

The Analysis of Modern Methods and Tools for Condition Monitoring and Diagnostics of Reciprocating Compressors. Pt. 2. Real-Time Monitoring Systems

V. N. Kostyukov, A. P. Naumenko

The analysis of methodology, technique of application and principles of build-up of real-time condition monitoring systems is fulfilled. The condition real-time monitoring system KOMPAKS for piston compressors is viewed. Examples of operation and repair under indications of condition monitoring system KOMPAKS are given.



АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ МОНИТОРИНГА И ДИАГНОСТИКИ ПОРШНЕВЫХ КОМПРЕССОРОВ. ЧАСТЬ 2. СИСТЕМЫ REAL-TIME МОНИТОРИНГА*

Критерии состояния

Безопасная ресурсосберегающая эксплуатация оборудования опасных производств неразрывно связана с мониторингом технического состояния оборудования. Термин «техническое состояние» предполагает пять видов состояний: исправное – неисправное, работоспособное – предельное – неработоспособное.

Работоспособное техническое состояние – это состояние объекта, при котором он выполняет свои функции в допустимых пределах отклонений функциональных количественных и качественных показателей вследствие наличия,

зарождения и развития неисправностей при заданном риске возникновения отказа, приводящего к прекращению выполнения этих функций. Сегодня условия эксплуатации требуют дополнительных категорий состояния в промежутке от работоспособного к предельному для оценки возможностей эксплуатации и степени ее опасности. Целесообразное число этих категорий определяется регламентами технического обслуживания оборудования, руководствуясь которыми технологический персонал может управлять состоянием оборудования от менее благоприятного (более неисправного) к более благоприятному (менее неисправному), т. е. «поправлять здоровье (лечить оборудование)» (Health monitoring).

Как правило, различают четыре категории таких состояний [1, 2]:

- **«ХОРОШО»** (Х) – допустимо при приемочных испытаниях после монтажа или капитального (среднего) ремонта. Критерий соответствует исправному состоянию объекта и характеризует высокое качество ремонтных, монтажных работ и обкатки под нагрузкой;
- **«ДОПУСТИМО»** (Д) – допустимо при длительной эксплуатации. Критерий характеризует полностью работоспособное состояние объекта при существующем регламенте обслуживания и малой вероятности отказа. При достижении уровня «Д», контролируется

скорость изменения измеряемых параметров;

- **«ТРЕБУЕТ ПРИНЯТИЯ МЕР»** (ТПМ) – допустимо при непродолжительной эксплуатации. Техническое состояние объекта соответствует критерию «ТПМ», если величина измеряемого параметра превышает уровень «ТПМ» или скорость роста параметра превышает уровень «ТПМ» при абсолютном значении параметра, превышающем уровень «Д». Критерий предупреждает о приближении технического состояния к предельному, наличии развивающихся дефектов, устойчивой постепенной утрате работоспособности и росте вероятности отказа. Критерий служит основанием для проведения текущего обслуживания в большем объеме и/или планомерного вывода агрегата в ремонт;
- **«НЕДОПУСТИМО»** (НДП) – ОСТАНОВ – недопустимо при эксплуатации. Техническое состояние объекта соответствует критерию «НДП», если величина измеряемого параметра превышает уровень «НДП» или скорость роста параметра превышает уровень «НДП» при абсолютном значении параметра, превышающем уровень «Д». Критерий характеризует наличие развитых дефектов либо высокую скорость их развития и достижение объектом предельного опасного состояния с высокой вероятностью отказа. Продолжительность работы агрегата в состоянии «НДП» должна быть минимальна и определяется регла-



Сотрудники НПЦ «Динамика», г. Омск:

Костюков

Владимир Николаевич

Генеральный директор, д. т. н., профессор. Лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники.

Науменко

Александр Петрович

Начальник учебного центра и лаборатории НК, к. т. н., эксперт пром. безопасности, III уровень по вибрационному виду НК.

* Начало статьи в предыдущем номере журнала

ментом по выводу его из этого состояния. Критерий служит для немедленного проведения компенсирующих мероприятий и/или останова агрегата и вывода его в ремонт.

В задачу систем мониторинга состояния входит не только определение вида и категории технического состояния, но и определение неисправного механизма, узла, детали, т. е. элемента технического объекта, который требует обслуживания или замены.

Диагностические сигналы

Решение столь сложных задач, как мониторинг технического состояния и диагностика, возможно на основе адекватного выбора методологии диагностирования и параметров, определяющих не только техническое состояние, но и позволяющих осуществлять диагностирование с требуемой условиями эксплуатации и обслуживания глубиной.

Среди большого разнообразия измеряемых параметров поршневых компрессоров (ПК) наибольшей информативностью обладают виброакустические колебания [3 – 8], источниками которых являются соударения в кинематических парах механизмов (поршень – цилиндр, палец – втулка и т. д.). Косвенно они характеризуют величину зазора между сопряженными элементами, увеличивающуюся по мере изнашивания трущихся поверхностей, силы, действующие в сопряжениях, и качество поверхностей трения и качения. Но действие большого количества источников вибраций в машине, зависимость виброакустических процессов от режима и условий работы машин усложняют процедуру диагностики. Кроме того, виброакустическая диагностика требует особой методологии формирования и выделения диагностических признаков, которые позволяли бы достоверно оценивать техническое состояние ПК в целом, их систем, механизмов и отдельных деталей на основе анализа физических процессов, протекающих в них, и закономерностей их развития.

Многолетний опыт исследований параметров виброакустических сигналов, диагностики и мониторинга состояния ПК [3 – 5, 7 – 18] показывает, что эти сигналы с достаточной степенью достоверности и адекватности не только характеризуют структурные параметры узлов и деталей ПК, но и адекватно отражают повышенные динамические нагрузки на узлы и детали вследствие отклонений физико-химических свойств газа от необходимых для нормальной, безаварийной работы. При этом обеспечивается контроль состояния всех жизненно-важных узлов ПК [18, 11, 12].

