

# **ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГАЗОВЫХ ПОРШНЕВЫХ КОМПРЕССОРОВ НА ОСНОВЕ МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ**

*А.П. Науменко (НПЦ «ДИНАМИКА», г. Омск, Россия)*

Снижение риска возникновения непредсказуемых остановок и аварийных ситуаций при эксплуатации поршневых машин (ПМ), к которым относятся поршневые компрессоры (ПК), компримирующие, в частности, вредные и опасные газы, насосы, многомиллионный парк автомобильных, тракторных, судовых и других транспортных двигателей внутреннего сгорания (ДВС), а также стационарные ДВС различного назначения, такие как дизель-компрессоры, дизель-генераторы, является одной из актуальных задач обеспечения безопасной жизнедеятельности современного мира.

Решение данной задачи связано не только с обеспечением достоверного диагноза, но и своевременного, который бы обеспечил безаварийную эксплуатацию с максимальным использованием ресурса заменяемых узлов и деталей, что можно реализовать только путем постановки диагноза с интервалом времени меньшим, чем время появления и развития неисправности. Для оборудования нефтеперерабатывающего, химического, газоперерабатывающего комплексов (НХК) этот интервал для различных типов и назначений оборудования может лежать в пределах от нескольких секунд до минут, часов, дней.

Поршневые машины (ПМ), являются весьма сложными объектами диагностики. Наиболее перспективным и обеспечивающим наибольшую эффективность диагностики без вмешательства в конструкцию ПМ, что требуют Правила безопасной эксплуатации оборудования опасных производств Ростехнадзора, и, в частности, ПБ 03-582-03, является виброакустический (ВА) метод технической диагностики.

Решение задачи безаварийной, безопасной эксплуатации парка ПМ, в частности, ДВС и ПМ НХК возможно лишь на основе разрешения научных проблем разработки и практического использования методов и принципов (технологии) контроля технического состояния (ТС), диагностирования и мониторинга ПМ путем распознавания технического состояния объектов по исходной информации, содержащейся в ВА сигнале.

Поршневая машина, будь то ПК или ДВС, представляет собой сложную газо-механическую систему и является мощным и многофакторным источником ВА сигналов, которая имеет три основных источника:

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

2. Газогидродинамические процессы – силы давления газов, протекание газа при впуске и выпуске, впрыск топлива, течение жидкости в системах;

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

Для повышения достоверности результатов диагностирования необходимо учитывать следующие особенности ВА сигналов, возникающих в ПМ:

1. Все существующие источники ВА колебаний можно с достаточной степенью условности разделить на импульсные (ударные) вынуждающие воздействия (например, взаимодействие зубчатых пар), полигармонические вынуждающие воздействия (например, момент несбалансированных масс) и шум, возникающий вследствие трения контактирующих деталей или газогидродинамики.

1. Колебания от несбалансированных вращающихся и поступательно движущихся масс, газогидродинамики, а также ударных импульсных воздействий приводят к нелинейным взаимодействиям этих трех видов колебаний еще на этапе формирования силовых воздействий на конструкцию машины.

2. Нелинейно взаимосвязанные силовые воздействия приводят к взаимной модуляции ВА сигналов;

3. Импульсные (ударные) вынуждающие воздействия представляются последовательностью периодически повторяющихся

ВА импульсов с частотой повторения, равной или кратной частоте вращения коленчатого вала;

4. Отдельно взятый из последовательности ВА импульс представляет собой реакцию конструкции на ударное воздействие и имеет вид осциллирующего затухающего колебания с частотой собственных колебаний контактирующих деталей и/или канала распространения ВА колебаний;

5. Амплитуда ВА импульса резко изменяется при увеличении зазоров (изменении структурных параметров) вследствие изменения энергии соударения;

6. Колебания, вызванные ударом, могут быть с достаточной точностью идентифицированы по фазе циклограммы работы ПМ (углу поворота коленчатого вала). Смещение ВА импульсов в ту или иную сторону по фазе свидетельствует об аномалиях в работе диагностируемого узла (об увеличении зазоров, нарушении регулировок и т. д.);

7. Энергия колебаний при распространении их по конструкции сопровождается уменьшением уровня полезного сигнала, несущего информацию о ТС узла, поэтому регистрация ВА сигналов должна производиться как можно ближе к источнику возбуждения колебаний в диагностируемом узле;

8. В целом ВА колебания могут быть представлены в виде смеси периодических и шумовых составляющих (ШПС) [4, 39].

9. Такие параметры ВА колебаний, как ускорение, скорость, перемещение, а также их изменение во времени, являются ортогональными диагностическими признаками неисправностей, что доказано в работах В.Н. Костюкова [4, 39].

10. Указанные закономерности формирования ВА колебаний требуют использования современных методов аналоговой и цифровой обработки сигналов, включающих методы теории детерминированных и стохастических процессов, спектрально-корреляционный и когерентный анализ.

Сравнительно простым в эксплуатации является оценка состояния ПМ по общему уровню ВА сигнала. Увеличение глубины диагностирования достигается более сложными алгоритмами обработки сигналов [6,39] – частотно-временной селекцией сигнала (когерентный анализ), анализом параметров сигнала в различных диапазонах частот, оценкой статистических и взаимные характеристик параметров ВА процессов и др.

В ПМ можно выделить ряд механизмов, узлов и групп деталей, которые имеют специфические особенности при формировании ВА сигналов. Рассмотрим некоторые из них.

Детали *цилиндропоршневой* группы (ЦПГ) характеризуются такими структурными параметрами как зазоры между поршнем и кольцом по высоте канавки, в стыках поршневых колец, между цилиндром и поршнем [7, 9, 30, 44, 45, 48].

На рабочем режиме или при прокручивании ПМ происходит перекладка поршня в зазоре с одной стороны гильзы на другую с высокой скоростью. В результате удара возникают упругие колебания стенок гильзы и цилиндра, которые являются источником ВА колебаний. С изменением зазоров в сопряжениях поршень–гильза различных типов ПМ при начальных и предельных зазорах энергия ВА колебаний интенсивно изменяется в достаточно узких полосах частот, которые определяются резонансными частотами ВА каналов корпуса ПМ.

