

На правах рукописи



Науменко Александр Петрович

**НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
ВИБРОДИАГНОСТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА  
ПОРШНЕВЫХ МАШИН В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ**

Специальность 05.11.13 - приборы и методы контроля  
природной среды, веществ, материалов и изделий  
(технические науки)

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Омск – 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Омский государственный технический университет» на кафедре «Радиотехнические устройства и системы диагностики» и в ООО «Научно-производственный центр «Диагностика, надежность машин и комплексная автоматизация» - НПЦ «Динамика».

Научный консультант: лауреат премии Правительства Российской Федерации, доктор технических наук, профессор  
**Костюков В.Н.**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
**Гриб В.В.**

доктор технических наук, профессор  
**Овчаренко С.М.**

доктор технических наук, профессор  
**Кликушин Ю.Н.**

Ведущая организация: **Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана**, г. Москва

Защита состоится 22 марта 2012 г. в 15<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д212.178.01 при Омском государственном техническом университете по адресу:

644050, Российская Федерация, г. Омск, проспект Мира, 11

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим направлять ученому секретарю совета по указанному выше адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОмГТУ.

Телефон для справок: (3812) 65-64-92

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2012 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д212.178.01  
доктор технических наук, доцент



В.Л. Хазан

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В настоящее время существует достаточно многочисленный парк динамического оборудования, включающий поршневые машины (ПМ), эксплуатация которого без контроля его технического состояния, обеспечивающего безаварийную и, соответственно, безопасную эксплуатацию, сегодня уже невозможна. Речь идет о парке машин и механизмов, безопасность эксплуатации которых при их отказе играет определяющую роль, например, в авиации, на морском и речном флоте, потенциально опасных производств – предприятий нефтегазоперерабатывающего, химического комплексов (НХК), имеющих непрерывный производственный цикл. Внезапная и аварийная остановка такого оборудования создает не только угрозу появления значительных экономических потерь от простоев, но и угрозу экологических и техногенных аварий и катастроф.

Таким образом, *актуальными* являются задачи безаварийной, безопасной, ресурсосберегающей эксплуатации поршневых машин, в частности, поршневых компрессоров НХК, решение которых возможно лишь на основе разрешения научных и технических проблем развития прикладной методологии и практического использования методов и технологии контроля технического состояния, диагностирования и мониторинга поршневых машин путем распознавания состояния объектов по информации, содержащейся в виброакустическом (ВА) сигнале.

**Значение решения указанных научных и технических проблем** для отраслей промышленности состоит в повышении безопасности техногенных объектов, в реализации безаварийной ресурсосберегающей их эксплуатации, в увеличении срока их службы и ремонтной технологичности, в расширении автоматизации производственных процессов путем обеспечения наблюдаемости технического состояния объектов мониторинга, что обуславливает развитие нефтегазоперерабатывающего, химического секторов экономики страны.

Разработки автора основываются на теоретических и экспериментальных результатах, содержащихся в работах В.А. Аллилуева, И.В. Алексева, Н.П. Алёшина, И.И. Артоболевского, Ф.Я. Балицкого, Ю.М. Вешкурцева, А.И. Володина, Ю.Б. Галёркина, М.Д. Генкина, В.В. Гриба, Н.С. Ждановского, Н.А. Иващенко, А.Н. Кабакова, В.А. Карасева, Ю.Н. Кликушина, В.В. Ключева, В.Н. Костюкова, В.Н. Луканина, В.М. Михлина, А.В. Николаенко, Б.В. Павлова, П.И. Пластинина, М.К. Сидоренко, Е.А. Скобцева, А.Г. Соколовой, Л.В. Станиславского, А.Д. Изотова, Л.В. Тузова, Б.С. Фотина, М.И. Френкеля, В.А. Четвергова, К.Н. Явленского и других ученых, а также исследований и достижений ряда коллективов научно-исследовательских, отраслевых и академических институтов – МАДИ, ЛСХИ, СибИМЭ, ГОСНИТИ, ИМАШ РАН, ОАО "ЛенНИИхиммаш", НПЦ «Динамика» и др., и зарубежных ученых и специалистов таких компаний, как Bently Nevada, Dresser-Rand, Hoerbeger GmbH, KÖTTER Consulting Engineers, Prognost Systems GmbH, Metrix Instrument Co, Bruel & Kjer Vibro и др.

**Научная проблема:** выявление, обобщение, систематизация и развитие научно-методических основ и технологии мониторинга технического состояния поршневых машин и развитие их на основе использования виброакустической диагностики.

**Цель работы:** развитие научно-методических основ и внедрение технологии и автоматических систем мониторинга технического состояния поршневых машин в реальном времени методами *ВА* диагностики для предупреждения аварий и управления техническим состоянием, обеспечивающих безаварийную ресурсосберегающую эксплуатацию поршневых компрессоров *НХК*.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Развить обобщенную модель виброакустического сигнала, разработав обобщенные и частные модели механизмов формирования структур *ВА* сигналов поршневых машин, соответствующие возникновению неисправностей и дефектов отдельных узлов, а также машины в целом, с учетом особенностей формирования виброакустических колебаний, что позволяет осуществить селекцию диагностических признаков (*ДП*).

2. Выбрать и обосновать места установки вибродатчиков на корпусе и узлах поршневых компрессоров.

3. Разработать систему определяющих критериев неисправностей на базе параметров виброакустического сигналов и алгоритм функционирования автоматической экспертной системы для чего:

– осуществить селекцию и синтез совокупности диагностических признаков, соответствующих видам технического состояния, основным неисправностям и технологическому режиму эксплуатации *ПК*, возникающих как по отдельности, так и совместно и инвариантных к конструкции машин;

– определить нормативные значения диагностических признаков, соответствующих видам технического состояния и степеням опасности дефектов, неисправностей, технологическому режиму эксплуатации *ПК*.

4. Разработать методику и алгоритм преобразования исходного *ВА* сигнала и получения интегральных оценок первого и второго порядков, обеспечивающих повышение достоверность получения *ВА* сигнала и постановки диагноза.

5. Предложить методические и алгоритмические решения линеаризации и коррекции амплитудно-фазовой частотной характеристики (*АФЧХ*) измерительного тракта.

6. Разработать методику и алгоритм преобразования исходного виброакустического сигнала для проведения его нелинейной обработки.

7. На основе разработанных моделей и в соответствии с задачами исследования разработать элементы автоматических систем диагностики и мониторинга (*СДМ*) технического состояния, целью которых является получение в реальном времени информации о состоянии поршневых машин *НХК* в необходимом количестве и качестве для обеспечения наблюдаемости их технического состояния, безопасной, безаварийной ресурсосберегающей их эксплуатации, и осуществить промышленное внедрение полученных результатов.

**Объекты исследований.** Объектами исследований являются поршневые компрессоры (*ПК*), используемые в *НХК* для компримирования взрывоопасных и вредных газов.

**Методы исследований** основываются на методах и математическом аппарате теории вероятностей и математической статистики, статистической радиотехники, дискретной математики и цифровой обработки сигналов, теории колебаний, динамики поршневых машин, программном обеспечении специализированного и общего назначения. Информация для статистической обработки отказов поршневых компрессоров и параметров виброакустических сигналов получена с помощью разработанных и внедренных на технологических установках предприятий *НХК* систем компьютерного мониторинга и диагностики КОМПАКС® (НПЦ «Динамика»). Достоверность результатов работы подтверждена в результате многолетних практических исследований по диагностированию и мониторингу состояния нескольких десятков поршневых компрессоров НХК путем внедрения систем КОМПАКС®, сертифицированных и внесенных в Государственный реестр средств измерений РФ, Болгарии, Узбекистана.

**Научная новизна** работы заключается в следующих результатах:

1. **Разработаны обобщенная и частные модели** механизмов формирования структур виброакустических сигналов, которые позволяют выявить структуру виброакустического сигнала узлов поршневых компрессоров при возникновении их неисправностей;

2. **Впервые разработана система определяющих критериев** неисправностей на базе параметров виброакустического сигналов, которая является основой автоматической экспертной системы поддержки принятия решений реального времени, осуществляющей постановку диагноза в темпе измерений диагностических сигналов (патент РФ 2 363 936);

3. **Впервые определены** нормативные опасные и предупредительные величины диагностических признаков для различных типов *ПК*.

4. **Впервые выявлены** параметры функций распределения вероятностей мгновенных значений диагностических признаков неисправностей *ПК*;

5. Установлена декорреляция параметров *ВА* сигналов, позволившая **разработать: принципы** формирования диагностических признаков, **способы** диагностики (патенты РФ 2 337 341, 2 363 936, 2 314 508), **методологию** обработки диагностических *ВА* сигналов для выделения диагностических признаков;

6. **Выявлены закономерности** отказов узлов и деталей поршневых компрессоров и **установлены** места расположения вибродатчиков на корпусе и узлах поршневых компрессоров;

7. **Выполнено развитие** элементов *СДМ* (патенты РФ 44623, 44991) и **методических основ технологии** (патенты РФ 2 337 341, 2 363 936, 2 314 508) мониторинга состояния и диагностирования поршневых компрессоров, позволяющие в реальном времени производить мониторинг технического состояния поршневых компрессоров различных производств.