Источники виброакустического сигнала

Поршневая машина, будь то поршневой компрессор или двигатель внутреннего сгорания, представляет собой сложную газо-механическую систему и является мощным и многофакторным источником виброакустических сигналов. Три основных источника этих сигналов [8, 18, 11]:

1. Неуравновешенность движущихся и вращающихся масс – силы инерции возвратно-поступательно движущихся масс, центробежные силы инерции и моменты этих сил.

2. Газодинамические процессы – силы давления газов, протекание газа при впуске и выпуске.

3. Соударения и трение между элементами и деталями узлов и механизмов.

Неуравновешенность движущихся и вращающихся масс вынуждает механизм колебаться как единое целое относительно положения равновесия. Эти колебания характеризуются низкими частотами (десятки, сотни герц), сравнительно большими амплитудами перемещения и малыми ускорениями. Основная частота колебаний объекта равна и/или кратна частоте вращения ротора, что является характерной чертой этого вида колебаний. Амплитуда виброколебаний ротора с неуравновешенными массами пропорциональна квадрату угловой скорости вращения ротора и зависит также от массы объекта и жесткости его крепления. Этот вид колебаний принято называть вибрацией.

Газодинамические процессы, соударения и трение между элементами и деталями узлов и механизмов отличаются высокими частотами (тысячи герц), малыми амплитудами смещения (доли микрометра) и значительными ускорениями (десятки метров за секунду). Частоты этого вида колебаний определяются размерами, формой и упругими константами материала деталей, а также динамикой газовых процессов. Их амплитуда пропорциональна скорости столкновения деталей и параметрам газодинамических процессов. Такие колебания принято называть акустическими.

Обобщенно, виброакустическим сигналом принято называть физические величины, характеризующие механические колебания (вибрационные, акустические, гидроакустические), сопровождающие функционирование объекта, а основанную на этих сигналах диагностику – виброакустическую [19, 20].

Необходимо заметить, что виброакустические колебания технических объектов являются сложным видом колебательных процессов, сопровождаю-

щихся деформациями объекта в целом и его составных конструктивных элементов.

Методология диагностирования

Известные в настоящее время системы мониторинга ПК практически не используют диагностические сигналы для автоматической постановки диагноза, а также практически не используют характеристики виброакустического сигнала, являющиеся косвенными признаками состояния структурных параметров узлов и деталей ПК.

Использование этих характеристик позволило разработать ряд методов и алгоритмов обработки виброакустического сигнала, что в сочетании с характеристиками других физических процессов [21, 22, 7, 8, 12, 25] дало возможность создать автоматическую экспертную систему поддержки принятия решений реального времени (*real-time*). При этом период диагностирования много меньше времени развития неисправностей и дефектов, обусловленных объективными процессами изнашивания и накопления усталостных повреждений. Период измерения параметров диагностических сигналов при возникновении субъективных повреждающих факторов обусловлен временем реакции системы управления ПК и персонала на сигнал о необходимости выполнения корректирующих действий по устранению деструктивных факторов вплоть до останова машины. Именно такое техническое решение позволило обеспечить реализацию технологии *real-time* мониторинга, т. е. мониторинга технического состояния (постановку диагноза) в реальном масштабе времени в темпе измерения параметров сигналов, обслуживания и управления ПК.

В системах *real-time* мониторинга научно обоснованный период постановки диагноза [22], а также использование автоматической экспертной системы поддержки принятия решений позволяет получить величины статической и динамической ошибок распознавания состояния оборудования менее 5 %, что дает возможность осуществлять мониторинг состояния оборудования первой категории опасности и осуществлять мониторинг оборудования всего опасного производственного объекта [23, 24].

Обобщенно можно выделить следующую методологию анализа параметров диагностического сигнала (рис. 1) [22, 5, 7 – 9, 12, 15, 16]:

- интегро-дифференциальное преобразование (например, ускорение, скорость, перемещение);
- дисперсионный анализ;

- амплитудно-фазовый анализ (например, анализ параметров сигнала по углу поворота вала);
- амплитудно-частотный анализ (например, выделение и анализ параметров сигнала в характерной области частот);
- анализ параметров огибающей сигнала, выделенной в характерных диапазонах частот, которые определяются свойствами диагностируемых узлов и деталей.

Технология **real-time** мониторинга основывается на измерении таких параметров, которые обеспечивают максимально безопасную эксплуатацию ПК

с максимально возможной глубиной диагностирования. При этом мониторингу подвергаются все основные узлы, влияющие на безопасное работоспособное состояние ПК [22, 4 – 7, 9, 11 – 18].

Алгоритмы диагностирования

Автоматические алгоритмы диагностирования построены на основе анализа циклограммы работы ПК, учитывающей для различных узлов такие характерные моменты работы ПК, как открытие и закрытие клапанов, изменение направления движения поршня [5, 11, 12, 22, 25 – 28]. Такой подход позволяет увеличить глубину диагностирования

каждого узла, что коренным образом отличает разработанные алгоритмы от других, в которых производится анализ, например, амплитуды виброускорения крещцкопфа через каждые 10° по углу поворота вала. В последнем случае можно в общем виде оценить перераспределение энергии колебаний по углу поворота вала, однако, постановка диагноза затруднена, т. к. вопрос о причинах этого остается открытым.

Методология диагностирования ПК, основанная на анализе виброакустического сигнала по углу поворота вала согласно циклограмме работы клапанов [5, 7, 18, 11, 12, 28], позволяет фиксировать ухудшение работы клапанов, например, вследствие загрязнения и уменьшения проходного сечения, а также возникновение различных других неисправностей.

Рассмотрим соответствие изменения давления в полостях нагнетания ПК двухстороннего действия возникновению виброакустического сигнала, регистрируемого датчиками, установленными в зоне клапанов. На рис. 2а представлены сигналы изменения давления в двух полостях нагнетания за один оборот вала и соответствующее возникновение сигнала. Видно, что за один оборот вала формируется два мощных импульса. При этом более низкоуровневые импульсы соответствуют открытию всасывающих клапанов. При отказе одного из клапанов, прежде всего, нагнетательных, один из импульсов исчезает (рис. 2б).