При использовании временной селекции амплитуда ВА импульса достаточно информативна для оценки зазоров, однако зависимость фазового параметра ВА импульса от зазора в сопряжении поршень–гильза при работе ПМ на различных режимах является иногда более чувствительным ДП, особенно при прокручивании ПМ.

Таким образом, выделяя информативные параметры ВА сигнала по времени и частоте, измеряя их энергию, максимальную амплитуду, фазовые значения, можно оценить величину зазора между поршнем и гильзой цилиндра и некоторые другие структурные параметры, характеризующие состояние деталей ЦПГ ПМ. При этом для повышения устойчивости измерений весьма эффективным является использование кепстрального анализа и лифтрации [; ].

Параметры ВА колебаний при оценке состояния поршневых колец являются функцией двух переменных – степени износа и скоростного режима декомпрессированной ПМ. При этом, с увеличением износа колец ВА импульсы формируются при меньшей частоте вращения вала [9].

Структурными параметрами подшипниковых узлов *кривошипно-шатунного механизма* (КШМ) являются зазоры в подшипниках коленчатого вала и во втулке поршневой головки ша-

туна, осевой зазор в коренных подшипниках. Эти параметры определяют несущую способность подшипникового узла и давление в слое масла, условия трения и тепловыделения, расход масла [7, 9, 44, 45, 48].

На рабочих режимах вследствие изменения нагрузки на подшипники коленчатого вала центр шейки перемещается по сложной траектории. Вместе с тем во время импульсного изменения линейной скорости вследствие воздействия процесса сгорания в сопряжении появляются удары, вызывающие деформации и ударное возбуждение ВА колебаний от соударяющихся деталей. Скорость соударения и, следовательно, импульс удара и характеристики ВА колебаний зависят в основном от зазора в подшипнике, характера индикаторной диаграммы и соотношения возмущающих сил в целом.

Результаты исследований различных ДВС показывают, что среднее значение максимальной амплитуды ВА импульса в диапазоне частот, генерируемого шатунными и коренными подшипниками, с изменением зазора от начального до предельного увеличивается в от 2 до 5 раз.

При диагностировании механизма *газораспределения* к структурным параметрам относят зазоры между направляющими втулками клапана и его стержней, в подшипниках распределительного вала, "между"клапаном"и"приводом"клапана"[7,9,44,45,48]. С изменением теплового зазора существенно изменяется интенсивность вибрации крышки головки блока в области проверяемого клапана. Для выделения ВА импульсов, формируемых посадкой и подъемом клапанов, необходимо производить временную селекцию в соответствии с фазами газораспределения.

К основным диагностическим параметрам *топливной аппаратуры* ДВС следует отнести цикловую подачу топлива  $\Delta g_{ц}$  и угол опережения (зажигания) начала подачи топлива  $\varphi_{н}$ . При различных параметрах работы топливной аппаратуры (давление начала впрыска,  $\Delta g_{ц}$ ,  $\varphi_{н}$ ) вибрационные характеристики форсунки существенно изменяются и на отдельных режимах тесно связаны с показателями работы топливной аппаратуры.

Сравнение характеристики топливоподачи и ВА колебаний форсунки при различных подачах показывает, что огибающая ВА

импульса форсунки хорошо согласуется с осциллограммами подъема иглы форсунки, давления в трубопроводе высокого давления, характеризующего закон подачи. Энергия ВА колебаний наиболее активно и закономерно изменяется при изменении регулировок топливного насоса [; ]. Изменение  $\Delta g_{ц}$  и  $\varphi_n$  приводит к изменению продолжительности, а также интенсивности ВА колебаний в несколько раз [9].

*Индикаторная* диаграмма ПМ несет большую информацию о рабочем процессе, ТС и нагрузке ПМ. Получение диаграммы традиционными средствами с помощью датчиков давления, устанавливаемых в полость камеры сгорания или сжатия, отличается большой трудоемкостью, связанной, например, для дизельного двигателя, со сверлением отверстия в головке блока цилиндров. В то же время при обоснованном выборе места установки пьезоакселерометра на блок головки цилиндров ВА сигнал адекватно характеризует индикаторную диаграмму. При этом количественные характеристики индикаторной диаграммы пропорциональны параметрам ВА сигнала с точностью до коэффициентов, учитывающих конструктивные особенности ПМ, свойства материала головки, "войства" пособия "крепления" пьезоакселерометра [5, "48]. Измерение и анализ параметров ВА сигнала, генерируемого силами давления газов, позволяет в эксплуатационных условиях определять жесткость протекания рабочего процесса [9].

Вследствие того, что ПМ имеет множество ТС, фактически, при диагностировании приходится разбивать это множество на конечное число распознаваемых классов состояний, объединив в каждом подклассы, обладающие одинаковой физической природой. Например, к одному классу можно отнести состояние ПМ, характеризуемое дефектами клапанного механизма, если в качестве признаков принять характеристики ВА импульсов, полученные в зоне клапанов в определенный момент по углу поворота вала. Этот класс состояний характеризуется не только единым признаком состояния, но и единым методом диагностирования. На основании статистического анализа отказов объекта диагностирования для каждого класса ТС формируются эталоны (усредненные для данного класса значения ДП).

Для формирования системы ДП и эталонов применяются диагностические модели объекта, которые существенно облегчают

процесс выделения ДП в измеренном сигнале. Обобщенная диагностическая модель ВА сигналов для класса объектов [3; ] позволяет не только выбрать ДП, связанные со структурными параметрами объекта, но и адекватно выбрать методы обработки ВА сигналов. Особенности формирования ВА сигналов в ПМ требуют детализации диагностической модели с целью выявления источников диагностического сигнала, формируемого силовыми взаимодействиями структурных единиц объекта и изменениями структурных параметров.

Проведенный анализ результатов теоретических и практических исследований показывает, что источниками ВА активности машин и механизмов являются различные силовые, чаще всего, статистически независимые силовые воздействия – импульсные (ударные)  $F_s$ , полигармонические  $F_g$ , шумовые  $F_n$ .