**Практическая ценность** состоит в развитии, создании и внедрении:

1. Методологии и технологии диагностики и мониторинга состояния поршневых машин, основой которых являются *система определяющих критериев* неисправностей и *алгоритмы* функционирования автоматической экспертной системы, позволяющие проводить оценку технического состояния и диагностиро-

вание узлов и деталей, нарушений технологического режима компримирования и других причин виброактивности поршневых компрессоров в реальном времени в темпе проведения измерений без участия эксперта (*real-time* мониторинг);

2. Трёх национальных (ГОСТ Р 53563, ГОСТ Р 53564, ГОСТ Р 53565) и шести отраслевых (СА 03-001-05, СА 03-002-05, СТО-03-002-08, СТО-03-003-08, СТО-03-004-08, СТО 03-015-11) стандартов в области мониторинга состояния оборудования опасных производств, в т.ч. нормативно-методического документа «Стационарные компрессорные установки с поршневыми компрессорами: эксплуатационные нормы вибрации» (СТО 03-015-11), в котором *впервые* для ряда типоразмеров поршневых компрессоров приведены нормированные значения параметров виброакустических сигналов для различных состояний машин;

3. Конфигураций программно-аппаратных средств систем мониторинга реального времени, инвариантных к конструкции поршневых компрессоров *НХК*, реализующих ряд предложенных способов диагностирования (патенты РФ 2 337 341, 2 363 936, 2 314 508), методических и алгоритмических решений, которые обеспечивают мониторинг технического состояния поршневых компрессоров в реальном времени в темпе проведения измерений без участия эксперта;

4. Систем диагностики и мониторинга более 50 поршневых компрессоров на нефтегазохимических комплексах и производствах в г.г. Омск, Ангарск, Астрахань, Ачинск, Бургас, Волгоград, Саратов, Сызрань, Ухта и др.

**Личный вклад соискателя** заключается в формулировке задач исследований, разработке проблемы в целом, в личном участии и выполнении теоретических и экспериментальных исследований и анализе их результатов. Автору принадлежит формулировка всех выводов, положений, закономерностей, описанных в диссертации. В совместных работах личный вклад автора состоит в полной или частичной разработке отдельных составляющих работ, анализе полученных результатов, формулировании выводов.

**На защиту выносятся** следующие основные положения и результаты:

– обобщенная математическая модель механизма формирования структуры виброакустического сигнала с учетом особенностей возбуждения виброакустических колебаний в поршневых машинах;

– система определяющих критериев неисправностей, представляющая собой базу закономерностей в виде зависимостей, связывающих место измерения вибрации, узел диагностируемой машины, вид неисправности, параметры *ВА* сигнала, которые представлены системой совокупности диагностических признаков;

– вибрационные нормативы безопасной эксплуатации поршневых компрессоров *НХК*;

– реализации автоматизированных систем мониторинга, на основе предложенных способов и методик диагностики и мониторинга технического состояния поршневых машин, обеспечивающие безопасную ресурсосберегающую эксплуатацию поршневых компрессоров *НХК* в реальном времени.

**Апробация работы.** Основные положения работы докладывались на Международных конференциях, симпозиумах: «Динамика систем, механизмов и

машин» (Омск, 1995, 1997, 1999, 2010 гг.), «Потребители-производители компрессоров и компрессорного оборудования» (Санкт-Петербург, 1997, 1998, 2004, 2010 гг.), «Образование через науку» (Москва, 2005 г.), «Авиадвигатели XXI века» (Москва, 2005 г.), «Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности» (Москва, 2006, 2007, 2008, 2009 гг.), «Неразрушающий контроль и техническая диагностика» (Нижний Новгород, 2008 г.), «Двигатель-97», «Двигатель-2007», «Двигатель-2010» (Москва, 1997, 2007, 2010 гг.), «Техническое регулирование и стандартизация. Управление рисками, промышленная безопасность, контроль и мониторинг» (Москва, 2007 г.), «Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management» (San Sebastian, Spain, 2009, Japan, Nara, 2010, Norway, Stavanger, 2011), «The International Conference on Condition Monitoring and Machinery Failure Prevention Technologies» (The British Institute of Non-Destructive Testing, 2009, 2010, 2011), «Hermetic Sealing, Vibration Reliability and Ecological Safety of Pump and Compressor Machinery» (Kielce-Przemysl, 2008 г.); 10<sup>th</sup> European Conference on Non-Destructive Testing (Москва, 2010 г.); Всесоюзных, Российских научно-технических конференциях, совещаниях, семинарах: «Проблемы вибродиагностики машин и приборов» (Иваново, 1985 г.), «Актуальные проблемы двигателестроения» (Владимир, 1987 г.), « XXII Всесоюзное научное совещание по проблемам прочности двигателей» (Москва, 1988 г.), «Диагностика, повышение эффективности, экономичности и долговечности двигателей» (Ленинград-Пушкин, 1990, 1991, 1992 гг.), «Неразрушающий контроль и диагностика» (Москва, 1999 г.), «Проблемы безопасности, экологии и автоматизации товарно-транспортных операций и хранения нефти и нефтепродуктов» (Омск, 2003 г.), «Проблемы вибрации, виброналадки, вибромониторинга и диагностики оборудования электрических станций» (Москва, 2005, 2011 гг.), «Наука, образование, бизнес» (Омск, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011 гг.).

**Публикации.** Основные положения диссертационной работы опубликованы в 74 печатных работах, в т.ч. в 14 статьях в изданиях, рекомендованных ВАК России для публикаций научных результатов докторских диссертаций; в трех учебных пособиях «Основы строительной механики двигателей внутреннего сгорания» (1995 г.), «Практические основы виброакустической диагностики машинного оборудования» (2002 г.), «Основы виброакустической диагностики и мониторинга машин» (2011 г.); в 10 полных текстах и 31 тезисах докладов на Международных, Всесоюзных, Российских и региональных научных конференциях и семинарах; в 39 статьях сборников научных трудов и периодических изданиях; в 5 патентах на изобретения и полезные образцы, в 1 отчете по НИР, в 3 национальных (ГОСТ Р 53563, ГОСТ Р 53564, ГОСТ Р 53565) и шести отраслевых (СА 03-001-05, СА 03-002-05, СТО-03-002-08, СТО-03-003-08, СТО-03-004-08, СТО 03-015-11) стандартах в области мониторинга состояния оборудования опасных производств.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, шести глав, общих выводов и результатов, списка литературы, включающего 315 источников, и приложений, содержащих документы внедрения, исходные данные и результаты расчетов. Основной материал изложен на 348 страницах, включая 71 таблицу и 266 иллюстраций.

## Краткое содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, определены объекты исследований, приводится постановка задачи и краткая аннотация содержания работы, дана оценка новизны, достоверности и практической ценности полученных результатов, сформулированы защищаемые положения.

В первой главе проведен анализ методов и средств диагностирования и мониторинга поршневых машин, включая двигатели внутреннего сгорания (*ДВС*), в т.ч. путем анализа виброакустических сигналов. Под мониторингом технического состояния объекта (диагностическим мониторингом объекта) понимается наблюдение за техническим состоянием объекта (агрегата, конструкции, машины, узла, механизма, технического устройства) для определения и прогнозирования момента перехода в предельное состояние. Результат мониторинга объекта представляет собой совокупность диагнозов составляющих его субъектов (машин, узлов, механизмов), получаемых на неразрывно примыкающих друг к другу интервалах времени, в течение которых состояние субъекта существенно не изменяется. Виброакустический сигнал – это физическая величина, характеризующая механические колебания (вибрационные, акустические, газогидроакустические и др.), сопровождающие функционирование объекта (см. СА 03-002-05, СТО 03-003-08).

Анализ применимости различных методов диагностирования, например, дизелей, показывает, что определение неисправностей дизеля возможно с помощью четырех основных методов: термодинамический, параметрический, спектральный («металл в среде»), виброакустический. Фактически оказывается, что с помощью виброакустического метода можно выявлять от 70% до 77% неисправностей *ДВС*.

Достижения в области теории и практики виброакустической диагностики *ДВС*, отражены в работах В.А. Аллилуева, И.В. Алексеева, И.И. Артоблевского, Ф.Я. Балицкого, А.И. Володина, М.Д. Генкина, Н.С. Ждановского, Н.А. Иващенко, В.Н. Луканина, В.М. Михлина, А.В. Николаенко, Б.В. Павлова, М.К. Сидоренко, А.Г. Соколовой, Л.В. Станиславского, Е.А. Скобцева, А.Д. Изотова, Л.В. Тузова, В.А. Четвергова, в исследованиях и достижениях ряда коллективов научно-исследовательских, отраслевых и академических институтов – МАДИ, ЛСХИ, СибИМЭ, ГОСНИТИ и других, а также ряда зарубежных специалистов и компаний. Разработанные методы и способы виброакустической диагностики *ДВС* в режиме прокрутки можно использовать для диагностирования *ПК* с учетом идентичности кинематики и динамики *ДВС* и *ПК*.

Данные по отказам и ремонтам поршневых компрессоров зарубежных предприятий *НХК* выявил системы и составные части машин, а также усредненные процентные доли отказов, которые приводят к незапланированным ремонтам: 8 систем и составных частей *ПК* являются причиной около 93.5 % всех незапланированных остановок машин, при этом доля отказов клапанов составляет 36 %, а стоимость их ремонта - 50 % от общих затрат на ремонт компрессора. В то же время по данным отечественных исследований за счет поломок клапанов происходит до 70-90 % остановок шахтных и заводских компрессорных установок, до 50% для компрессоров типа 5Г-100/8, 4М10-100/8. По данным отечест-



венных и зарубежных исследований в таблице 1 представлена статистика отказов *ПК*, которая свидетельствует об актуальности развития методов и средств диагностирования и мониторинга технического состояния *ПК*.

Таблица 1

Отказы по типам узлов, механизмов, деталей *ПК*

№	Узлы и причины ремонта	Соотношение по типам, %	
		ОНПЗ <sup>2</sup>	Анкетирование <sup>1</sup>
1.	Ремонт и замена клапанов	36,4	36
	Ремонт и замена деталей <i>ЦПГ</i> , в т.ч.		
2.	сальники под давлением	17,5	17,8
3.	колец	25,8	13,9
4.	прочих деталей	5,0	-
5.	Ремонт и замена деталей <i>КПМ</i>	3,8	32,3
6.	Ремонт и замена деталей <i>КШМ</i>	4,0	
7.	Другие ремонты	7,5	
	Всего ремонтов, единиц	772	н/д

По данным: 1. Leonard S.M., Increasing the Increase Reliability of Reciprocating Hydrogen Compressors, Hydrocarbon Processing, January, 1996. Pp. 67-74

2. Науменко А.П. Современные методы и средства *real-time* мониторинга технического состояния поршневых машин // Компрессорная техника и пневматика. 2010. №8. С 27-34.

