
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.311

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕСУРСА БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ НАСОСНО-КОМПРЕССОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ

М.Г. Баширов, И.В. Прахов

Проведен анализ достоинств и недостатков современных методов оценки технического состояния и прогнозирования ресурса безопасной эксплуатации насосно-компрессорного оборудования с электрическим приводом. Показана перспективность применения спектрального метода диагностики, основанного на анализе взаимосвязи параметров высших гармонических составляющих токов и напряжений, генерируемых двигателем электропривода, с техническим состоянием и режимами работы насосно-компрессорного оборудования.

Ключевые слова: насосно-компрессорное оборудование, электрический привод, техническое состояние, дефект, спектральный метод диагностики.

Key words: the насосно-compressor equipment, an electric drive, a technical condition, defect, a spectral method of diagnostics.

Уровень безопасности технологических процессов промышленных предприятий во многом определяется техническим состоянием насосно-компрессорного оборудования. Отказ насосно-компрессорного оборудования может привести к созданию аварийных ситуаций, сопровождающихся значительным экономическим и экологическим ущербом. Большая часть насосно-компрессорного оборудования имеет электрический привод. Отличительной особенностью насосно-компрессорного оборудования с электрическим приводом является то, что их техническое состояние определяется состоянием элементов как механической части, так и электрического привода.

На рис. 1 представлены основные элементы, из которых состоит насосно-компрессорное оборудование с электрическим приводом.

На рис. 2 представлена классификация основных повреждений насосно-компрессорного оборудования с электрическим приводом.

Рассмотрим основные дефекты и повреждения элементов насосно-компрессорного оборудования, приводящие к отказу всего агрегата.

Кабели питания электродвигателей. Непосредственно после монтажа и в процессе эксплуатации кабельные линии подвергаются разнообразным испытаниям, с помощью которых выявляются ослабленные места или дефекты в изоляции и защитных оболочках, соединительных и концевых муфтах. В настоящее время наиболее распространенным способом получения сведений о состоянии изоляции кабельной линии является планово-профилактическое испытание повышенным выпрямленным напряжением (в 4...6 раз превышающим номинальное), в процессе которого происходит пробой изоляции на слабых участ-

ках. Такое испытание травмирует изоляцию, и если пробой не происходит при испытаниях, то кабель часто выходит из строя через непродолжительное время эксплуатации. Объективные данные о техническом состоянии кабельной линии можно получить современными методами диагностики, не травмирующими изоляцию: измерением возвратного напряжения, тока абсорбции, регистрацией частичных разрядов, методом рефлектометрии. Такие методы, основанные на использовании информативных характеристик изоляции, не только позволяют получать информацию о состоянии изоляции кабелей, но и могут быть использованы для прогнозирования остаточного срока службы длительно эксплуатирующихся кабелей [1].

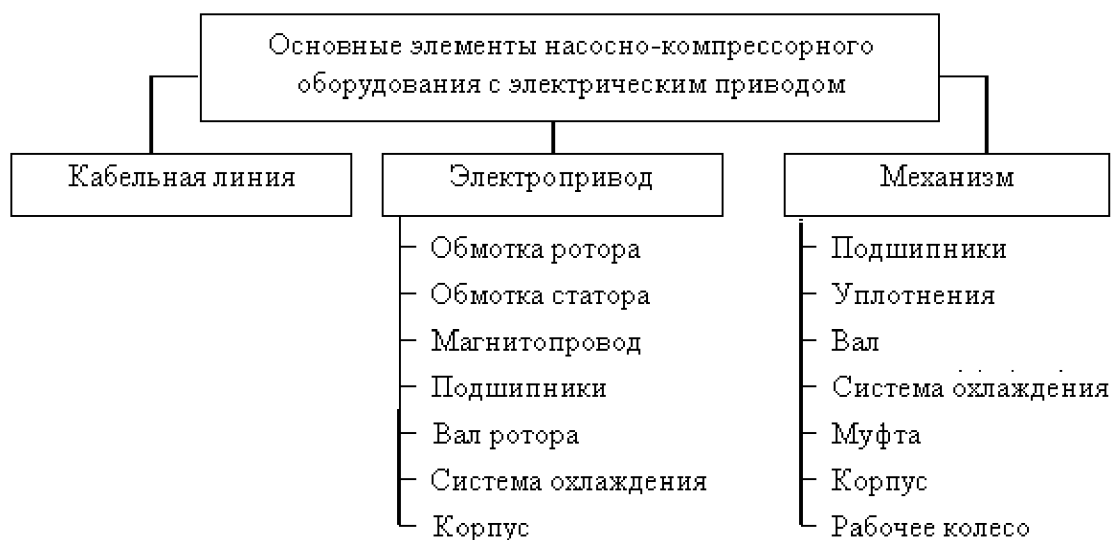


Рис. 1. Основные элементы насосно-компрессорного оборудования с электрическим приводом