Нелинейные взаимовлияния в механической системе взаимодействующих элементов приводят к перемножению и суперпозиции всех силовых взаимодействий  $F_g, F_s, F_n$  с весовыми функциями в виде импульсных характеристик  $h_g^s, h_s^n, h_n^g$ , соответствующих каждой паре силовых воздействий:

$$F_g^s = F_s F_g h_g^s, F_s^n = F_n F_s h_s^n, F_n^g = F_g F_n h_n^g.$$

При этом, например, импульсная характеристика  $h_g^s$  определяет степень взаимовлияния  $F_g$  и  $F_s$ ,  $h_s^n$  – степень взаимовлияния  $F_s$  и  $F_n$ ,  $h_n^g$  – степень взаимовлияния  $F_n$  и  $F_g$ . В результате формируются три группы силовых воздействий на элементы, детали, узлы машины:

$$F_{g\Sigma} = F_g + F_g F_n h_n^g + F_s F_g h_g^s,$$

$$F_{s\Sigma} = F_s + F_n F_s h_s^n + F_s F_g h_g^s, F_{n\Sigma} = F_n + F_n F_s h_s^n + F_g F_n h_n^g.$$

Импульсные (ударные) вынуждающие воздействия  $F_{s\Sigma}$  возбуждают колебания  $S_{s\Sigma}$  на собственных (резонансных) частотах колебаний корпуса ПМ, элементов, деталей, узлов с учетом импульсной характеристики  $h_s(t)$ , гармонические вынуждающие воздействия  $F_{g\Sigma} - S_{g\Sigma}$  с  $h_g(t)$ , шум от трения, газогидроакустический шум  $F_{n\Sigma} - S_{n\Sigma}$  с  $h_n(t)$ . Математически колебательные процессы можно описать следующим образом:

$$\|S_{\Sigma}(t)\| = \left\| \begin{array}{cc} S_s(t)h_s(t) \cdot [0,5 + S_n^s(t)] & S_s(t)h_s(t) \cdot [0,5 + S_g^s(t)] \\ S_g(t)h_g(t) \cdot [0,5 + S_n^g(t)] & S_g(t)h_g(t) \cdot [0,5 + S_s^g(t)] \\ S_n(t)h_n(t) \cdot [0,5 + S_s^n(t)] & S_n(t)h_n(t) \cdot [0,5 + S_g^n(t)] \end{array} \right\|$$

Анализ механизма формирования ВА сигнала показывает, что кроме источника ВА колебаний на параметры этих колебаний влияет передающая среда, которая включает пути (элементы) распространения колебаний до места приема колебаний, элементы передачи колебаний первичному преобразователю и свойства непосредственно чувствительного элемента первичного преобразователя (вибродатчика). С учетом импульсной характеристики канала преобразования, усиления  $h_{tr}(t)$  получим выражение, описывающее электрический сигнал на выходе датчика, как эквивалент шумовых и периодических составляющих (ШПС) [4,39] ВА сигнала:

$$\|U_{\Sigma}(t)\| = \|h_{tr}(t)\| \cdot \|S_{\Sigma}(t)\| =$$

$$= \left\| \begin{array}{ccc} h_{str}(t) & 0 & 0 \\ 0 & h_{gr}(t) & 0 \\ 0 & 0 & h_{nr}(t) \end{array} \right\| \times \left\| \begin{array}{cc} S_s(t)h_s(t) \cdot [0,5 + S_n^s(t)] & S_s(t)h_s(t) \cdot [0,5 + S_g^s(t)] \\ S_g(t)h_g(t) \cdot [0,5 + S_n^g(t)] & S_g(t)h_g(t) \cdot [0,5 + S_s^g(t)] \\ S_n(t)h_n(t) \cdot [0,5 + S_s^n(t)] & S_n(t)h_n(t) \cdot [0,5 + S_g^n(t)] \end{array} \right\|$$

где  $h_{str}(t)$ ,  $h_{gr}(t)$ ,  $h_{nr}(t)$  - импульсные характеристики канала от места приема ВА сигнала до преобразования его в электрический сигнал для свободных затухающих, вынужденных незатухающих, широкополосных и случайных узкополосных колебаний ВА канала соответственно.

Таким образом, ВА сигнал в ПМ представляет собой ШПС и является результатом линейных и нелинейных силовых взаимодействий структурных единиц объекта и изменений структурных параметров. В результате формируется суперпозиция полигармонических, ударных и шумовых составляющих ВА сигнала. В дальнейшем, ШПС обрабатываются методами аналоговой и цифровой обработки сигналов, включающими методы теории детерминированных и стохастических процессов (Рисунок 1).



Основными задачами при создании системы технической диагностики являются выбор метода диагностирования и построение алгоритма определения ТС.

Разработка метода диагностирования включает группу последовательных задач:

1. Описание объекта диагностирования минимальной совокупностью параметров состояния и диагностических признаков;
2. Выявление наиболее чувствительных к распространенным дефектам ДП;
3. Разделение технических состояний на классы.

Одновременно решаются задачи измерения ДП, обеспечения контролепригодности объекта диагностики.

При разработке и применении алгоритмов диагностирования ПМ можно выделить следующие подходы. Первый из них состоит в том, что измеренные значения параметров диагностируемой ПМ сразу же сравниваются со значениями тех же параметров, измеренных ранее на той же ПМ и этом же режиме. В результате сравнения вычисляются отклонения измеряемых параметров, а все дальнейшие операции диагностирования с привлечением соответствующих математических моделей проводят с указанными отклонениями.

Второй подход состоит в том, что по измеренным на диагностируемой ПМ значениям параметров вычисляют с помощью математической модели значения других, не измеряемых непосредственно параметров, которые сравниваются со значениями, полученными ранее по таким же или аналогичным моделям для той же модели ПМ и на том же режиме, и на основании их анализа принимаются диагностические рекомендации и решения.