Таким образом, анализ амплитуды сигнала по углу поворота вала позволяет достоверно определять работоспособность клапанов ПК. При этом изменение амплитуды, смещение импульсов по углу поворота вала будет характеризовать изменение режима компримирования в зависимости от физико-химических свойств газа, включая возникновение микрогидроударов, изменение режима работы клапанов и возникновение неисправностей их деталей, правильность подбора параметров клапанов для конкретного газа [25, 4, 22, 18, 11, 12]. Изменение уровня виброакустического сигнала в области мертвых точек до и после их прохождения поршнем будет свидетельствовать о ряде неисправностей, связанных как с изменением технологического режима эксплуатации ПК, так и с изменением технического состояния деталей ЦПГ, включая, например, ослабление крепления поршня. Спектральный состав сигнала является весьма сложным, и в явном виде практически не представляется возможным использовать спектральные составляющие для оценки состо-

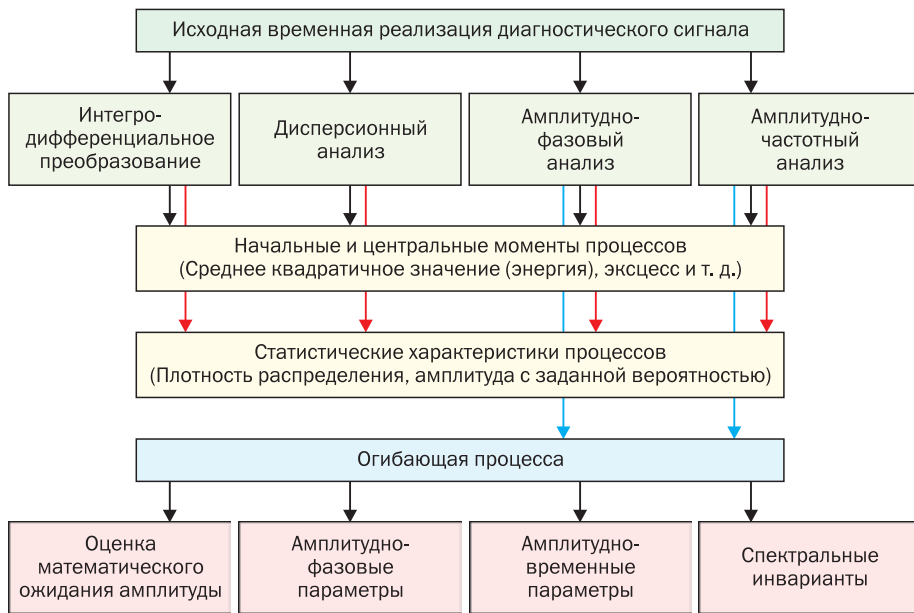


Рис. 1. Методология анализа параметров диагностического сигнала

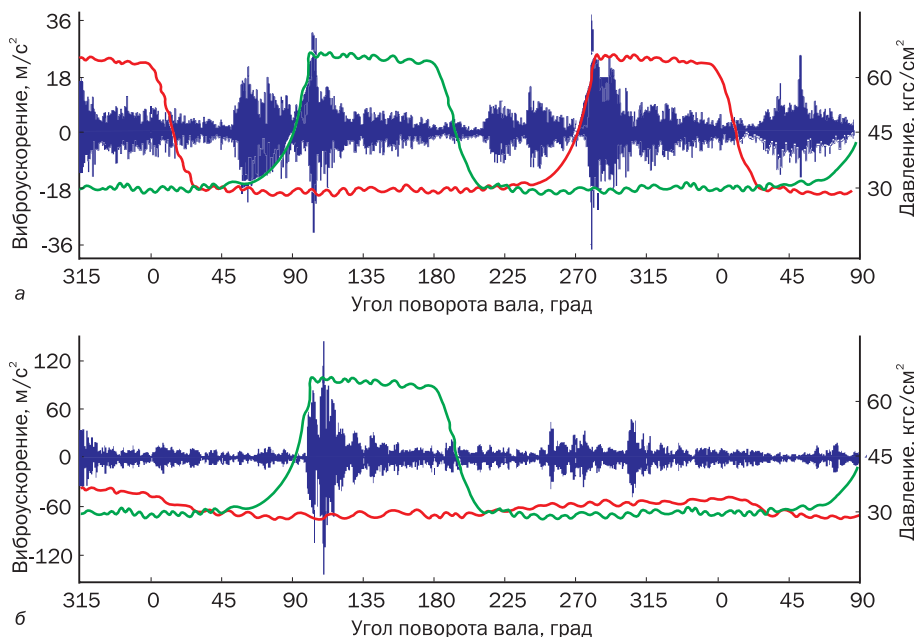


Рис. 2. Вибросигнал и давление в цилиндре при исправных (а) и неисправных (б) клапанах: красные, зеленые и синие линии – давление 1, давление 2 и виброускорение соответственно

яния узлов и деталей. Однако выделение сигнала в характерной области частот и амплитудно-фазовый анализ выделенного процесса во временной (по углу поворота вала) и в частотной областях, а также амплитудно-частотный и амплитудно-фазовый анализ огибающей сигнала позволяют однозначно интерпретировать изменение выделенных составляющих как изменение технического состояния и степень неисправности контролируемого узла или детали ПК [5, 8, 9, 11, 18, 29, 30].

Анализ параметров сигнала показал, что виброактивность ПК определяется гармониками частоты вращения вала, которая, как правило, совпадает с полным циклом работы ПК, и высокочастотной шумовой составляющей вибрации, которая, как правило, промодулирована гармониками частоты вращения вала. Гармонические составляющие как в прямом спектре, так и в спектре огибающей, являются наиболее сильными, стабильными и характерными составляющими вибрации независимо от конструктив-

ных, массогабаритных и других показателей ПК. Поэтому их использование в качестве компонентов диагностических признаков позволяет получать стабильные результаты анализа виброакустической активности ПК. Этого невозможно достичь путем анализа высокочастотных шумовых спектральных составляющих, которые в значительной степени зависят от газодинамических процессов в ПК, технологических параметров ведения процесса компримирования и места установки вибродатчиков.