Уровень развития методов и средств диагностирования и мониторинга поршневых компрессоров отражен в теоретических и экспериментальных исследованиях П.И. Пластинина, В.Н. Костюкова, В.В. Гриба, Р.В. Жукова, ряда научно-исследовательских работ и разработок ОАО "ЛенНИИхиммаш", ООО "ВНИИГаз", ИМАШ РАН, "Вибро-Центр", НПЦ «Динамика», Bently Nevada, Dresser-Rand, Hoerbeger Ventilwerke GmbH, KÖTTER Consulting Engineers, Prognost Systems GmbH, Metrix Instrument Co, Bruel & Kjer Vibro и других организаций и специалистов.

Анализ методологии и технологии оценки технического состояния (*ТС*) и диагностирования *ПМ*, архитектур, принципов функционирования известных систем говорит о том, что

– методология определения *ТС* узлов и деталей *ПК* опирается, в основном, на измерение прямых структурных и термодинамических (технологических) параметров (относительные смещения, давление, температура), реализует *on-line* технологию и оперирует с информацией об их изменениях и отклонениях от номинальных значений;

– параметры виброакустических колебаний (виброускорение, виброскорость) используются для оценки только виброактивности отдельных узлов *ПК*, без проведения диагностирования и причин возникновения неисправностей и дефектов;

– технология *on-line* мониторинга обладает достаточно высокими (более 5%) величинами статической и динамической ошибок распознавания *ТС* (по ГОСТ Р 53563), поэтому согласно ГОСТ Р 53563, ГОСТ Р 53564, СА 03-002-005, СТО 03-002-08 подобные системы можно использовать только для мониторинга технического состояния оборудования опасных производственных объектов второй, третьей и более низких категорий опасности.

Использование в известных системах номинальных и предельных значений структурных и технологических параметров, которые указаны в конструкторской документации на машину и/или определены существующими нормативными документами, обладает, как минимум, двумя недостатками:

- контроль изменений параметра, планирование действий персонала и их содержание возлагается на персонал, эксплуатирующий и обслуживающий ПМ;
- степень опасности или скорость изменения измеряемого параметра должен также оценивать сам персонал.

Эти недостатки приводят к высокой значимости субъективного (человеческого) фактора, что существенно снижает объективность и своевременность оценки состояния оборудования и значительно повышает величину риска пропуска опасного отказа.

Фундаментальным подходом к анализу виброакустических сигналов и диагностике, связанным со сложностью виброакустических процессов, генерируемых источниками виброакустических колебаний, различием физических моделей и методов их математического описания, является разбиение его на частотные диапазоны, которым свойственны свои возмущающие силы, своя физическая модель объекта со своими дефектами и неисправностями, своя диагностическая модель и свои методы анализа виброакустических сигналов.

Параметрами движения физического тела, в т.ч. колебательного, в зависимости от времени являются перемещение  $s(t)$ , скорость  $v(t)$ , ускорение  $a(t)$ . Для тела, подвергающегося упругому воздействию,  $s(t)$  характеризует потенциальную энергию  $U(t)$  и силу  $F(t)$  движения и с учетом второго закона Ньютона и закона Гука можно показать, что с одной стороны  $s(t)$  является мерой деформации, а с другой стороны  $a(t)$  и  $s(t)$  определяют внутренние напряжения в элементах конструкции объекта. Учитывая, что пьезоакселерометры с равномерной АФЧХ в широком диапазоне частот преобразуют виброакустические колебания в электрический сигнал, то в диапазоне низких частот  $s(t)$  будет в большей степени характеризовать вибрацию объекта, т.е. внутренние напряжения и жесткость элементов крепления объекта, а в высокочастотном диапазоне  $a(t)$  – упругие волны и внутренние напряжения в элементах корпуса объекта.

Таким образом, можно связать параметры виброакустического сигнала  $a(t)$ ,  $v(t)$ ,  $s(t)$  с диапазонами частот их измерения и дефектами, проявляющимися на этих частотах, что не используется в известных методиках и системах диагностирования ПК.

Важная роль в постановке виброакустического диагноза отводится моделям формирования диагностического сигнала, которые можно разделить на две группы:

1. Детерминированные и вероятностные модели сигналов, представляемые в виде аппроксимирующих функций виброакустических сигналов детерминированных источников и спектрально-корреляционных и регрессионных представлений шумовых и периодических составляющих (ШПС) виброакустических сигналов;

2. Обобщенные модели виброакустических сигналов, отражающие взаимодействия элементов диагностируемого объекта.

В.Н. Костюковым предложена модель квазипериодического виброакустического сигнала объектов периодического действия, согласно которой виброакустические колебания могут быть представлены в виде смеси *периодических* составляющих, возбуждаемых циклически действующими силовыми воздействиями и вызванных структурными параметрами и рабочими процессами, и *шумовых* составляющих – акустический шум и неизвестные составляющие, несущих информацию о состоянии механизмов. Их частотный состав адекватно проявляется как в прямом спектре, так и в спектре огибающей виброакустического сигнала. Указанная модель требует развития применительно к поршневым компрессорам.

Процесс преобразования виброускорения  $a(t)$  в виброскорость  $v(t)$  и виброперемещение  $s(t)$  эквивалентен математической операции интегрирования. В статистической радиотехнике, теории случайных функций показано, что точное математическое интегрирование стационарного случайного процесса приводит к нестационарному процессу с неограниченно возрастающей дисперсией, который является Винеровским случайным процессом, т.е. нормальным процессом с независимыми приращениями. В тоже время на выходе физической интегрирующей цепи в установившемся режиме процесс является стационарным, как и на входе, и некоррелированным с входным, что подтверждает ортогональность (декорреляцию) таких вибропараметров как  $a(t)$ ,  $v(t)$ ,  $s(t)$  для случайных процессов зарождения и развития неисправностей и дефектов. Данный факт, подтвержденный в работах Костюкова В.Н., не используется в известных методиках и системах диагностирования поршневых компрессоров.

Анализ нормативно-методической документации в области вибрационно-го контроля поршневых машин, включая ISO 10816-6, свидетельствует о том, что база нормирования параметров вибраций развита недостаточно, так как нормы вибрации имеют ограниченное применение для ряда типоразмеров поршневых машин, которые не совпадают с типоразмерами поршневых компрессоров *НХК*, а это не обеспечивает безаварийную и безопасную эксплуатацию поршневых машин *НХК*.

В результате можно констатировать, что, существующие методологии и технологии оценки технического состояния и диагностирования, архитектуры, принципы функционирования систем, документы по нормированию параметров вибрации поршневых машин не позволяют использовать существующие *СДМ*, нормы вибрации для объективной оценки состояния как машин в целом, так и технического состояния отдельных их узлов и деталей, что в целом ограничивает применение этих систем для *real-time* мониторинга состояния поршневых машин опасных производственных объектов, а также поршневых машин в тех сферах применения, в которых безопасность при их отказе играет определяющую роль. Поэтому современный уровень развития методологии, технологии и средств диагностирования и мониторинга состояния поршневых машин с целью обеспечения их безопасной эксплуатации требует проведения теоретических и экспериментальных исследований по их развитию.

Проведенный анализ позволил сформулировать задачи исследований с точки зрения развития элементов теории, технологии и оборудования мониторинга технического состояния поршневых машин реальном времени методами виброакустической диагностики.

**Во второй** главе разработаны обобщенная и частные модели механизмов формирования структур виброакустических сигналов при возникновении неисправностей и дефектов различных узлов и деталей поршневых компрессоров, проведено обоснование мест установок вибродатчиков.

Проведенный анализ отказов узлов и деталей поршневых компрессоров (см. табл. 1) выявил наиболее уязвимые и затратные, с точки зрения ремонта, узлы и детали машин. Поэтому основное внимание при мониторинге состояния должно уделяться таким узлам как клапаны, детали цилиндропоршневой группы (ЦПГ), кривошипно-ползунного механизма (КПМ), включая шток, кривошипно-шатунного механизма (КШМ), сальники. В связи с этим места установки датчиков СДМ выбраны из условия полноты контроля технического состояния основных узлов поршневого компрессора (табл. 2, рис. 1) с учетом минимального вмешательства в конструкцию компрессора, максимальной глубины диагностирования при минимально необходимом количестве датчиков согласно требований ГОСТ Р 53564, СА 03-001-05, СА 03-002-05. Для использования когерентных методов обработки виброакустических сигналов устанавливается датчик углового положения вала.