Третий подход заключается в накоплении статистической информации о дефектах и параметрах диагностических сигналов, что дает возможность установления взаимосвязи конкретных дефектов с характером отклонения от эталонной зависимости и изменениями диагностических признаков [4, 33/37, 39, 42, 43\_

В ГОСТ ИСО 2954-97 [8], текст которого является аутентичным текстом ИСО 2954-75, изложены основные требования к средствам измерения вибрации машин с возвратно-поступательным и вращательным движением на невращающихся частях и является «метрологическим обеспечением стандартов

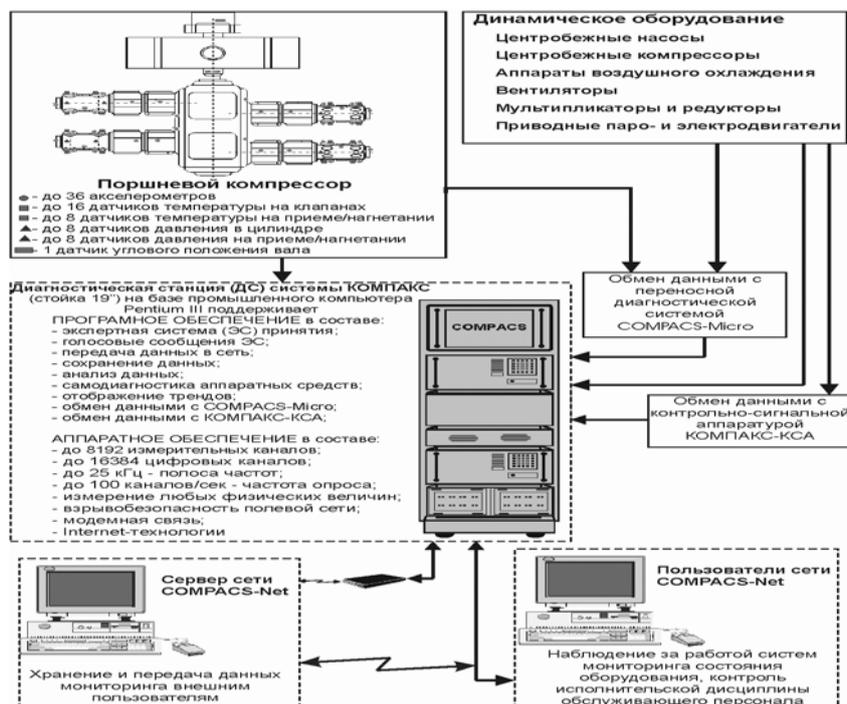
ИСО серии 10816». В [8] в качестве измеряемого параметра принята виброскорость в диапазоне частот 10...1000 Гц. Однако следует признать, что сегодня данный документ [8], которому уже фактически более 30 лет, устарел и не может быть принят в качестве нормативного документа при разработке системы, которая измеряет вибрацию ПМ. Тем более, что требования данного документа противоречат требованиям другого стандарта – ИСО 10816-6 в части номенклатуры измеряемых параметров.

Современный уровень развития информационно-измерительной техники дает возможность организовать сбор и обработку данных синхронно и асинхронно по множеству каналов с привязкой к углу поворота вала в заданном диапазоне частот – от долей и единиц герц до нескольких мегагерц. Для вычисления ДП целесообразно использовать мощности компьютеров и цифровых сигнальных процессоров. Однако определяющим фактором при разработке информационно-вычислительной системы мониторинга ПМ является стоимость. При этом, как правило, основной проблемой является обеспечение взрывобезопасности системы. Учитывая, что скорость развития неисправностей ограничена, исходя из необходимого периода опроса измерительных каналов [39] целесообразным для обеспечения мониторинга состояния ПМ представляется использование последовательно-параллельной распределенной структуры системы. В такой системе проще и дешевле обеспечить взрывобезопасность измерительных цепей. Наиболее оптимизированной с этих точек зрения (стоимость одного канала, взрывобезопасность) является автоматизированная система безопасной ресурсосберегающей эксплуатации оборудования нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств (АСУ БЭР) КОМПАКС® [4], реализующая стратегию минимальной стоимости систем диагностики и мониторинга.

Многолетний опыт разработки, внедрения и эксплуатации систем мониторинга агрегатов и комплекса агрегатов опасных производственных объектов в реальном времени без их остановки, разборки и вывода из эксплуатации [4,39] позволил разработать требования к системам мониторинга [47]. Общие технические требования «Системы мониторинга агрегатов опасных производственных объектов» (СА 03-002-04) разработаны НПЦ «ДИНА-

МИКА» и Ассоциацией «Ростехэкспертиза» и приняты в качестве стандарта Ассоциации. После утверждения данного стандарта Ассоциацией документ был согласован с Ростехнадзором и Ассоциацией нефтепереработчиков и нефтехимиков. Таким образом сегодня в России впервые в мире действует нормативный документ, определяющий требования к комплексным системам мониторинга, соответствующим современным требованиям и уровню развития науки и техники, которые предназначены для оценки технического состояния (диагностики) и прогноза ресурса оборудования опасных производственных объектов в реальном времени без их остановки, разборки и вывода из эксплуатации.

Рисунок 2 – Структура системы мониторинга



Система (Рисунок 2) включает *диагностическую станцию*<sup>®</sup> (ДС) с комплектом аппаратуры, обеспечивающим измерение параметров любых физических величин, передачу измеренной и обработанной информации в диагностическую сеть Compacs-Net<sup>®</sup> через модем или сетевое оборудование, вывод речевой информации по результатам работы экспертной системы поддержки принятия решений и дальнейшем управлении, сохранение информации по результатам работы системы, сохранение и отображение трендов ДП, взрывобезопасность полевой сети и другие функции [39]. В "диагностическую станцию" может передаваться информация из переносной диагностической системы COMPACS<sup>®</sup>-micro и контрольно-сигнальной аппаратуры КОМПАКС<sup>®</sup>-КСА.