Основной проблемой при эксплуатации ПК является выявление на ранней стадии процесса зарождения неисправностей и разрушения впускных и выпускных клапанов. Для анализа вибраций клапанов акселерометры устанавливаются на шпильках крепления клапанов. Анализ вибропараметров во временной области (рис. 3) позволяет выявить неисправность клапанов на ранней стадии в момент поломки первых пружин. При этом изменение характеристик вибропараметров наблюдается на несколько суток раньше по сравнению с изменением температуры, которое фиксируется, когда клапан уже развалился. Это позволяет своевременно исключить нарушение технологии и простой компрессора. Для автоматического диагностирования клапанов хорошо зарекомендовал себя алгоритм, основанный на анализе спектральных инвариантов сигнала [9], который дает возможность однозначно выявлять дефекты клапанов при анализе сигналов на рис. 3 в частотной области. Этот алгоритм является частным случаем более общего алгоритма диагностирования машин методом рекуррентной селекции шумовых и периодических составляющих вибрации во временной и частотной областях.

Использование спектральных инвариантов в виде отношения дисперсий гармонических составляющих позволяет провести нормирование уровней диагностических признаков неисправностей в диапазоне от 0 до 1. Спектральные инварианты в общем виде можно представить в виде отношений суммы дисперсий гармоник A_m с номерами $m = p, \dots, r, \dots, s$ к сумме дисперсий гармоник A_i с номерами $i = 1, \dots, k, \dots, l$. Практически оказывается, что одинаковые спектральные инварианты, определенные по амплитудно-частотному спектру сигналов с датчиков, установленных в различных точках ПК, позволяют получать информацию о состоянии различных узлов и механизмов ПК (табл. 1).

Статистическая обработка нескольких сотен реализаций виброакустических сигналов дала возможность выя-

Табл. 1. Диагностирование по параметрам спектральных инвариантов

№	Место измерения вибрации	Узлы поршневой машины	Вид неисправности	Спектральные инварианты
1	Крейцкопф	Кривошипно-ползунный механизм	Зазоры, состояние поверхностей скольжения ползуна, состояние поверхности втулки и подшипника верхней головки шатуна, жесткость крепления штока	$K_{(123)}^{(1)}$
2	Крейцкопф	Кривошипно-шатунный механизм	Зазоры, состояние шатунной шейки и ее подшипников, жесткость крепления нижней головки шатуна, состояние коренных подшипников	$K_{(1-5)}^{(345)}$
3	Клапан; цилиндр	Клапан	Поломка пластин, пружин, уменьшение параметра «время–сечение», нарушение технологического процесса, гидроудар	$K_{(123)}^{(1)}$
4	Цилиндр	Детали ЦПГ	Зазор между поршнем и гильзой, износ поршневых колец, износ поверхности гильзы, ослабление крепления штока к поршню	$K_{(123)}^{(1)}$
5	Подшипник машины со стороны привода или маховика	Вал, муфта	Дисбаланс	$K_{(1-9)}^{(1)}$
6		Вал ПМ, вал привода	Несоосность	$K_{(1-9)}^{(23)}$
7		Муфта	Повышенные зазоры, ослабление крепления, жесткости	$K_{(1-9)}^{(3-9)}$

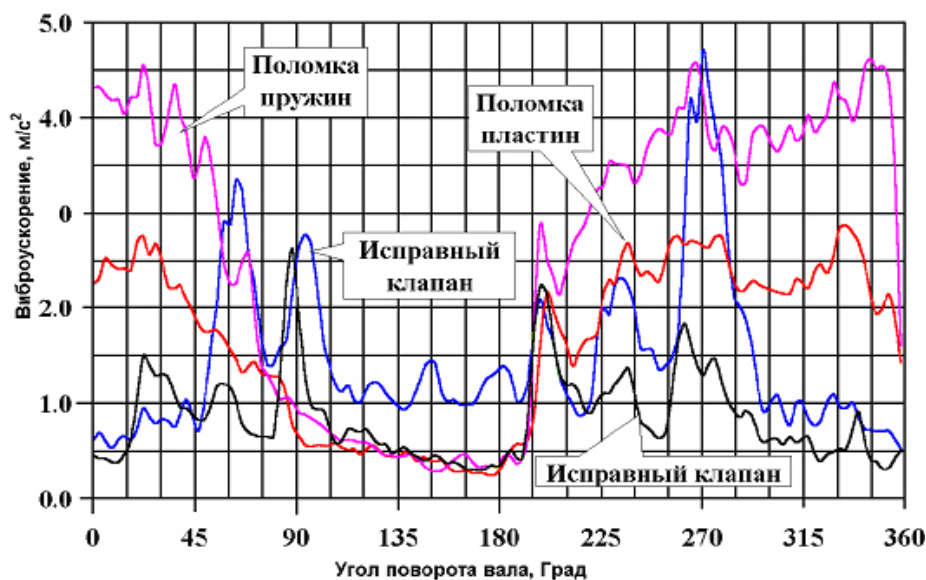


Рис. 3. Вибросигналы клапанов по углу поворота вала: 1 – поломка пружин; 2 – поломка пластин; 3, 4 – исправный клапан

вить закономерности изменений параметров сигналов и технического состояния узлов и деталей ПК. В результате определены нормы и предельные значения параметров сигналов [12]. Эти нормы имеют градации «Д», «ТПМ» и «НДП».

Система мониторинга в реальном времени

Многолетний опыт эксплуатации систем диагностики и мониторинга центробежного насосно-компрессорного оборудования и поршневых машин КОМПАКС® [28, 3, 4, 18, 11, 13, 15] позволил разработать методологию и средства (рис. 4) диагностирования дефектов и неисправностей насосно-компрессорного оборудова-

ния и ПК в реальном времени (real-time) [3, 4, 8 – 18].