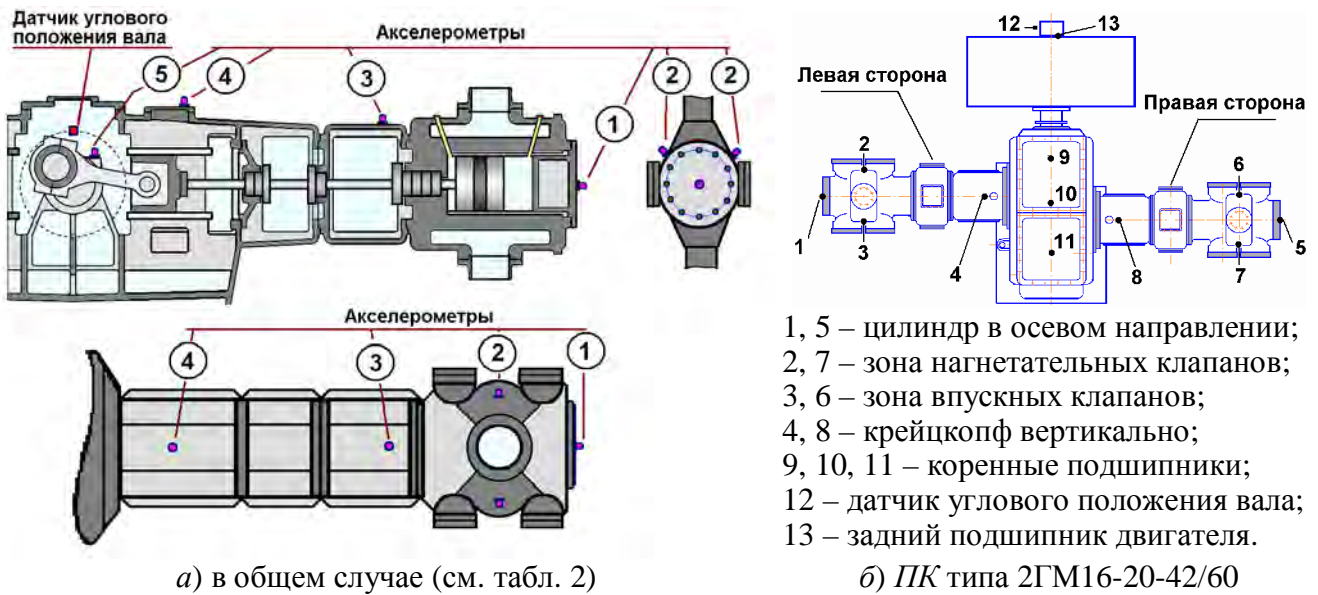
Источниками ВА активности поршневых машин являются различные силовые, чаще всего, статистически независимые воздействия, которые можно разделить на импульсные (ударные) вынуждающие силы  $F_s$  (например, открытие клапана), полигармонические силы  $F_g$  (например, момент несбалансированных масс) и стохастические (шумовые) силы  $F_n$ , возникающие вследствие трения контактирующих деталей или газогидродинамики (рис. 2).

В механической системе вынуждающие силовые воздействия в зависимости от конструкции механизма в той или иной степени взаимодействуют между собой. Нелинейные взаимовлияния в механической системе взаимодействующих элементов приводят к перемножению всех силовых взаимодействий  $F_g, F_s, F_n$  с весовыми функциям в виде импульсных характеристик  $h_n^s, h_g^s, h_s^n, h_g^n, h_n^g, h_s^g$ , соответствующих каждой паре силовых воздействий. В результате формируются три группы силовых воздействий на элементы, детали, узлы машины: ударные, стохастические, полигармонические (рис. 2).

Импульсные (ударные) воздействия  $F_{s\Sigma}$  возбуждают колебания  $S_{s\Sigma}$  на собственных (резонансных) частотах колебаний корпуса поршневых машин, элементов, деталей, узлов с учетом импульсной характеристики  $h_s^s(t)$ ; гармонические  $F_{g\Sigma}$  – вынужденные незатухающие полигармонические виброакустические колебания  $S_{g\Sigma}$  с  $h_g^g(t)$ ; процессы трения, газогидродинамические воздействия  $F_{n\Sigma}$  – широкополосные и узкополосные случайные виброакустические колебания  $S_{n\Sigma}$  с  $h_n^n(t)$ , которые в общем случае можно считать шумоподобными или стохастическими процессами (см. рис. 2).

Электрический сигнал на выходе датчика, как эквивалент ШПС виброакустических колебаний, можно представить с учетом импульсных характеристик канала от места приема виброакустического сигнала до его преобразования в

электрический сигнал и усиления:  $\{h_{str}(t)\}$  – для свободных затухающих,  $\{h_{gr}(t)\}$  – вынужденных незатухающих,  $\{h_{nr}(t)\}$  – случайных широкополосных и узкополосных колебаний (см. рис. 2).



а) в общем случае (см. табл. 2)

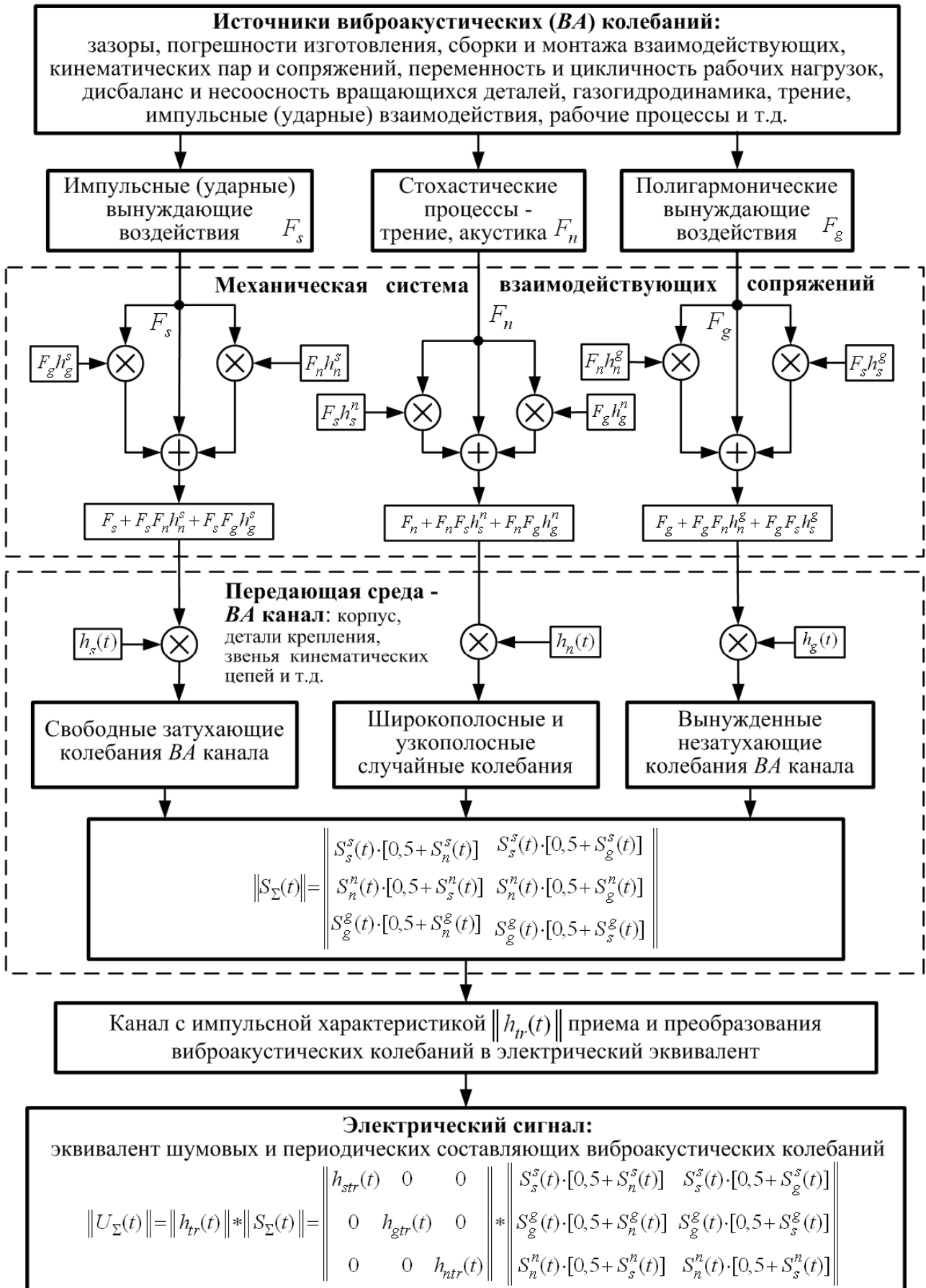
б) ПК типа 2ГМ16-20-42/60

Рис. 1. Установка ВА датчиков на поршневые компрессоры

Таблица 2

Система определяющих критериев неисправностей:  
расположение датчиков ВА сигнала и диагностируемые неисправности

№	Место измерения вибрации	Узлы ПМ	Вид неисправности
1.	На торце цилиндра (по оси движения поршня)	Детали ЦПГ, технологический процесс	Зазор между поршнем и гильзой, износ поршневых колец, износ поверхности гильзы, ослабление крепления штока к поршню, заброс конденсата, гидроудар (косвенно – клапаны)
2.	Клапаны или на цилиндре в зоне расположения клапанов	Клапаны, технологический процесс	Поломка пластин, пружин, уменьшение параметра «время-сечение», нарушение техпроцесса, заброс конденсата, гидроудар
3.	Шток	Шток	Изгиб штока, ослабление крепления штока
4.	Крейцкопф (вертикально, перпендикулярно оси движения)	Кривошипно-ползунный механизм (КПМ)	Зазоры, состояние поверхностей скольжения крейцкопфа, состояние поверхности втулки и подшипника верхней головки шатуна, жесткость крепления штока
		Кривошипно-шатунный механизм (КШМ)	Зазоры, состояние шатунной шейки и её подшипников, жесткость крепления нижней головки шатуна, состояние коренных подшипников
5.	Крышка коренных подшипников	Коренные подшипники (КП)	Зазоры (износ баббитового слоя)
6.	Подшипник машины со стороны привода или маховика (точка 9 рис. 1 а)	Вал, муфта	Дисбаланс
		Вал ПК, вал привода	Несоосность
		Муфта	Повышенные зазоры, ослабление крепления, жесткости



На основе разработанной модели механизма формирования структуры виброакустического сигнала предложены частные модели структур при возникновении дефектов и неисправностей вращающихся деталей, муфты, их неуравновешенности, несоосности вала машины и привода, повышенных зазоров, ослаблений крепления и жесткости составных частей узлов и механизмов поршневого компрессора, клапанов, неисправностей возвратно-поступательно движущихся узлов и деталей.