Одной из важнейших задач при построении системы мониторинга является выбор мест установки датчиков. В ИСО 10816-6 [3] предлагается устанавливать датчики вибрации на корпус машины и проводить измерения в трех направлениях. Однако, контроль вибрации в этих точках позволяет оценить лишь состояние крепления ПМ к фундаменту и, в какой-то части, общее вибро состояние. При этом большое число неисправностей оказываются неконтролируемыми. На основании опыта эксплуатации систем мониторинга ПК и анализа неисправностей и отказов ПК определены такие места, контроль параметров вибрации в которых позволяет выявить основные неисправности ПК [35, 36].

*Диагностическая станция*<sup>®</sup> стационарной системы позволяет принимать аналоговые и цифровые данные и выдавать цифровые управляющие сигналы по 8192 дифференциальным каналам. Скорость опроса в зависимости от соотношения числа каналов, измеряющих статические и динамические величины, достигает до 100 каналов в секунду. При этом каждые 90 секунд значения диагностических признаков сохраняются в базе данных и могут быть отображены в виде 12-часовых, 4-суточных, 40-суточных, годовых и 9-летних трендах. Полевая сеть содержит измерительные модули с функцией аналого-цифровой обработки измеренных сигналов и датчики различных физических величин. Расстояние от модулей до ДС может достигать 1000 м, а от датчиков до модулей – 500 м. Аппаратура полевой сети может располагаться во взрывоопасной зоне.

В системах КОМПАКС® для мониторинга состояния оборудования в зависимости от решаемых диагностических задач используются следующие параметры: виброускорение; виброскорость; виброперемещение; температура; давление; радиальный зазор; ток потребления; частота вращения вала; уровень жидкости (конденсата); сигнал акустико-эмиссионного датчика; параметры переменного, постоянного тока (например, сигнал 4-20 мА) и напряжения и др.

Переносная диагностическая система КОМПАКС®-micro [39] используется для мониторинга состояния оборудования неохваченной стационарной системой, а также для выявления фундаментальных причин отказов оборудования.

Контрольно-сигнальная аппаратура КОМПАКС®-КСА [39] может использоваться для контроля состояния отдельно расположенного машинного оборудования, требуемое количество датчиков для которого не превышает 32.

Программно-аппаратные возможности системы КОМПАКС® позволяют проводить спектральный анализ временных реализаций и их огибающих. Экспертная система для анализа спектральных составляющих обычно использует 16384 линии спектра сигнала. Имеется возможность вычислять точные значения оборотной частоты и проводить гармонический анализ, что особенно важно для ПМ [43], в вибросигнале с которых обычно присутствуют гармонические составляющие кратные частоте вращения вала. В режиме АНАЛИЗ системы КОМПАКС® можно проводить кепстральный анализ и исследовать фазовый портрет сигналов.

Завершающим элементом системы диагностирования является подсистема принятия решения, которая по значениям параметров диагностирования производит оценку ТС ПМ и его элементов (постановку диагноза) с использованием различных критериев.

Анализ циклограммы работы ПМ, исследования вибросигналов в различных точках ПМ и некоторых других параметров, характеризующих работу ПМ, позволили разработать экспертную систему поддержки принятия решения системы КОМПАКС®, которая основывается на анализе параметров физических процессов характеризующих работу машин (давление, температура про-

дукта и т.п.) и сопровождающих (вибрация, температура узлов) работу машин.

В ИСО 10816-6 определены требования по среднеквадратическим значениям виброперемещения, виброскорости и виброускорения. Однако эти величины относятся только к вибрации корпуса ПК. На основе анализа параметров временной реализации вибросигнала [36,3: ,40] разработаны нормы и предельные значения параметров ВА сигнала.

Приняты три основные градации рекомендаций, определяющие конкретные действия персонала:

- ✓ **ДОПУСТИМО (Д)** – допускается длительная практически без ограничений эксплуатация компрессора;
- ✓ **ТРЕБУЕТ ПРИНЯТИЯ МЕР (ТПМ)** – техническое состояние ПМ требует принятия мер по предотвращению ухудшения её состояния, поэтому необходимо принять все меры по улучшению состояния ПМ, путем выполнения указаний экспертной системы поддержки принятия решений;
- ✓ **НЕДОПУСТИМО (НДП)** - техническое состояние ПМ не допускает её дальнейшую эксплуатацию и необходимо либо остановить ПМ и начать её ремонт, либо оперативно выполнить действия по кардинальному улучшению её состояния.

Экспертная система проводит анализ параметров временной реализации физических величин и при достижении порогов **ТПМ** или **НДП** окрашивает параметр соответственно в желтый или красный цвета (Рисунок 3), выводит на экран ДС текстовое сообщение и через акустический канал – речевое сообщение рекомендательного характера о принятии необходимых мер для снижения значения физической величины.

Анализ значений измеренных параметров физических величин по углу поворота вала, т.е. частотно-временная селекция сигналов, позволяет повысить точность постановки диагноза. Разработанные нормы и предельные значения физических величин, в частности, для вибропараметров (Рисунок 4), надежно определяют состояние машины [3: ]. Эти нормы также имеют градации **Д**, **ТПМ** и **НДП**. Частотно-временная селекция сигналов и синхронная обработка существенно помогают обнаружить фундаментальные причины отказов и неисправностей.