В системах [3, 4, 8, 11 – 15], которые выполнены по последовательно-параллельной схеме, что резко снижает объем и затраты на кабель, строительно-монтажные работы и стоимость владения, производится многопараметрическая обработка виброакустических сигналов, полученных в различных точках ПК. Возможность такого построения определяется существующими скоростями развития наблюдаемых системой неисправностей и длинным «выбегом» компрессора после выключения привода, что требует большого интервала прогноза развития неисправностей, т. к. остановить ком-

прессор за несколько минут невозможно. Наряду с измерением параметров виброакустического сигнала для контроля состояния ПК и режимов его работы (табл. 2) используются и параметры других физических процессов, например, при необходимости (в зависимости от состояния, условий эксплуатации ПК и требований его владельца) предусматривается возможность измерения и использования для мониторинга и постановки диагноза давления в полостях нагнетания (индикаторной диаграммы), на приеме и нагнетании каждого цилиндра, температуры газа на приеме и нагнетании и клапанов, положение штока и другие. Особое внимание уделено точкам получения сигналов, в которых сигнал наиболее адекватно отражает состояние тех или иных узлов ПК.

В качестве основных диагностических признаков, по которым оценивается общее техническое состояние диагностируемого узла, используется среднеквадратическое значение (СКЗ) виброускорения (А), виброскорости (V), виброперемещения (S) (табл. 2). Амплитудные характеристики вибропараметров, определенные как за цикл измерения, так и согласно циклограмме работы ПК, спектральные инварианты как в совокупности, так и отдельно используются для уточнения диагноза. В результате сегодня только по параметрам виброакустического сигнала система КОМПАКС автоматически определяет более 20 дефектов, неисправностей и нарушений технологического режима эксплуатации ПК (табл. 3).

Использование в системе КОМПАКС всего пяти пьезоакселерометров на один цилиндр позволяет выявить до 23 дефектов, неисправностей и нарушений технологического режима эксплуатации ПК. Программно-аппаратные возможности системы позволяют без труда подключить, по мере необходимости, датчики температуры, давления, положения штока и другие, что реализовано в некоторых системах для мониторинга сложных с точки зрения состояния, обслуживания и эксплуатации ПК.

В настоящее время под контролем систем КОМПАКС эксплуатируется более 50 компрессоров различных типов, среди которых компрессоры BDCB-30/30/20/20x16 (Worthington), 4HF/2 серии HF (Nuovo Pignone), 2TV2 (Neuman & Esser), а также – 4M16M-45/35-55, 2ГМ16-20-42/60, 2М10-11-42/60, 5Г-600-42/60 и другие.

Практика мониторинга состояния системами КОМПАКС

Для оценки эффективности применения систем целесообразно привести несколько примеров адекватной реакции

Табл. 2. Диагностические признаки дефектов и неисправностей

№	Место установки датчика	Диагностируемый узел	СКЗ (A, V, S)	Амплитуда за 5 оборотов при заданной вероятности	Амплитуда по циклограмме при заданной вероятности	Спектральные инварианты
1	Цилиндр	ЦПГ	5 оборотов	Ускорение Перемещение	Ускорение 8 сегментов	$K_{(1+3)}^{(1)}$ $K_{(1+5)}^{(3+5)}$
2	Клапан; цилиндр	Клапаны, ЦПГ	5 оборотов	Ускорение	Ускорение 8 сегментов	$K_{(1+5)}^{(3+5)}$ $K_{(1+3)}^{(1)}$
3	Крейцкопф	КПМ КШМ	5 оборотов	Ускорение Перемещение	Ускорение 8 сегментов	$K_{(1+9)}^{(3+9)}$
4	Подшипник поршневой машины со стороны привода или компрессора	Вращающиеся детали вала, муфта	5 оборотов			$K_{(1+9)}^{(2+3)}$
5		Вал компрессора, вал привода	5 оборотов			$K_{(1+9)}^{(1)}$
6		Муфта	5 оборотов			$K_{(1+5)}^{(3+5)}$

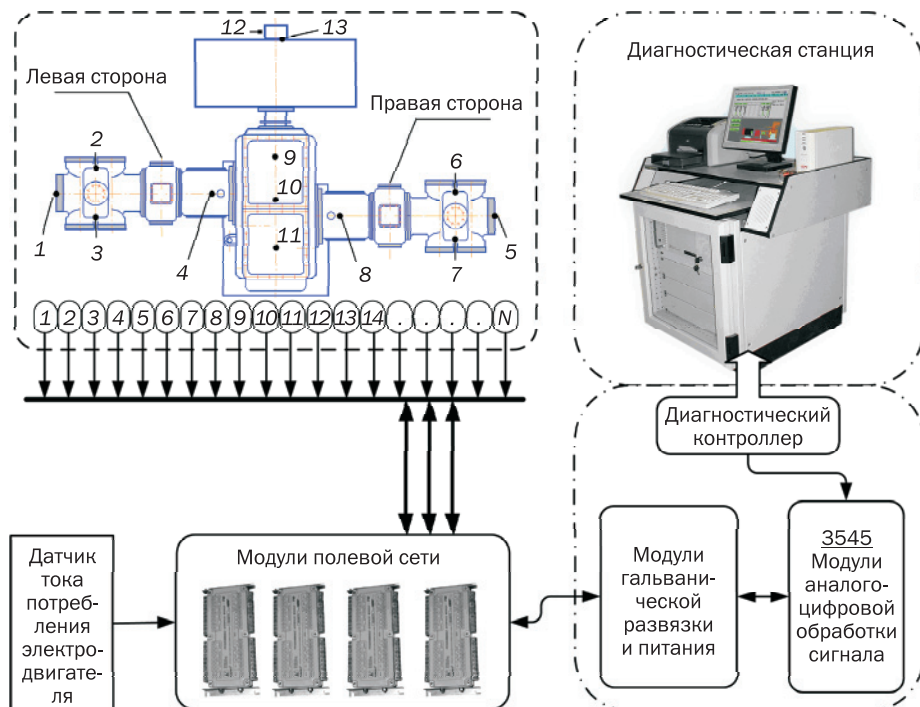


Рис. 4. Система мониторинга и диагностики: 1 – 11 – акселерометры; 12 – датчик угла поворота вала; 13 – акселерометр электродвигателя; 14, ..., N – каналы, используемые по мере необходимости

различных параметров виброакустических сигналов на изменение состояния различных узлов ПК (рис. 5 – 12).