Магнитопровод элементов электропривода. Основными дефектами магнитопровода являются повреждения межлистовой изоляции и ослабление прессовки магнитопровода (рис. 2). Ослабление прессовки магнитопровода приводит к его повышенной вибрации, которую можно выявить вибрационным методом. Повреждения межлистовой изоляции приводят к местным перегревам, которые выявляются тепловым методом. Тепловой контроль состояния магнитопровода может осуществляться термодатчиками, установленными в активной стали, тепловизорами или с помощью специальных термоиндикаторных покрытий. Эти покрытия наносятся на поверхность критических по перегревам элементов электропривода и при достижении предельной температуры выделяют определенные газы и аэрозоли, которые выявляются при химическом анализе охлаждающего газа. На разные элементы электропривода наносят покрытия различного химического состава, что позволяет не только зафиксировать местные перегревы, но и идентифицировать их источники. Для фиксирования перегрева отдельных элементов электропривода могут использоваться термочувствительные «этикетки», изменяющие свой цвет при превышении порогового значения температуры в месте их установки. Осмотр «этикеток» возможен только во время ревизии на остановленном оборудовании [1].

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ



Рис. 2. Основные виды повреждений насосно-компрессорного оборудования с электрическим приводом

Обмотки статора и ротора электродвигателя. Основными повреждениями обмоток статора и ротора (см. рис. 2) являются: ослабление крепления стержней в пазу; загрязнение, замасливание и увлажнение изоляции; трещины в изоляции; повреждения корпусной изоляции и витковые замыкания; обрыв обмотки. Ослабление крепления стержней в пазу вызывает истирание изоляции и стержня, контролируется визуальным осмотром при разборке во

время ремонта электропривода. Загрязнение, замасливание, увлажнение, а также трещины в изоляции вызывают снижение ее электрической прочности. Электрическая прочность изоляции обмоток статора и ротора двигателя электропривода контролируется испытанием повышенным напряжением, методом частичных разрядов, измерением сопротивлений и проводимостей диэлектриков и проводников [1]. Повреждения корпусной изоляции, витковые замыкания, обрыв обмотки приводят к повышению вибрации, увеличению температуры статора и ротора, к снижению электрической прочности изоляции. Уровень вибрации контролируется вибрационным методом. Контроль теплового состояния обмоток статора и ротора электродвигателя может осуществляться с помощью встроенных датчиков температуры, с помощью тепловизоров или путем химического анализа охлаждающего газа, в котором находятся продукты термического разложения изоляции. По концентрации продуктов разложения можно судить о степени перегрева изоляции. Контроль за местными перегревами можно проводить с помощью нанесения термоиндикаторных покрытий или термочувствительных «этикеток».

Металлические конструктивные элементы насосно-компрессорного оборудования. Для выявления дефектов типа нарушения сплошности и неоднородности металлических конструктивных элементов насосно-компрессорного оборудования используются магнитные, электрические, вихретоковые, тепловые, оптические, радиационные и акустические методы неразрушающего контроля, а также метод проникающих веществ [3]. В таблице представлены ограничения в применении этих методов.

Наиболее распространенными методами для выявления нарушений герметичности корпуса электродвигателя или насоса (компрессора), приводящих к попаданию воды или пыли на обмотку статора, в систему смазки, на подшипники и на другие элементы насосно-компрессорного оборудования, согласно [4] и таблице, являются акустический, магнитный и оптический методы.

Нарушение герметичности системы охлаждения (рис. 2), приводящее к появлению дистиллята внутри корпуса и увлажнению изоляции, контролируется методом течеискания. Метод течеискания основан на проникновении газообразных и жидких веществ через сквозные дефекты с целью установления степени герметичности изделий [4], которая определяется потоком газа, расходом или наличием истечения жидкости, падением давления за единицу времени, размером пятна и др. Закупорка каналов системы охлаждения, приводящая к местным перегревам обмотки статора, подшипников и других элементов, контролируется термодатчиками, установленными в обмотке статора, на баббитовых вкладышах подшипников, на корпусе электродвигателя или насоса (компрессора), тепловизорами, инфракрасными пирометрами или датчиками для измерения давления в системе охлаждения.

Динамические элементы насосно-компрессорного оборудования. Поломка, неправильная установка, наружные и внутренние дефекты рабочих колес (рис. 2) приводят к повышению общего уровня вибрации. Диагностику рабочих колес насосно-компрессорного оборудования в процессе эксплуатации осуществляют преимущественно методами вибродиагностики.