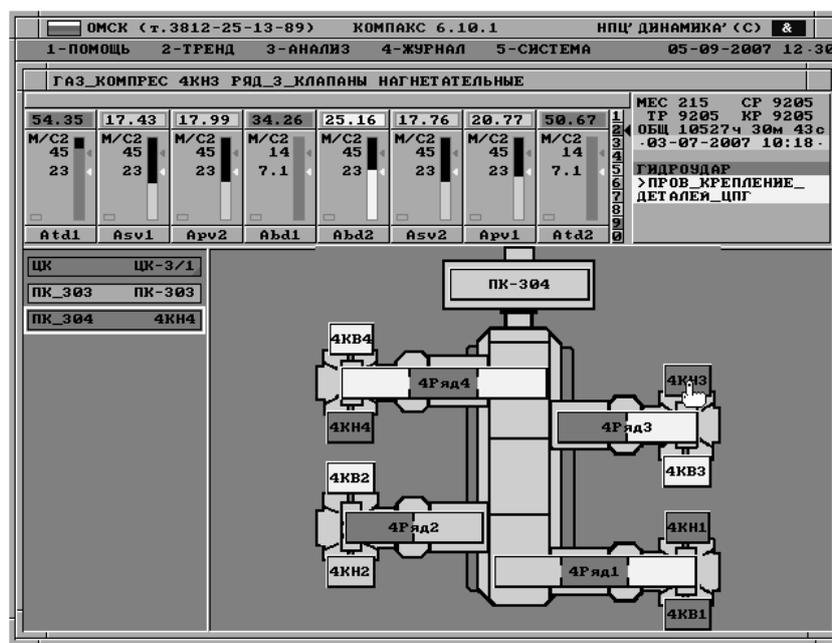
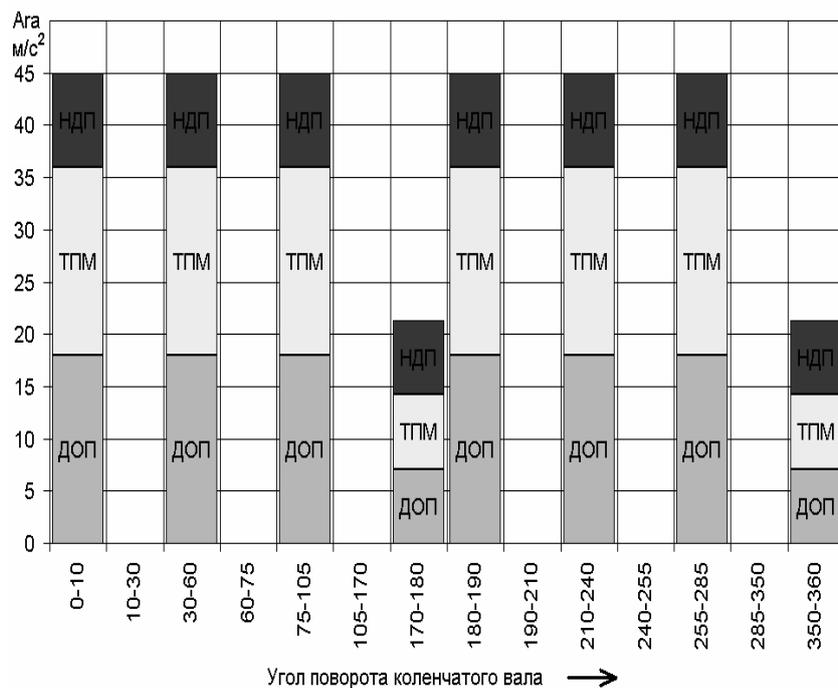


Рисунок 3 – Отображение состояния поршневого компрессора – экран МОНИТОР системы КОМПАКС®

Система КОМПАКС® сохраняет 12-часовые, 4-суточные, 40-суточные, годовые и 9-летние тренды измеряемых параметров сигналов и диагностических признаков. Экспертная системы проводит анализ скорости изменения трендов, абсолютные значения которых нормированы для различных параметров сигналов и диагностических признаков, и выдает соответствующие предписания персоналу [39].

Выделение огибающей ВА сигнала с датчиков, установленных в различных точках ПМ, позволяет наглядно представлять процессы, происходящие в ПМ. Особенно эффективно огибающая работает при ее синхронизации с угловым положением коленчатого вала [4, 34]. Для выделения огибающей используются специально разработанные алгоритмы, позволяющие получать сигнал, несущий максимально возможную информацию о состоянии узлов и деталей ПМ.



**Рисунок 4 – Нормы вибропараметра в зависимости от угла поворота вала**

Измерение технологических параметров ПК, например, температуры и давления на приеме-нагнетании, позволяет надежно следить за технологическим режимом работы ПК, предотвращая появление неисправностей вследствие нарушения технологического режима.

Определение текущего состояния объекта мониторинга является главной задачей теории и практики распознавания образов. В настоящее время в качестве основы для создания базы образов, соответствующих конкретным техническим состояниям ПМ, выступает практический опыт диагностирования неисправностей ПМ [33,37,38,40,43]. Предпосылками для разработки методов и методик диагностирования является достаточно большой опыт постановки диагнозов для ротационного оборудования. Один из

методов, реализующих данный подход, - синхронная гребенчатая фильтрация во временной и частотных областях [46]. В частности, использование спектральной матрицы позволяет практически со 100 процентной вероятностью определять дефекты и неисправности клапанов ПК [35,39]. Автоматическая диагностика состояния ПК позволяет доступно и наглядно отображать состояние машины на экране МОНИТОР системы КОМПАКС® (Рисунок 3).

Одним из источников быстрого разрушения ПК может быть заброс конденсата или жидкости в полость нагнетания, что приводит к возникновению гидроударов, последствия от которых могут быть катастрофическими. Обычно для предотвращения образования конденсата используют сепараторы и измерение уровня конденсата в специальных емкостях. К датчикам уровня конденсата предъявляются специфические с точки зрения рабочей среды и надежности. В системе КОМПАКС® используются специально разработанные датчики уровня, работающие в водородосодержащей среде [4]. Система КОМПАКС® контролирует уровень конденсата, температуру и давление на приеме, что позволяет надежно защитить ПК от возникновения гидроударов.