Неисправности клапанов

Тренды вибропараметров системы мониторинга состояния ПК (рис. 5, участок 1) имеют большое количество выбросов, что свидетельствует о частом повышении уровня вибрации, являющемся следствием появления неисправностей клапанов и разрушения их деталей.

Проблема подбора клапанов для существующих технологических режимов работы ПК возникает в результате проведения модернизации установок, изменения технологических процессов. В существующих технологических условиях функционирования компрессоров могут использоваться клапаны различных производителей, однако, необходимо про-

водить их подбор под конкретный технологический режим.

За 5 месяцев эксплуатации клапанов с заводскими регулировками было заменено 17 клапанов (рис. 5, участок 2). После ревизии, ремонта всех клапанов, их регулировки примерно за четыре месяца до окончания наблюдения уровень вибрации существенно снизился и стал ниже предупредительного уровня. Разрушения клапанов прекратились (рис. 5, участок 3).

Тренды параметров сигналов систем *real-time* мониторинга в отличие от трендов периодического контроля эффективно отражают изменение состояния клапанов, наглядно отображают процесс возникновения и развития неисправностей, а также последствия действий персонала. На тренде (рис. 6) параметры сигнала адекватно отреагировали на из-

менения состояния клапанов. После их замены вибросостояние пришло в норму, абсолютное значение параметра сигнала снизилось более чем в 4 раза.

Неисправности коренных подшипников

Мультимодальный тренд параметра сигнала на рис. 7 свидетельствует о деградации вкладышей коренного подшипника. Система *real-time* мониторинга предупреждала об изменении состояния ПК и переходе его в состояние «ТПМ». После перехода субъекта в состояние «НДП» персонал своевременно провел ремонт. В момент пуска после ремонта виден процесс приработки.

Неисправности деталей кривошипно-ползунного механизма

Тренд параметров сигнала на рис. 8 показывает, что система *real-time* мониторинга при достижении ПК состояния «НДП» предупредила внезапную аварийную его остановку, указав причины – неисправности деталей КППМ.

По тренду параметра сигнала (рис. 9) с вибродатчика, установленного над штоком поршня, видно, что ПК был остановлен в состоянии «ТПМ» с предписани-

Табл. 3. Узлы и неисправности ПК, определяемые системой КОМПАКС®

№	Узел	Дефекты и неисправности
1	Компрессор в целом	Ослабление крепления корпусных составляющих
2		Дисбаланс вращающихся масс
3		Нарушение работы системы смазки
4	Цилиндро-поршневая группа	Износ колец
5		Износ гильзы
6		Ослабление крепления деталей
7		Недостаток смазки
8		Заброс конденсата (гидроудар)
9		Нарушение технологического режима
10	Шток	Износ сальников
11		Изгиб штока
12	Кривошипно-ползунный механизм	Износ баббитового слоя
13		Ослабление крепления деталей
14		Недостаток смазки
15		Увеличение зазора в сопряжении палец-ползун
16		Увеличение зазора в сопряжении палец-головка шатуна
17	Коренной подшипник	Износ баббитового слоя
18		Ослабление крепления
19	Клапан	Недостаток смазки
20		Поломка пружин, пластин
21		Недостаточная герметичность (пропуск, загрязнение)
22		Перегрузка (конденсат, гидроудар)
23		Нарушение технологического режима

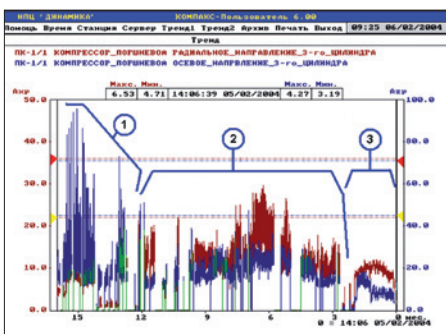


Рис. 5. Тренд вибрации клапанов

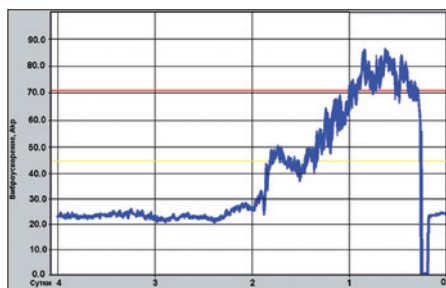


Рис. 6. Тренд вибрации клапанов

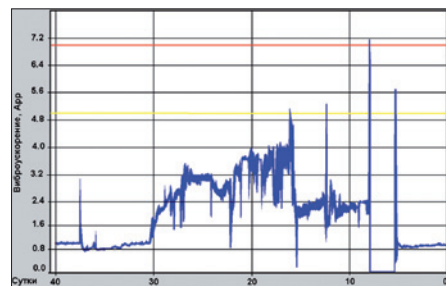


Рис. 7. Тренд вибрации подшипника

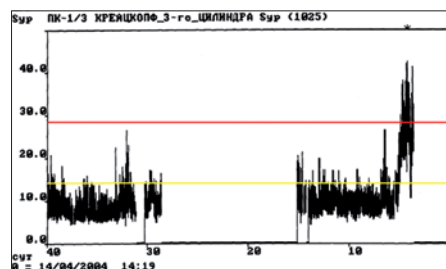


Рис. 8. Тренд вибрации крещкопфа

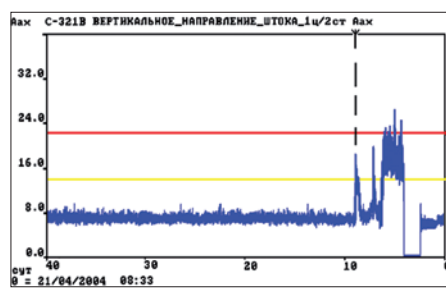


Рис. 9. Тренд вибрации штока

ем «Проверь крепление, проверь зазоры». После проведения ремонта – замены сальниковых уплотнений – состояние данного узла компрессора стало «Д».