Для виброакустических сигналов с клапанов поршневого компрессора получены частные модели в следующем виде:

1) полигармонические составляющие

$$S_{g\Sigma 2} = \left( \sum_{k=1}^N S_{kg\Sigma}^g e^{j\Omega_k t} \right) \cdot [0,5 + S_s^g]; \quad S_{g\Sigma 1} = \left( \sum_{k=1}^N S_{kg\Sigma}^g e^{j\Omega_k t} \right) \cdot \left( 0,5 + \sum_{k=1}^N A_{\xi_k}^g \cdot e^{[-j\omega_{\xi_k}^g t + \varphi_{\xi_k}^g(t)]} \right); \quad (1)$$

2) стохастические составляющие

$$S_{n\Sigma 1} = \left( \sum_{k=1}^N A_{\xi_k}^n e^{[-j\omega_{\xi_k}^n t + \varphi_{\xi_k}^n(t)]} \right) \cdot [0,5 + S_s^n]; \quad S_{n\Sigma 2} = \left( \sum_{k=1}^N A_{\xi_k}^n e^{[-j\omega_{\xi_k}^n t + \varphi_{\xi_k}^n(t)]} \right) \cdot \left( 0,5 + \sum_{k=1}^N S_{kg\Sigma}^n e^{j\Omega_k t} \right); \quad (2)$$

3) составляющие от ударных воздействий

$$S_{s\Sigma 1} = S_s^s \cdot \left( 0,5 + \sum_{k=1}^N A_{\xi_k}^s e^{[-j\omega_{\xi_k}^s t + \varphi_{\xi_k}^s(t)]} \right); \quad S_{s\Sigma 2} = S_s^s \cdot \left( 0,5 + \sum_{k=1}^N S_{kg\Sigma}^s e^{j\Omega_k t} \right), \quad (3)$$

где  $S_{kg\Sigma}^g$ ,  $A_{\xi_k}^g$ ,  $S_s^g$ ,  $A_{\xi_k}^n$ ,  $S_s^n$ ,  $S_{kg\Sigma}^n$ ,  $S_s^s$ ,  $A_{\xi_k}^s$ ,  $S_{kg\Sigma}^s$  – параметры составляющих ВА колебаний с учетом импульсных характеристик взаимовлияния и преобразования силовых воздействий в виброакустический сигнал.

Из полученных выражений видно, что модуляция ударными воздействиями (выбор зазоров)  $S_s^g$  приводит к изменению спектрального состава полигармонических составляющих  $S_{g\Sigma}$  и увеличению уровней высокочастотных компонент, а, в тоже время, компоненты полигармонических составляющих  $S_{g\Sigma}$ , модулированные низкоэнергетическим шумом, не являются информативными диагностическими признаками для поршневых компрессоров двойного действия.

Стохастическая составляющая  $S_{n\Sigma}$  модулирована как компонентами ударных воздействий со структурой сигнала  $S_s^n$ , так и суммарной силой полигармонических составляющих  $S_{kg\Sigma}^n$ . Эта модуляция в при исправных клапанах приводит к появлению несущей с боковыми полосами в виде гармонического ряда с частотами более  $\Omega_1$  и  $2 \Omega_1$ .

Составляющие от ударных воздействий  $S_{s\Sigma 1}$  и  $S_{s\Sigma 2}$  модулированы как стохастическими компонентами  $A_{\xi_k}^s$ , так и полигармоническими  $S_{kg\Sigma}^s$ , что приводит к существенному усложнению структуры виброакустического сигнала в частотной области и являются информативными только при существенных (энергетических сопоставимых) величинах ударных воздействий.

Учитывая высокую чувствительность коэффициента модуляции к изменению параметров модулирующего сигнала по сравнению с прямым спектром

сигнала, при соответствующем выборе мест установки датчиков  $BA$  сигнала (на клапанах или непосредственной близости от них и канала течения газа) целесообразно использовать диапазон частот, генерируемых течением газа, который соответствует частоте несущей  $\omega_{\xi_k}$  виброакустических колебаний.

Практический опыт мониторинга состояния клапанов и изменений параметров сигнала и структуры спектра огибающей  $BA$  сигнала на протяжении времени от возникновения первой неисправности в клапане до его полной деградации подтверждает приведенное выше соотношение (2). Спектральный анализ  $BA$  сигналов, полученных с датчиков, установленных на клапанах и рядом с ними на поршневые компрессоры различных марок и типов, подтверждает, что исправные клапаны возбуждают  $BA$  сигнал, огибающая которого имеет преимущественную вторую гармонику частоты вращения вала (рис. 3 а), неисправные – первую (рис. 3 б).

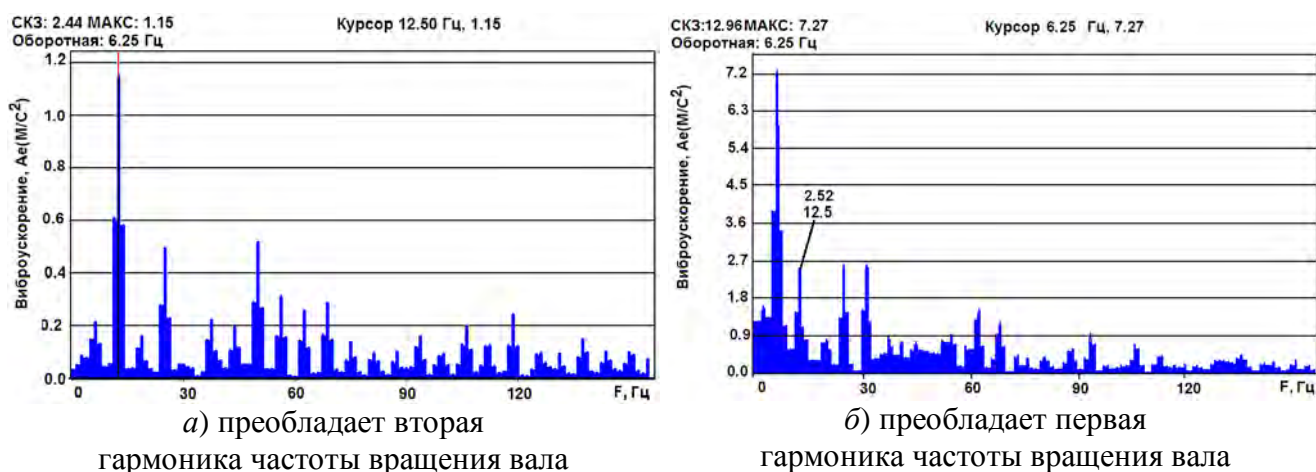


Рис. 3. Спектры огибающей  $BA$  сигнала исправного и неисправного клапанов

В третьей главе решена задача селекции диагностических признаков дефектов и неисправностей узлов и деталей поршневого компрессора, инвариантных к их конструкции, что обеспечивает важнейшее требование  $СДМ$ , обеспечивающее его реальное внедрение: выделены спектральные инварианты  $BA$  сигнала, соответствующие  $ДП$ ; определены  $ДП$ , включающие амплитуду и  $СКЗ$   $BA$  сигнала; выбраны  $ДП$  дефектов и неисправностей на основе когерентной (синхронной пиковой) селекции  $BA$  сигнала; выделены параметры характеристической функции (х.ф.)  $BA$  сигналов при возникновении неисправностей. Синтезирована совокупность  $ДП$ , которая позволила увеличить глубину диагностирования и разработать алгоритмы автоматической экспертной системы поддержки принятия решений.

Предложен способ вибродиагностики  $ПК$  по спектральным инвариантам (пат. 2 337 341), согласно которому вибрацию измеряют в точках, близлежащих к диагностируемому узлам машины, выделяют информативные составляющие – гармоники частоты повторения полного цикла  $ПМ$ , оценивают их дисперсии (см. рис. 3), формируют совокупности гармоник и определяют спектральные инварианты  $K_{(j:l)}^{(p:s)}$  в виде отношения дисперсий соответствующих совокупностей гармоник:



$$K_{(j \div l)}^{(p \div s)} = \sum_{m=p}^s A_m^2 / \sum_{i=j}^l A_i^2, \quad (4)$$

где  $A_i, A_m$  – амплитуды соответственно  $i^{\text{ой}}, m^{\text{ой}}$  гармоник в спектре вибрации диагностируемой ПМ;  $j \leq p, j=1, \dots, k, \dots, l; l \geq s, l=1, \dots, r, \dots, s; \{j, k, l, p, r, s\} \in [1, 2, \dots, 9]$ .

Весьма эффективным является использование кепстральных компонент в качестве информативных составляющих таких, как

$$C_{(1 \div 3)}^{(1)} = A_1^2 / \sum_{i=1}^3 A_i^2, C_{(1 \div 3)}^{(2)} = A_2^2 / \sum_{i=1}^3 A_i^2 \quad (5)$$

где  $A_1 - A_3$  – амплитуды  $1^{\text{ой}}, 2^{\text{ой}}, 3^{\text{ей}}$  кепстральных составляющих, соответствующих гармоникам оборотной частоты  $0,5 f_0; f_0; 2f_0$ , что позволяет повысить достоверность диагностирования за счет обобщения одних классов неисправностей и детализации других.

На основе теоретико-эмпирических исследований разработана система определяющих критериев неисправностей, представляющая собой базу закономерностей в виде табличной зависимости, связывающей место измерения вибрации, узел диагностируемой машины, вид неисправности, соответствующий спектральный инвариант, обусловленной причинно-следственными связями между ними (табл. 3).