Для обнаружения наружных и внутренних дефектов рабочих колес типа заусенцы, непровары, трещины применяют в основном радиационные, капиллярные и акустические методы неразрушающего контроля (см. табл.) [4].

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ

Таблица 1

Оценка методов неразрушающего контроля для обнаружения дефектов типа нарушения сплошности и неоднородности металлических конструктивных элементов насосно-компрессорного оборудования

Метод	Типы обнаруживаемых дефектов	Минимальные размеры обнаруживаемых дефектов	Требования к объекту контроля
Акустический	Внутренние трещины, раковины, неметаллические включения, расслоения, непровары	Эквивалентная площадь дефекта более 1 мм ² , эквивалентная глубина дефекта более 3 % от толщины объекта контроля	Очистка поверхности от грязи, отслаивающейся окисной пленки, обработка поверхности
Радиационный	Трещины, раковины, пористость, непровары, шлаковые инородные включения, расслоения	Раскрытие дефекта с чувствительностью (отношение протяженности дефекта в направлении просвечивания к толщине стенки детали) 1–5 %	Двухсторонний доступ, отсутствие наружных дефектов, превышающих чувствительность контроля, радиационная безопасность
Магнитный	Поверхностные и подповерхностные трещины, раковины, непровары, расслоения, волосовины, включения	Раскрытие дефекта на глубине до 10 мм с минимальным размером более 0,1 мм	Ферромагнитные металлы, чистота обработки поверхности
Оптический	Поверхностные трещины, царапины, коррозионные пятна, механические повреждения	Раскрытие дефекта размером более 0,01 мм	Чистота обработки поверхности
Вихретоковый	Поверхностные и подповерхностные трещины, раковины, непровары, расслоения, волосовины, включения	Раскрытие дефекта глубиной более 0,1 мм для обнаружения более грубого дефекта – до 8–10 мм	Чистота обработки поверхности
Электрический	Поверхностные трещины, раковины, непровары, включения	Раскрытие дефекта глубиной трещины 0,5–100 мм и более.	Чистота обработки поверхности
Тепловой	Поверхностные и подповерхностные трещины, раковины, непровары, расслоения, волосовины, включения	Обнаружение дефектов размером от 0,1 мм до 100 мм и более	Теплопроводные материалы
Капиллярный	Поверхностные открытые трещины, поры, коррозионные поражения	Раскрытие дефекта более 1 мкм, протяженность более 3–5 мм	Чистота обработки поверхности

Следует отдельно сказать о широко применяемых в настоящее время методах вибродиагностики. Современная вибродиагностика включает в себя не только простое определение общего уровня механических колебаний, но и анализ спектров вибрации, формы волны колебаний, фазовых углов колебаний, спектров огибающей высокочастотной вибрации и т.д. Применение современных методов вибродиагностики позволяет получить информацию о дефектах на ранней стадии их развития. Анализ изменения во времени частотных составляющих спектра вибрации позволяет прогнозировать момент, когда неисправность достигнет критического уровня, и принять меры для предотвращения аварийной остановки насосно-компрессорного оборудования. При установке и эксплуатации комплексных систем виб-

родиагностики предъявляются высокие требования к качеству и месту монтажа в отношении возможности влияния вибрации от другого технологического оборудования [1, 4].

К основным повреждениям подшипников относится неправильная установка подшипников, поломка или трещины в корпусе подшипника или в сепараторе, изношенность подшипников, неудовлетворительная система смазки подшипников. Повреждения подшипников приводят к повышению температуры опор, повышению общего уровня вибрации, к осевому сдвигу вала. Контроль за состоянием подшипников во время работы насосно-компрессорного оборудования осуществляется вибрационными и тепловыми методами неразрушающего контроля. При тепловом методе контроля в настоящее время наиболее широкое применение нашли дистанционные инфракрасные пирометры и тепловизоры. Для определения технического состояния подшипников осуществляют непосредственный (путем установки датчиков на баббитовых вкладышах) или косвенный (измерение температуры масла на входе и выходе подшипника) тепловой контроль. Для определения осевого сдвига применяются оптические методы неразрушающего контроля. Для определения трещин в корпусе подшипника или в сепараторе при изношенности подшипника с разборкой агрегата во время ремонта используют преимущественно капиллярные и вихретоковые методы неразрушающего контроля (см. табл.) [4].

Повреждение уплотнений приводит к появлению течи и образованию облака газа или лужи жидкости перекачиваемого (сжимаемого) вещества возле насосно-компрессорного оборудования. Контроль состояния уплотнений насосно-компрессорного оборудования осуществляется либо визуально, либо с помощью газоанализаторов.