Нарушение технологического режима

Одной из основных причин отказов ПК является нарушение технологического режима компримирования. Попадание конденсата или жидкости в полости сжатия приводит к возникновению гидроударов, что приводит к повышенным динамическим нагрузкам на узлы и детали компрессора и, как следствие, к преждевременным неисправностям. Тренд на рис. 10 отражает реакцию сигнала на попадание конденсата в полость сжатия. Поэтому по параметрам сигнала можно контролировать правильность ведения режима компримирования и предотвращать неожиданные отказы ПК.

Неисправности деталей цилиндропоршневой группы

На рис. 11 приведен классический мультимодальный тренд [3] параметра сигнала при возникновении и развитии неисправностей деталей ЦПГ. Система *real-time* мониторинга при достижении ПК состояния «НДП» предупредила внезапную аварийную остановку компрессора, указав причины – неисправность деталей ЦПГ.

Спектральный инвариант

Анализ гармонических составляющих амплитудно-частотного спектра вибрации корпуса ПК с датчиков, установленных на крышке цилиндра диагностируемой машины, и спектрального инварианта $K^{(1)}$ (1+3) показывает, что уровень спектрального инварианта $K^{(1)}$ (1+3) от 0,57 до 0,87 соответствует состоянию деталей ЦПГ «ТПМ» для машин типа «4М16-22,4/23-64», «2М10-11/42-60». Превышение уровня инварианта величины 0,87 соответствует состоянию деталей ЦПГ «НДП». Тренд спектрального инварианта, приведенный на рис. 12, показывает его реакцию на возникновение неисправностей деталей ЦПГ и представляется более устойчивым и чувствительным по сравнению с трендом на рис. 11.

Заключение

1. В известных системах мониторинга [31]
 - используемая методология реализует *on-line* технологию мониторинга прямых структурных и термодинамических (технологических) параметров (относительные смещения, давление, температура, вибрация), требует большого числа разнородных датчиков (до 12 на цилиндр) и выявляет малое число классов неисправностей, которое, как правило, не превышает числа датчиков и носит весьма общий, неконкретный характер;
 - отсутствие *автоматических экспертных систем постановки диагноза реального времени* приводит к большим статической и динамической ошибкам распознавания состояния вследствие наличия неисправностей, которые не отражаются в сигналах установленных датчиков, поэтому подобные системы проблематично использовать для ответственного оборудования;
 - применяется параллельная архитектура, что обуславливает существенную стоимость систем, большие затраты на датчики и кабель и, соответственно, на монтаж и обслуживание, что в итоге приводит к высокой стоимости владения и низкой эффективности применения.
2. В системе *real-time* мониторинга КОМПАКС®
 - методология *real-time* мониторинга и диагностирования основана на измерении параметров косвенных процессов (виброакустических колебаний), для чего устанавливается не более 5 датчиков на цилиндр, предусмотрено также измерение прямых структурных и термодинамических параметров;
 - реализованы алгоритмы *экспертной системы поддержки принятия решений реального времени с автоматическим определением* (постановкой диагноза в темпе измерения диагностических сигналов) более 23 неисправностей узлов ПК, степени их опасности и выдачи управленческих предпри-

- саний персоналу по проведению компенсирующих мероприятий;
- научно обоснованный период постановки диагноза позволяет получить величины статической и динамической ошибок распознавания состояния оборудования менее 5 %, что дает возможность осуществлять мониторинг состояния ответственного оборудования всех категорий и производственного объекта в целом;
- система *real-time* мониторинга КОМПАКС® имеет распределенную параллельно-последовательную структуру, требует во много раз меньше датчиков и кабеля и, соответственно, затрат на монтаж и обслуживание, обеспечивает низкую стоимость владения, перевод ПК на эксплуатацию по фактическому техническому состоянию и высокую экономическую эффективность внедрения.

Литература

1. Системы мониторинга агрегатов опасных производственных объектов. Общие технические требования / Стандарт ассоциации «Ростехэкспертиза», ассоциации нефтехимиков и нефтепереработчиков и НПС «РИСКОМ» (СА 03-002-05). Сер. 03. – М.: Химическая техника, 2005. – 42 с.
2. Мониторинг оборудования опасных производств. Порядок организации / Стандарт организации (СТО-03-002-08). Сер. 03. – В кн.: Мониторинг оборудования опасных производств. – М.: НПС «РИСКОМ», 2008, с. 25–63.
3. Костюков В. Н. Мониторинг безопасности производства. – М.: Машиностроение. 2002. – 224 с.
4. Костюков В. Н., Бойченко С. Н., Костюков А. В. Автоматизированные системы управления безопасной ресурсосберегающей эксплуатацией оборудования нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств (АСУ БЭР - КОМПАКС®) / Под ред. В. Н. Костюкова. – М.: Машиностроение. 1999. – 163 с.
5. Костюков В. Н., Науменко А. П. Практические основы виброакустической диагностики машинного оборудования / Учеб. пособие под ред. В. Н. Костюкова. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2002. – 108 с.
6. Костюков В. Н., Науменко А. П. Вибродиагностика поршневых компрессоров. – Компрессорная техника и пневматика. 2002. № 3. С. 30–31.
7. Науменко А. П. Исследование виброакустических параметров поршневых машин. – В кн.: Межд. науч.-техн. конф. «Двигатель – 2007», посвященная 100-летию школы двигателестроения МГТУ им. Н. Э. Баумана / Сб. науч. тр. – М: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007, с. 518–525.