Результаты мониторинга состояния оборудования в системе КОМПАКС® выводятся на экран МОНИТОР (Рисунок 3). На экране отображается символическое обозначение оборудования (объектов) и узлов (субъектов), мониторинг ТС которых проводит система. По результатам работы экспертной системы соответствующий субъект окрашивается в зеленый, желтый или красный цвета, что соответствует состояниям диагностируемого узла **ДОПУСТИМО** для дальнейшей эксплуатации, **ТПМ** или **НДП**, при этом курсор на экране автоматически устанавливается на наихудший с точки зрения ТС субъект. При изменении состояния субъекта из **ДОПУСТИМО** в **ТПМ**, или из **ТПМ** в **НДП**, или других изменениях состояния объекта мониторинга система КОМПАКС® выдает речевое сообщение, которое будет регулярно повторяться до момента его квитирования. Кроме этого на экран выводится текстовое сообщение – результат постановки диагноза. Изменение состояния объекта мониторинга инициирует сохранение 12-часовых и 4-суточных трендов и временной реализации сигнала, что позволяет в дальнейшем при необходимости

уточнять постановку диагноза. Результаты постановки диагнозов различным объектам фиксируются в ЖУРНАЛЕ МЕХАНИКА-ЭЛЕКТРИКА, что дает возможность при необходимости исследовать историю изменения состояния оборудования. Сетевые технологии обеспечивают сбор информации с различных диагностических станциях на сервере, а также доступ пользователей сети Compac-Net<sup>®</sup> к информации, сохраняемой на сервере, и к текущим и архивным данным ДС.

В 2007 г. система КОМПАКС<sup>®</sup> осуществляла мониторинг технического состояния более 35 ПК на нефтегазоперерабатывающих заводах в городах Астрахани, Ачинске, Бургасе, Волгограде, Омске, Саратове, Сызрани и др. Под контролем системы эксплуатируются как компрессоры отечественного производства - 4М16М-45/35-55, 4М16М-45/17-37, 2ГМ16-20-42/60, 2М10-11-42/60, 5Г-600-42/60, 205ВП-16/70, 305ВП-16/70 и др., так и импортные - ВДСВ-30/30/20/20x16 (Worthington), 4HF/2 серии HF (Nuovo Pignone), 2TV2 (Neuman & Esser).

Таким образом, многолетние исследования, опыт разработки, внедрения и эксплуатации систем диагностики и мониторинга технического состояния ПК позволили в большей части разрешить научные проблемы разработки и практического использования методов и принципов (технологии) контроля технического состояния, диагностирования и мониторинга ПМ путем распознавания технического состояния объектов по исходной информации, содержащейся в ВА сигнале. Так, практически решены следующие проблемы:

1. Разработан набор диагностических признаков, соответствующих видам технического состояния, основным неисправностям и технологическому режиму эксплуатации поршневых машин, возникающих как по отдельности, так и совместно;

2. Определены нормы диагностических признаков, соответствующих видам технического состояния и степеням опасности неисправностей;

3. Разработаны автоматизированные системы мониторинга ТС поршневых машин, обеспечивающие безаварийную их эксплуатацию, и осуществлено промышленное их внедрение на ряде предприятий страны и за рубежом.

## ЛИТЕРАТУРА

1. ISO 10816-6:1995 Mechanical vibration. Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts. Part 6. Reciprocating machines with power ratings above 100 kW.
2. Автоматизированные системы управления безопасной ресурсосберегающей эксплуатацией оборудования нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств (АСУ БЭР - ) / В.Н. Костюков, С.Н. Бойченко, А.В. Костюков; Под ред. В.Н. Костюкова. - М.: Машиностроение, 1999. – 163 с.
3. Аллилуев В.А., Соловьев В.И. Исследования виброакустических каналов цилиндропоршневой группы двигателя внутреннего сгорания. – «Записки ЛСХИ», 1974, т.229, с. 29-33.
4. Вибрация в технике: Справочник. В 6-ти т. / Ред. совет: В.Н. Челомей (пред.). – М.: Машиностроение, 1981 – Т. 5. Измерения и испытания. – Под ред. М.Д. Генкина, 1981. – 496 с.
5. Генкин М.Д., Соколова А.Г. Виброакустическая диагностика машин и механизмов. – М.: Машиностроение, 1987. – 288 с.
6. ГОСТ ИСО 2954-97. Вибрация машин с возвратно-поступательным и вращательным движением. Требования к средствам измерений. – Введен с 01.07.97. - М.: ИПК Изд-во стандартов, 1998. - 6 с.
7. Диагностика автотракторных двигателей. / Под ред. Н.С. Ждановского. Изд. 2-е, перераб. и доп. - Л.: Колос, 1977. – 264 с.
8. Диагностирование дизелей / Е.А. Никитин, Л.В. Станиславский, Э.А. Улановский и др. – М.: Машиностроение, 1987. – 224 с.
9. Доценко Ю.Г. Разработка метода вибродиагностики деталей цилиндропоршневой группы двигателя на основе кепстрального анализа // Автореф... канд. техн. наук. – М.: МАДИ (ТУ), 1996. – 20 с.
10. Зинченко В.И., Захаров В.К. Снижение шума на судах. – Л.: Судостроение, 1968. – 140 с.
11. Костюков В. Н., Науменко А.П. Безразборная диагностика состояния поршневых машин // Неразрушающий контроль и диагностика: Тез. докл. 15 рос. науч.-техн. конф. Том 1. - Москва: РОНКТД, 1999. – С. 296.
12. Костюков В. Н., Науменко А.П. Виброакустическая диагностика поршневых машин крейцкопфного типа // Материалы III МНТК "Динамика систем, механизмов и машин" - Омск, 1999. – С. 207.
13. Костюков В. Н., Науменко А.П. Вибродиагностика поршневых компрессоров // Компрессорная техника и пневматика. - №3. - 2002. - С. 30-31.
14. Костюков В. Н., Науменко А.П. Нормативно-методическое обеспечение мониторинга технического состояния поршневых компрессоров // Контроль. Диагностика. №11, 2005 г. – С. 20-23.