Обследование технического состояния соединительных муфт проводят при росте вибрации насосно-компрессорного оборудования из-за возникающих в муфтах дефектов или визуальном обнаружении неисправностей или их признаков. В первую очередь, при этом контролируется точность центровки соединяемых валов. Далее проверяется плотность посадки полумуфт на валы, биение полумуфт, состояние зацепления, твердость зубьев, втулок и обойм. При признаках поверхностных и подповерхностных дефектов в районе шпоночных пазов и в зубьях выполняют их дефектоскопический контроль вихретоковым, капиллярным, магнитопорошковыми методами [4].

Искривление, изношенность, нарушение балансировки вала (ротора) в процессе работы насосно-компрессорного оборудования приводят к повышению температуры опор и общего уровня вибрации всего агрегата, которые контролируются методами вибродиагностики и тепловыми методами. При тепловом методе контроля применяются термодатчики, установленные на опорах, а также дистанционные инфракрасные пирометры и тепловизоры. Искривление, изношенность, шероховатость, выступы, заусенцы вала (ротора) определяют во время ремонта с разборкой агрегата магнитными, вихретоковыми, оптическими и акустическими методами неразрушающего контроля. Трещины в различных частях вала (ротора) во время ремонта с разборкой агрегата определяют акустическими методами неразрушающего контроля [4].

В последнее время интенсивно развиваются методы диагностики, основанные на анализе параметров токов, потребляемых двигателем электропривода. Физический принцип, положенный в основу метода, заключается в том, что любые возмущения в работе электрической и механической частей насосно-компрессорного оборудования приводят к изменениям магнитного потока в зазоре электрической машины и, следовательно, к модуляции тока, потребляемого электродвигателем. Таким образом, наличие в спектре тока двигателя характерных частотных составляющих свидетельствует о наличии повреждений электрической или механической части насосно-компрессорного оборудования.

В настоящее время ведутся разработки программно-аппаратных комплексов для диагностики насосно-компрессорного оборудования на основе спектрального анализа токов, потребляемых электродвигателем [2, 5, 6]. В состав программно-аппаратного комплекса входят: датчики токов и напряжений с линейными частотными характеристиками; кондиционер

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ

сигнала (фильтр низких частот, препятствующий появлению ложных сигналов); аналого-цифровой преобразователь, персональный компьютер с необходимым программным обеспечением для сбора и обработки информации (рис. 3).

Спектральный метод диагностики позволяет обнаружить неисправности элементов как электрической, так и механической части насосно-компрессорного оборудования: повреждения в обмотках статора и ротора электродвигателя; повреждения подшипников и рабочего колеса; эксцентриситет ротора; повреждения муфты; ослабление прессовки пакета стали обмотки статора или ротора; ослабление крепления к фундаменту и др.

Важным достоинством спектрального метода диагностики является то, что он позволяет осуществлять удаленный контроль технического состояния работающего насосно-компрессорного оборудования, при этом параметры токов электродвигателя могут быть измерены в местах подключения кабелей питания.



Рис. 3. Структурная схема программно-аппаратного комплекса для реализации спектрального метода диагностики насосно-компрессорного оборудования с электрическим приводом

Несмотря на перечисленные достоинства спектрального метода диагностики, для доведения его до широкого практического промышленного применения необходимо решить ряд важных задач, связанных с выделением информативных параметров из широкого спектра гармонических составляющих токов и напряжений, генерируемых двигателем электропривода, распознаванием технического состояния, режимов работы и характерных повреждений насосно-компрессорного оборудования по значениям параметров гармонических составляющих токов и напряжений.

Библиографический список

1. *Баширов, М. Г.* Диагностика электрических сетей и электрооборудования промышленных предприятий : учеб. пос. для вузов / М. Г. Баширов, В. Н. Шикунов. – Уфа : Изд-во УГНТУ, 2004. – 220 с.
2. *Баширов, М. Г.* Обеспечение безопасности эксплуатации насосно-компрессорного оборудования с электрическим приводом электромагнитными методами диагностики / М. Г. Баширов, Д. М. Сайфутдинов // Нефтегазовое дело : сетевой журнал. – Режим доступа: <http://www.ogbus.ru>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
3. *ГОСТ 18353-79.* Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. – М. : Изд-во стандартов, 1979.
4. *Неразрушающий контроль и диагностика* : справочник / В. В. Клюев, Ф. Р. Соснин, А. В. Ковалев и др. ; под ред. В. В. Клюева. – М. : Машиностроение, 1995. – 487 с.
5. *Петухов, В. С.* Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального анализа потребляемого тока / В. С. Петухов, В. А. Соколов // Новости электротехники. – 2005. – № 1 (31). – С. 50–52.
6. *Пономарев, В. А.* Комплексный метод диагностики асинхронных электродвигателей на основе использования искусственных нейронных сетей / В. А. Пономарев, И. Ф. Суворов // Новости электротехники : сетевой журнал. – Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.