructive testing, 1986, Vol. 28, issue 4, P. 211–215. (In Eng).
10. Zavidyev V.I., Krupenin N.V., Vankov S.M., Pechenkin V.I., Kalanchin S.V. Criterion Kolmogorov-Smirnov and the possibility of its application in the diagnosis of electrical equipment by IR-thermography. Vestnik RAEN, 2012, issue 3. (In Russ).
11. Safin N.R. Improvement of the method of current diagnostics of inductions motors with squirrel-cage rotor. Dissertation. Ekaterinburg: 2017, 152 p. (In Russ).
12. Ziuzev A.M., Metelkov V.P. About the problem of induction motors rotor winding overheating in starting modes of high-inertia electric drives of oil and mining industry. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo assets engineering, 2018, Vol. 329, issue 7, P. 96–103. (In Russ).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Завидей Виктор Иванович, д.т.н., главный научный сотрудник, ВНИИТФ-ВЭИ, Москва, Россия
Для контактов: zavidyevi@mail.ru

Путилова Ирина Вячеславовна, кандидат технических наук, заведующий НИО кафедры ТЭС, ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», Москва, Россия

Старшинов Владимир Алексеевич, кандидат технических наук, профессор кафедры ЭС, ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», Москва, Россия

Zavidyev Viktor Ivanovich, doctor of technical sciences, chief researcher, VNIITF-VEI, Moscow, Russia
Corresponding author: zavidyevi@mail.ru

Putilova Irina Vyacheslavovna, ph.d. of technical sciences, head of the research department, Moscow power engineering institute, Moscow, Russia

Starshinov Vladimir Alekseevich, ph.d. of technical sciences, professor, Moscow power engineering institute, Moscow, Russia

ООО «Выставочная компания
Сибэкспосервис»

СИБЭКСПО SERVICE
www.ses.net.ru



Шестнадцатая межрегиональная специализированная выставка
НИЖНЕВАРТОВСК. НЕФТЬ. ГАЗ. ТЭК
НИЖНЕВАРТОВСК, 04–05 октября 2023



Тринадцатая межрегиональная специализированная выставка
САХАПРОМЭКСПО – 2023
ЯКУТСК, 25–26 октября 2023

+7 (383) 335 63 50
vkscs@gandex.ru
www.ses.net.ru

**ЭКСПОЗИЦИЯ
НЕФТЬ ГАЗ**

Генеральный информационный партнер