15. Костюков В. Н., Науменко А.П. О виброакустической диагностике поршневых машин // Международный симпозиум «Образование через науку»: Материалы докладов секции «Двигатели внутреннего сгорания». Отдельный выпуск. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – С. 60.
16. Костюков В. Н., Науменко А.П. Практика виброакустической диагностики поршневых машин // Сборник научных трудов по проблемам двигателестроения, посвященный 175-летию МГТУ им. Н.Э. Баумана // Под редакцией Н.А. Иващенко, Л.В. Грехова. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – С. 30-35.
17. Костюков В.Н. Мониторинг безопасности производства. – М.: Машиностроение, 2002. – 224 с.
18. Костюков В.Н. Нормирование параметров вибрации при диагностике поршневых компрессоров // Потребители-производители компрессоров и компрессорного оборудования: Тр. VII междунар. симпозиума. - С-Пб: Изд-во СПбГТУ, 2001. – С. 90-93.
19. Костюков В.Н. Обобщенная диагностическая модель виброакустического сигнала объектов периодического действия // Омский науч. вестн. – 1999. – Вып. 6. – С. 37-41.
20. Костюков В.Н., Науменко А.П. Мониторинг состояния поршневых компрессоров // Потребители-производители компрессоров и компрессорного оборудования: Тр. III междунар. симпозиума. - С-Пб: Изд-во СПбГТУ, 1997. – С. 254-256.
21. Костюков В.Н., Науменко А.П. Опыт вибродиагностики поршневых машин // Двигатель-97: Материалы МНТК. - Москва: Изд-во МГТУ, 1997. – С. 73.
22. Луканин В.Н. Шум автотракторных двигателей внутреннего сгорания. – М.: Машиностроение, 1971. – 272 с.
23. Павлов Б.В. Акустическая диагностика механизмов. - М.: Машиностроение, 1971. - 224 с.
24. Пат. 1280961 РФ, МКИ F 04 В 51/00, G01M13/02. Способ виброакустической диагностики машин периодического действия и устройство для его осуществления / В.Н. Костюков //Открытия. Изобретения. - 1986.- № 48.
25. Стандарт ассоциации «Ростехэкспертиза» «Системы мониторинга агрегатов опасных производственных объектов» общие технические требования (СА 03-002-04). Серия 03/ Колл. авт. - М.: Химическая техника, 2005. – 42 с., согласованный Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору РФ письмом № 11-16/219 от 1 февраля 2005 года.
26. Техническая эксплуатация машинно-тракторного парка / В.А. Аллилуев, Д.А. Ананьин, В.М. Михлин. – М.: Агропромиздат, 1991. – 367с.



Научно-промышленный союз

НАУЧНО-ПРОМЫШЛЕННЫЙ СОЮЗ  
«УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ, ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ,  
КОНТРОЛЬ И МОНИТОРИНГ»  
(Научно-промышленный союз «РИСКОМ»)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ЭКОЛОГИЧЕСКОМУ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМУ И АТОМНОМУ НАДЗОРУ  
("Ростехнадзор")

ИНСТИТУТ МАШИНОВЕДЕНИЯ им. БЛАГОНРАВОВА,  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
("ИМАШ" РАН)

ОАО "НТЦ «ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ»  
("НТЦ "Промбезопасность")

Международная конференция  
«Техническое регулирование  
и стандартизация. Управление рисками,  
промышленная безопасность,  
контроль и мониторинг»

Сборник материалов

23-26 октября 2007 года  
Москва, пансионат «ЛИПКИ»

УДК 504.055+504.056+629.7.067.8  
ББК 30н

C23

**Сборник материалов Международной конференции «Техническое регулирование и стандартизация. Управление рисками, промышленная безопасность, контроль и мониторинг».** – М.: НПС «РИСКОМ», 2007. – 192 с.  
ISBN 5-93586-456-8

Сборник включает материалы докладов Международной конференции «Техническое регулирование и стандартизация. Управление рисками, промышленная безопасность, контроль и мониторинг», проводившейся в Москве 23-28 октября 2007 г. Научно-промышленным союзом «УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ, ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ, КОНТРОЛЬ И МОНИТОРИНГ». Доклады посвящены работам ведущих организаций в области промышленной безопасности и оценки рисков аварий опасных производственных объектов.

Материалы сборника адресованы специалистам в области промышленной безопасности, руководителям предприятий, имеющим опасные производственные объекты.

"  
"  
ISBN 5-93586-456-8 © Научно-промышленный союз «РИСКОМ», 2007  
.....© ООО «Научно-технический центр по  
.....безопасности в промышленности», 2007

"  
"  
"  
"  
"  
"  
"

.....4

## СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Определение прочности силовых элементов конструкций на основе инвариантов акустико-эмиссионных процессов.....	5
Управление и планирование рисками отказов (риск-менеджмент) промышленных трубопроводов.....	16
Физические критерии оценки напряженно-деформированного состояния материалов и элементов конструкций.....	17
Опыт стандартизации новых технологий и методов неразрушающего контроля через международный институт сварки.....	20
Особенности проведения экспертизы промышленной безопасности технических устройств на объектах магистрального трубопроводного транспорта.....	26
Обеспечение безопасной эксплуатации газовых поршневых компрессоров на основе мониторинга технического состояния.....	33
Проблемы промышленной безопасности стареющих больших механических систем, эксплуатирующихся в условиях Крайнего Севера.....	54
Опыт эксплуатации систем комплексного мониторинга.....	72
Опыт применения систем комплексного диагностического мониторинга в Беларуси.....	74
О новой классификации методов НК с позиций оценки рисков и ресурса оборудования.....	78
Исследование стальных образцов на статистическую и циклическую нагрузку с использованием метода магнитной памяти металла.....	83
Оценка рисков и неразрушающий контроль.....	98
«Системы обеспечения эксплуатационной надежности трубопроводных конструкций, запорной арматуры и технологического оборудования».....	100

Накопление повреждений при усталостных испытаниях и ранняя диагностика мест разрушения.....	116
Методические основы стратегии и тактики управления региональным центром мониторинга, прогнозирования и управления безопасностью транспортных систем.....	142
Новая технология обеспечения технической и экологической безопасности промышленного оборудования.....	149
Особенности технического диагностирования технологических трубопроводов.....	157
Опыт разработки нормативно-технической документации по техническому диагностированию.....	160
Изменение механических характеристик высокопрочных трубных сталей категорий прочности X80, X100 в процессе эксплуатации.....	165
Промышленная безопасность в современных производственных отношениях.....	172
«Новые нормативные документы по экспертизе промышленной безопасности резервуаров специального назначения (горизонтальных, изотермических, сернокислотных)».....	185
Создание нормативной базы для увеличения межремонтного пробега технологических установок.....	188