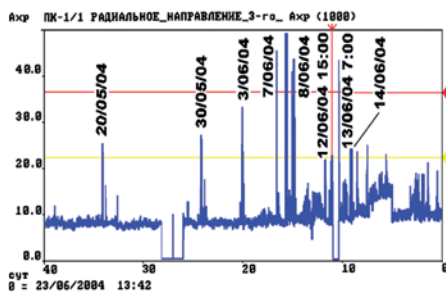


Рис. 10. Тренд при гидроударах

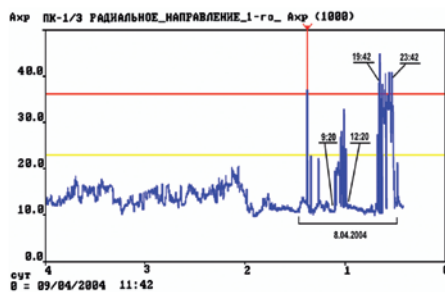


Рис. 11. Тренд вибрации цилиндра

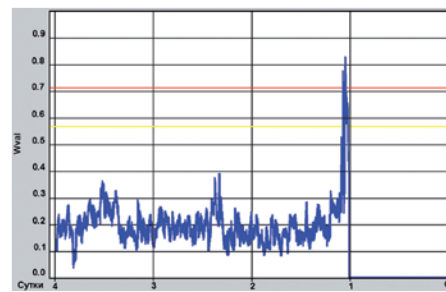


Рис. 12. Тренд спектрального инварианта:

8. Науменко А. П. Методология виброакустической диагностики поршневых машин. – В кн.: Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. «Машиностроение» / Спец. вып. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007, с. 85–95.
9. Костюков В. Н., Бойченко С. Н., Науменко А. П. Способ вибродиагностики технического состояния поршневых машин по спектральным инвариантам / Патент РФ № 2337341. – Бюл. изобр. 2008. № 30. – 18 с.
10. Костюков В. Н., Науменко А. П. Проблемы и решения безопасной эксплуатации поршневых компрессоров. – Компрессорная техника и пневматика. 2008. № 3. С. 21–28.
11. Костюков В. Н., Науменко А. П. Решения проблемы безопасной эксплуатации поршневых машин. – Сборка в машиностроении, приборостроении. 2009. № 3. С. 27–36, обложка – с. 1, 4.
12. Костюков В. Н., Науменко А. П. Нормативно-методическое обеспечение мониторинга технического состояния поршневых компрессоров. – Контроль. Диагностика. 2005. № 11. С. 20–23.
13. Костюков В. Н., Науменко А. П. Система контроля технического состояния машин возвратно-поступательного действия. – Там же. 2007. № 3. С. 50–59.
14. Костюков В. Н., Науменко А. П. Система мониторинга технического состояния поршневых компрессоров нефтеперерабатывающих производств. – Нефтепереработка и нефтехимия. 2006. № 10. С. 38–48.
15. Науменко А. П. Средства мониторинга поршневых компрессоров в реальном времени. – В кн.: 8-я Межд. конф. «НК и ТД в промышленности» / Программа и тезисы. докл. – М.: ИД «Спектр», 2009, с. 154–157.
16. Kostyukov V. N. Naumenko A. P. Condition monitoring of reciprocating machines. – In: COMADEM 2009 – 22nd Intern. Congress of Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management. – San Sebastian (Spain): Fundacion TEKNIER, 2009, p. 113–120.
17. Naumenko A. P. Real-time condition monitoring of reciprocating machines. – In: The 6th Intern. Conf. on Condition Monitoring and Machinery Failure Prevention Technologies. – Dublin (Ireland); 2009, p. 1202–1213.
18. Костюков В. Н., Науменко А. П., Бойченко С. Н. Способ вибродиагностики машин / Патент РФ № 2314508. – Бюл. изобр. 2008. № 1.
19. Schirmer A. G. F., Fernandes N. F., De Caux. J. E. Online Monitoring of Reciprocating Compressors. – In: NPRA Maintenance Conference. – San Antonio, 2004.
20. Leonard S. M. Increasing the reliability of reciprocating compressors on hydrogen services. – In: National Petroleum Refiners Association Maintenance Conf. – New Orleans: 1997.
21. Гриб В. В., Соколова А. Г., Еранов А. П. и др. Анализ современных методов диагностирования компрессорного оборудования нефтегазохимических производств. – Нефтепереработка и нефтехимия. 2002. № 10. С. 57–65.
22. Костюков В. Н. Мониторинг безопасности производства. – М.: Машиностроение. 2002. – 224 с.
23. Пластинин П. И., Дегтярева Т. С., Светлов В. А., Сячинов А. В. Автоматизированная система измерений, накопления и обработки данных при испытаниях поршневых компрессоров. – Компрессорная техника и пневматика. 1997. № 3–4 (16–17). С. 12–14.
24. Генкин М. Д., Соколова А. Г. Виброакустическая диагностика машин и механизмов. – М.: Машиностроение, 1987. – 288 с.
25. Костюков В. Н. Устройство для виброакустической диагностики механизмов периодического действия / А. с. СССР № 1343259. – Бюл. изобр. 1987. № 37.
26. Костюков В. Н. Способ виброакустической диагностики машин периодического действия и устройство для его осуществления / Патент РФ № 1280961. – Бюл. изобр. 1986. № 48.
27. Костюков В. Н. Обобщенная диагностическая модель виброакустического сигнала объектов периодического действия. – Омский науч. вестн. 1999. Вып. 6. С. 37–41.
28. Вешкурцев Ю. М., Костюков В. Н., Бойченко С. Н., Костюков А. В. Принципы построения измерительно-диагностических систем машин и оборудования. – В кн.: Актуальные проблемы электронного приборостроения / Труды Третьей межд. научно-техн. конф. АПЭП–96. – Новосибирск: НГТУ, 1996, т. 5, с. 81–86.
29. Гриб В. В., Жуков Р. В. Анализ виброакустических характеристик поршневых компрессоров. – Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2001. № 1.
30. Гриб В. В., Жуков Р. В. Особенности спектральной вибродиагностики поршневых компрессорных машин. – Компрессорная техника и пневматика. 2001. № 8. С. 30–32.
31. Костюков В. Н., Науменко А. П. Анализ современных методов и средств мониторинга и диагностики поршневых компрессоров. Часть 1. Системы on-line мониторинга. – В мире НК. 2010. № 1(47). С. 64–70.

Статья получена 13 февраля 2010 г.