Таблица 3

Система определяющих критериев неисправностей: спектральные инварианты

№	Место измерения вибрации	Узлы поршневой машины	Классы неисправностей	$K_{(j \div l)}^{(p \div s)}$
1.	Крейцкопф	Кривошипно-ползунный механизм, (КПМ)	Зазоры, состояние поверхностей скольжения, поверхности втулки и подшипника верхней головки шатуна, жесткость крепления штока	$K_{(1 \div 3)}^{(1)}$
2.	Крейцкопф	Кривошипно-шатунный механизм, (КШМ)	Зазоры, состояние шатунных и коренных подшипников, жесткость крепления нижней головки шатуна	$K_{(1 \div 5)}^{(3 \div 5)}$
3.	Клапан; цилиндр в зоне клапанов	Клапан	Поломка пластин, пружин, уменьшение параметра «время-сечение», гидроудар, нарушение технологического процесса	$K_{(1 \div 3)}^{(1)}$
4.	Крышка цилиндра	Детали цилиндропоршневой группы	Зазоры, износ поршневых колец, поверхности гильзы, ослабление крепления штока к поршню (зазоры втулка-поршень), гидроудар, нарушение технологического процесса	$K_{(1 \div 3)}^{(1)}$
5.	Подшипник поршневой машины со стороны привода или маховика	Вращающиеся детали вала, муфта	Дисбаланс	$K_{(1 \div 9)}^{(1)}$
6.		Валы поршневой машины и привода	Несоосность	$K_{(1 \div 9)}^{(2 \div 3)}$
7.		Муфта	Повышенные зазоры, ослабление крепления, ослабление жесткости	$K_{(1 \div 9)}^{(3 \div 9)}$

Анализ отличительных признаков предлагаемого способа диагностики технического состояния поршневых машин и обеспечиваемых ими технических результатов показал следующее:

– использование спектральных инвариант в виде отношения дисперсий гармонических составляющих позволяет провести нормирование уровней диагностических признаков неисправностей, лежащих в диапазоне от 0 до 1, а также обобщенно и единообразно решить задачу диагностирования различных узлов и механизмов *ПМ* – одноименные спектральные инварианты, полученные по амплитудно-частотному спектру вибрации с датчиков, установленных в различных точках *ПМ*, содержат информацию о состоянии различных узлов и механизмов *ПМ*;

– использование в качестве амплитудно-частотного спектра вибрации корпуса *ПМ* спектра огибающей виброакустического сигнала и выделение гармонических составляющих дает возможность проводить анализ спектральных инвариант в различных частотных диапазонах виброакустической активности, характерных для различных узлов и деталей поршневых машин;

– наличие базы закономерностей, полученной путем многолетнего мониторинга состояния нескольких десятков поршневых машин, позволяет повысить достоверность диагностирования узлов и деталей *ПМ* и обеспечивает быстрое, полное и достоверное диагностирование поршневых машин без проведения трудоемких предварительных исследований каждой машины.

Исходя из разработанных моделей механизма формирования структур виброакустических сигналов путем статистической обработки их параметров предложено формировать диагностические признаки дефектов и неисправностей поршневых компрессоров на основе *СКЗ* виброускорения ( $A_{rms}$ ), виброскорости ( $V_{rms}$ ), виброперемещения ( $S_{rms}$ ), амплитуды *ВА* сигнала ( $A_{peak}$ ,  $V_{peak}$ ,  $S_{peak}$ ) за несколько оборотов вала и с использованием когерентной (синхронной пиковой) селекции сигнала с заданным уровнем вероятности, параметров характеристической функции и спектральных инвариант виброакустического сигнала.

В процессе обработки эмпирических данных, полученных из баз данных *СДМ*, установлена закономерность ортогональности (декорреляции) параметров виброакустических сигналов поршневых машин: *СКЗ*, амплитуд, пик-фактора  $a(t)$ ,  $v(t)$ ,  $s(t)$ , которая обусловлена разнообразием причин и механизмов износа узлов и деталей поршневых компрессоров, порождающих случайные виброакустические процессы в разных частотных полосах (табл. 4).

Таблица 4

Коэффициенты корреляции между параметрами *ВА* сигнала

Ампли-туда	Осевое направление			Впускной клапан			Крейцкопф			Коренной подшипник		
	$A_{rms}$	$V_{rms}$	$S_{rms}$	$A_{rms}$	$V_{rms}$	$S_{rms}$	$A_{rms}$	$V_{rms}$	$S_{rms}$	$A_{rms}$	$V_{rms}$	$S_{rms}$
100%	0,88	0,49	0,33	0,90	0,31	0,56	0,58	0,52	0,29	0,722	0,055	0,018
99%	0,95	0,40	0,30	0,95	0,54	0,81	0,82	0,53	0,48	0,806	0,418	0,571
98%	0,97	0,39	0,37	0,96	0,50	0,88	0,87	0,55	0,51	0,818	0,525	0,682
97%	0,98	0,38	0,41	0,97	0,53	0,91	0,90	0,56	0,53	0,802	0,574	0,726
96%	0,99	0,38	0,45	0,98	0,55	0,93	0,91	0,59	0,57	0,792	0,600	0,776
95%	0,99	0,38	0,49	0,99	0,57	0,93	0,93	0,62	0,62	0,780	0,620	0,800
94%	0,99	0,39	0,52	0,99	0,57	0,93	0,94	0,65	0,64	0,769	0,635	0,807
93%	0,99	0,40	0,54	0,99	0,56	0,93	0,95	0,67	0,65	0,768	0,648	0,814
82%	0,97	0,50	0,64	0,95	0,61	0,94	0,97	0,80	0,59	0,761	0,728	0,741
P-F	-0,37	-0,07	-0,45	-0,23	-0,13	-0,18	-0,67	-0,36	-0,69	-0,58	-0,38	-0,54

Анализ данных, собранных в реальных условиях эксплуатации ПК, позволил получить следующие новые результаты (табл. 4, рис. 4):

1. Коэффициент корреляции между СКЗ  $a(t)$ ,  $v(t)$ ,  $s(t)$  и их амплитудами показывает достаточно высокую статистическую зависимость для  $a(t)$  и независимость для  $v(t)$  и  $s(t)$ ;

2. Пик-фактор (P-F – отношение  $A_{peak}$  к  $A_{rms}$ ) коррелированных величин является статистически независимым параметром от  $A_{peak}$  и  $A_{rms}$ .

3. Пик-фактор (отношение  $V_{peak}$  ( $S_{peak}$ ) к  $V_{rms}$  ( $S_{rms}$ )) некоррелированных параметров  $v(t)$ ,  $s(t)$  является статистически независимым параметром от амплитуды и СКЗ.

4. Эмпирические функции распределения (ЭФР) амплитуд  $a(t)$ ,  $v(t)$ ,  $s(t)$  имеют перегиб в точке по уровню вероятности 0,99 для субъектов в состоянии ДОПУСТИМО, а в диапазоне вероятностей от 0,82 до 0,99 их можно аппроксимировать прямой линией с  $R^2 \geq 0,9$ .

5. Определение амплитудного значения вибропараметров по уровню вероятности 0,99 позволяет на самой ранней стадии определять появление неисправностей ПМ.

6. При изменении состояния субъектов точка перегиба функций распределения параметров вибросигнала смещается в сторону меньших значений – с 0,99 до 0,93.

Учитывая, что при изменении состояния субъектов точка перегиба ЭФР параметров вибросигнала смещается в сторону меньших значений с 0,99 до 0,93 (рис. 4) целесообразно при использовании в качестве диагностических признаков неисправностей узлов и деталей поршневых машин амплитуды вибропараметров фиксировать их величины при уровне вероятности от 0,99 (малый риск пропуска отказа, большая вероятность ложной тревоги) до 0,93 (достаточно велик риск пропуска отказа, достаточно малая вероятность ложной тревоги).

Анализ отличительных признаков способа диагностирования ПМ по СКЗ  $a(t)$ ,  $v(t)$ ,  $s(t)$  ВА сигнала и обеспечиваемых ими технических результатов показал, что:

1. СКЗ вибропараметров являются энергетической оценкой виброактивности поршневых машин, которая характеризует изменение ТС узлов и деталей ПМ;

2. Нормирование СКЗ параметров ВА сигналов, полученных в различных точках ПМ и с различных узлов, позволяет оценивать техническое состояние этих узлов;

3. СКЗ параметров виброакустических сигналов являются адекватными оценками изменения технологического процесса компримирования.

В результате статистической обработки сигналов и трендов СКЗ параметров виброакустических сигналов и анализа данных по ремонтам можно констатировать:

1. СКЗ  $a(t)$  ВА сигнала с датчиков, установленных на клапанах, крышке цилиндров, крейцкопфе и коренных подшипниках, адекватно отражает изменение ТС узлов и деталей. Особенно эффективным является использование СКЗ  $a(t)$  для обнаружения заброса конденсата в полость нагнетания и возникновения гидроударов;

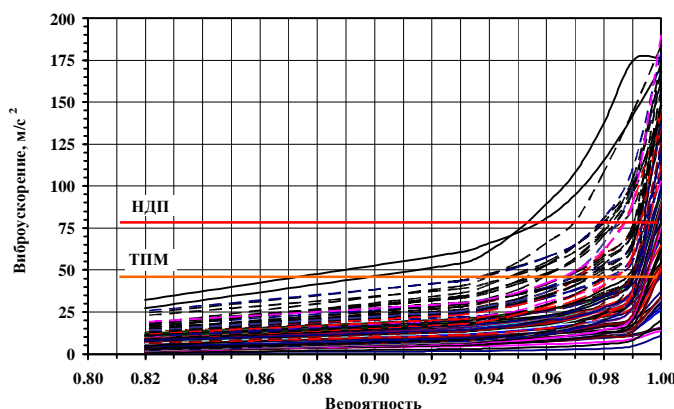


Рис. 4. Клапан нагнетательный. ЭФР амплитуд  $a(t)$

2. СКЗ  $s(t)$  виброакустического сигнала с датчиков, установленных на различных узлах ПК, также адекватно отражает изменение ТС этих узлов. Наиболее эффективным является использование СКЗ  $s(t)$  для оценки опасности влияния гидроударов на жесткость крепления корпусных деталей ПК и воздействия на фундамент;

3. СКЗ  $v(t)$  виброакустического сигнала с датчиков, установленных на различных узлах ПК, является самым чувствительным параметром к неисправностям, связанным с неуравновешенностью вращающихся и движущихся масс.

Исходя из циклограммы работы ПК и индикаторной диаграммы можно выделить наиболее информативные сегменты по углу поворота вала, в которых ВА сигнал будет адекватно отражать изменение технического состояния и появление неисправностей и дефектов, например, клапанов (рис. 5).

Анализ временной реализации ВА сигнала с датчика на клапанах, показывает, что при возникновении неисправностей всасывающего клапана  $A_{sv1}$  значительно возрастает и достигает нескольких десятков  $m/c^2$  (рис. 6).

Когерентный анализ ВА сигнала с датчика на крейцкопфе показывает влияние техпроцесса на динамические нагрузки узлов и деталей КТМ: заброс конденсата в полости нагнетания приводит к увеличению амплитуды  $a(t)$  в 3...5 раз именно в моменты открытия клапанов ( $A_{sv1}, A_{pv2}, A_{sv2}, A_{pv2}$ ) (рис. 7).

Взаимодействия деталей в зазорах и возникающие динамические перегрузки эффективно и адекватно отражаются на трендах параметров  $A_{td}$ ,  $A_{bd}$ . Тренд параметра  $A_{td1}$  виброакустического сигнала с датчика на крышке цилиндра (рис. 8) показывает возникновение гидроударов при забросе конденсата.

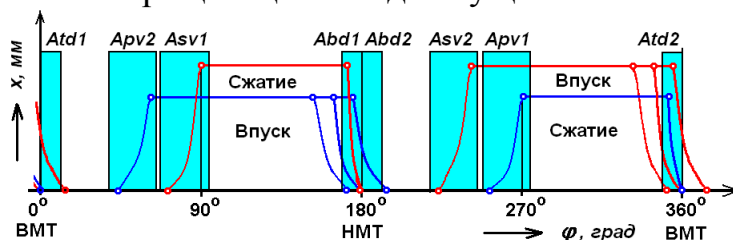


Рис. 5. Циклограмма работы ПК (зависимость высоты поднятия пластин клапана от угла поворота вала)

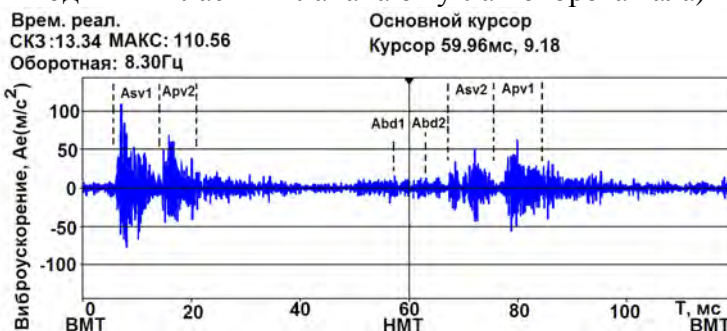


Рис. 6. ВА сигнал с датчика на клапанах

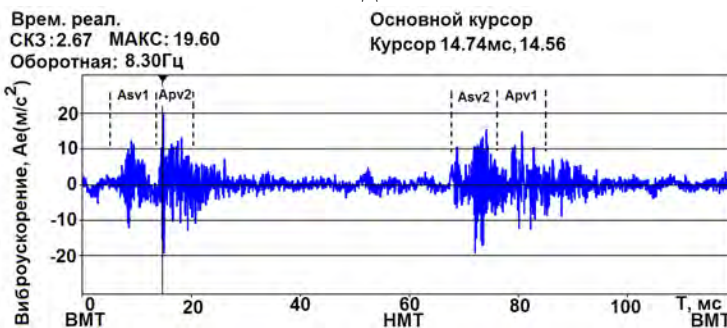


Рис. 7. ВА сигнал с датчика над крейцкопфом – повышенная динамическая нагрузка

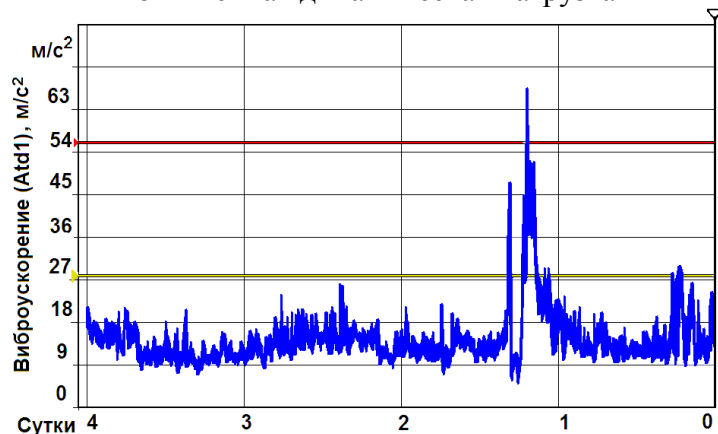


Рис. 8. Тренд параметра ВА сигнала – выбор зазоров после БМТ

С учетом циклограммы работы компрессора, динамики *КШМ* и на основе опыта эксплуатации *СДМ* сформирована система определяющих критериев неисправностей, которая представлена в виде базы закономерностей, связывающей параметры виброакустических сигналов с учетом циклограммы работы поршневых компрессоров с датчиков, установленных на различных узлах, с неисправностями этих узлов и их деталей, а также нарушениями технологического режима эксплуатации компрессора (табл. 5).

Таблица 5

Система определяющих критериев неисправностей: параметры сигнала по углу поворота вала

Место измерения вибрации	Узлы поршневой машины	$A_{td1}; A_{bd2}$	$A_{bd1}; A_{td2}$	$A_{sv1}; A_{sv2}$	$A_{pv2}; A_{pv1}$
Цилиндр	Детали ЦПГ	Зазор между поршневыми кольцами и гильзой, неисправность колец, ослабление крепления поршня к штоку, гидроудар		Поломка пластин, пружин, уменьшение параметра «времясечение», наличие конденсата	
Клапан; цилиндр	Клапан	Наличие конденсата, гидроудар		Поломка пластин, пружин, уменьшение параметра «времясечение», наличие конденсата	
Крейцкопф	Кривошипно-ползунный механизм	Ослабление крепления штока, гидроудар		Зазоры, состояние поверхностей скольжения крейцкопфа	
		Крепление штока	Зазоры верхней головки шатуна		
Коренной подшипник	Кривошипно-шатунный механизм	Зазоры, состояние нижней головки шатуна, коренных подшипников		Ослабление крепления нижней головки шатуна	

С целью оценки возможности использования характеристической функции (х.ф.) *ВА* сигналов для формирования диагностических признаков неисправностей узлов и деталей *ПК* произведена обработка мгновенных значений *ВА* сигналов, полученных при трех состояниях клапанов (рис. 9). Впервые предложено в качестве *ДП* использовать величину модуля х.ф. при заданном значении параметра  $\nu$  или величину  $\nu$  при заданном значении модуля х.ф.

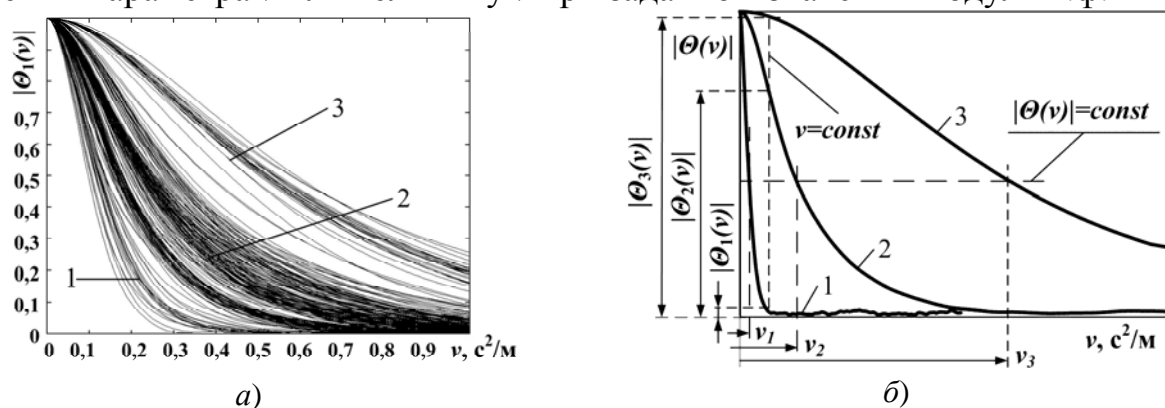


Рис. 9. Характеристическая функция *ВА* сигналов для трех *ТС*: 1 – *НДП*; 2 – *ТПМ*; 3 – *Допустимо*: а) экспериментальные значения; б) аппроксимация по критериям состояния

На основе анализа взаимосвязи изменений параметров *ВА* сигналов вследствие возникновения различных дефектов и неисправностей узлов и деталей *ПК* синтезирована система определяющих критериев неисправностей, представляющая собой обобщенную базу закономерностей в виде табличной



зависимости, связывающей место измерения вибрации, узел диагностируемой машины, вид неисправности, параметры  $VA$  сигнала, которая обусловлена причинно-следственными связями между ними. В таблице 6 приведён пример системы определяющих критериев для ЦПГ. Здесь приняты следующие обозначения:  $K_{(1+3)}^{(1)}$  –  $K1$ ;  $K_{(1+9)}^{(2+3)}$  –  $K3$ ;  $K_{(1+5)}^{(3+5)}$  –  $K5$ ;  $K_{(1+9)}^{(3+9)}$  –  $K9$ ;  $K_{(1+9)}^{(1)}$  –  $K19$ .

Таблица 6

Система определяющих критериев неисправностей: совокупности диагностических признаков

№	Вид неисправности	$A_{rms}$	$V_{rms}$	$S_{rms}$	$A_{peak}$	$V_{peak}$	$S_{peak}$	$A_{td1}$ ; $A_{bd2}$	$A_{bd1}$ ; $A_{td2}$	$A_{sv1}$ ; $A_{sv2}$	$A_{pv2}$ ; $A_{pv1}$	$K_{(1+l)}^{(p+s)}$	х.ф.
1.	Попадание в полость нагнетания жидкости -> гидроудар -> повышенные нагрузки	+						+	+				+
2.	Попадание в полость нагнетания конденсата -> повышенное давление -> повышенные нагрузки				+			+	+				+
3.	Попадание в полость нагнетания жидкости при недостаточной линейной жесткости крепления			+									+
4.	Удары вследствие повышенных зазоров, ослабления крепления (кольца)				+			+				$K5$	
5.	Удары вследствие повышенных зазоров, ослабления крепления деталей ЦПГ (поршень-шток)	+							+			$K5$	
6.	Клапаны: загрязнение; поломка пружин, пластин; несоответствие параметра «время-сечение» параметрам состава газа									+	+	$K1$	+
7.	Параметр «время-сечение» клапанов не соответствует параметрам состава газа вследствие наличия конденсата				+					+	+		+
8.	Ослабление крепления в осевом направлении		+	+								$K3$	

Примечание: Датчик расположен на торце цилиндра (по оси движения поршня), контролируются: детали ЦПГ, технологический процесс, клапаны.

**В четвертой главе** проведены исследования параметров  $VA$  сигналов поршневых машин при возникновении различных неисправностей и дефектов с использованием статистических методов обработки эмпирических данных по предложенной методике анализа статистических характеристик диагностических признаков и аппроксимации функции распределения ( $\Phi P$ ).

Одним из примеров использования предложенной методики является расчет статистических характеристик спектрального инварианта  $VA$  сигнала. В качестве исходных данных использовались 2754 временных реализаций  $VA$  сигналов, обработанных в Matlab, которые получены из архивов СДМ КОМПАКС®. Сигналы в

архивах сохранялись при изменении состояния клапанов по одному из контролируемых параметров. Гистограмма распределения (рис. 10) имеет три моды, что соответствует трём техническим состояниям клапанов.

После построения модифицированных эмпирических (ЭМФР) и регрессионных моделей функций распределения (РМФР) (рис. 11) получены теоретические функции распределения (ТФР) для каждого состояния в виде ФР Вейбулла-Гнеденко (рис. 12):

ДОПУСТИМО	ТПМ	НДП
$F(x) = 1 - e^{-\left[\frac{x-0,017}{0,1825}\right]^{2,5917}};$	$F(x) = 1 - e^{-\left[\frac{x-0,017}{0,5081}\right]^{6,7161}};$	$F(x) = 1 - e^{-\left[\frac{x-0,017}{0,8229}\right]^{11,183}}.$

Достоверность аппроксимации функции распределения определяет значение  $R^2$  (мера неопределенности по Линдеру или множественный коэффициент детерминации), который во всех случаях составлял величину не менее 0,99.

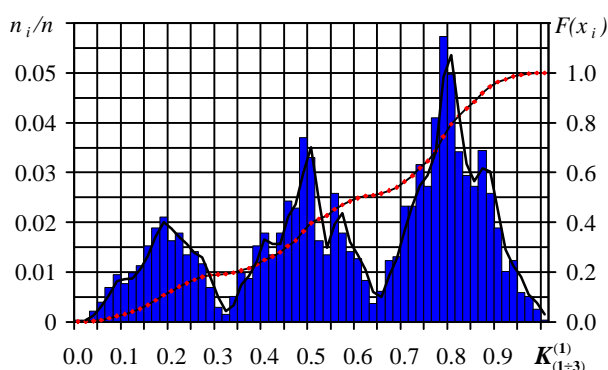


Рис.10. Гистограмма распределения  $K_{(1+3)}^{(1)}$

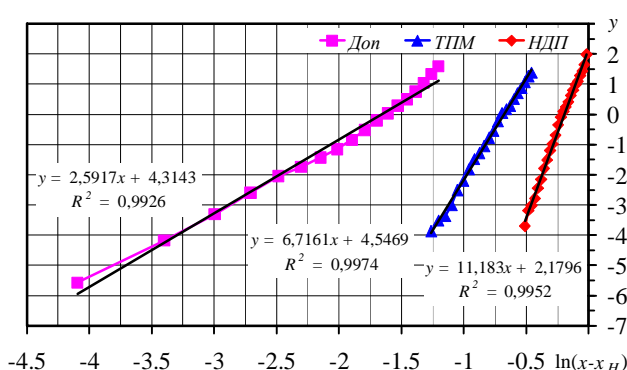


Рис.11. ЭМФР и РМФР  $K_{(1+3)}^{(1)}$

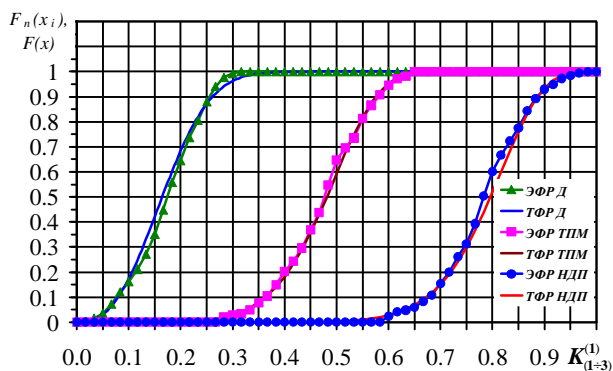


Рис. 12. ТФР и ЭФР  $K_{(1+3)}^{(1)}$

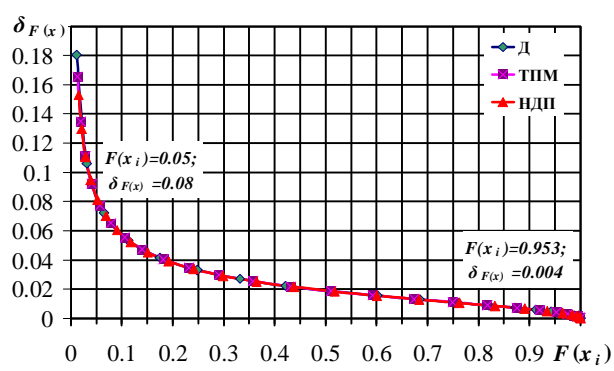


Рис. 13. Статистические погрешности ТФР

По полученным ФР определены пороговые величины диагностических признаков:

$$\text{Д} : K_{(1+3)}^{(1)} = x = 0,017 + 0,1893 \cdot \sqrt[2,5917]{-\ln(1-0,95)} = 0,29;$$

$$\text{ТПМ} : K_{(1+3)}^{(1)} = x = 0,017 + 0,5081 \cdot \sqrt[6,7161]{-\ln(1-0,95)} = 0,6;$$

$$\text{НДП} : K_{(1+3)}^{(1)} = x = 0,017 + 0,8229 \cdot \sqrt[11,183]{-\ln(1-0,95)} = 0,91.$$

При использовании метода дискретных выборок относительную среднеквадратическую случайную погрешность  $\delta_{F(x)}$  определения ФР  $F(x_i)$  некоррелированными выборками и погрешность  $\delta_{w(x)}$  оценки плотности вероятностей  $w(x_i)$

оценивались по формулам, предложенным Мирским Г.Я.:

$$\delta_{F(x_i)} = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \frac{(1-F(x_i))}{F(x_i)}}, \quad (6)$$

$$\delta_{w(x_i)} = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \frac{(1/h) - w(x_i)}{w(x_i)}}, \quad (7)$$

где  $N$  – число некоррелированных дискретных значений исходных данных;  $h$  – ширина интервала  $w(x_i)$ ,  $F(x_i) \geq 0,5$ .

Расчеты показали, что в области определения пороговых значений параметра  $K_{(1+3)}^{(1)}$  статистическая погрешность оценки функции  $F(x_i)=0,95$  не превышает 0,004 (рис. 13). Плотности  $w(x_i)$  распределения вероятностей признака (рис. 14) имеют большие величины статистической погрешности оценки функции  $w(x_i)$  и составляют:  $K_{(1+3)}^{(1)}=0,6$  –  $\delta_{w(x_i)} \approx 0,145$ ;  $K_{(1+3)}^{(1)}=0,9$  –  $\delta_{w(x_i)} \approx 0,12$ .

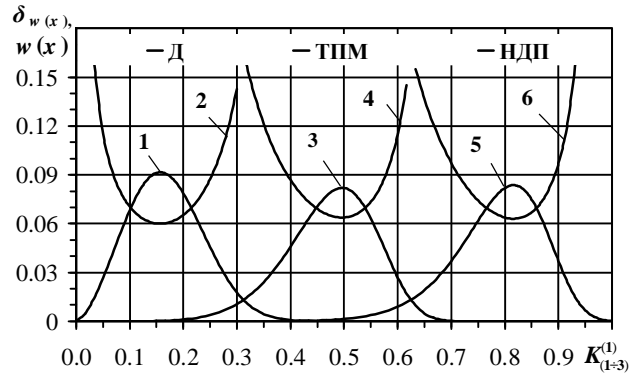


Рис. 14. Теоретические плотности  $w(x_i)$  распределения вероятностей (1, 3, 5) и их статистические погрешности (2, 4, 6)

Анализ статистических характеристик  $СКЗ$  и амплитуд виброускорения, виброскорости, виброперемещения, параметров виброакустических сигналов по углу поворота вала, спектральных инвариант позволил выявить закономерности их зависимости от технического состояния узлов, деталей, машины в целом: распределения вероятностей их мгновенных значений описываются законами распределения Вейбулла-Гнеденко с показателями степени от 0,6 до 20.

На основе полученных данных определены нормативные величины диагностических признаков для различных типов машин с частотами вращения 167, 300, 375, 500, 750 мин<sup>-1</sup>, используемых на предприятиях *НХК*. В качестве примера в табл. 7 приведены нормативные значения диагностических признаков для поршневых компрессоров типа 4ГМ16.

**В пятой главе** предложены ряд методических решений по выделению диагностических признаков и система определяющих критериев неисправностей на основе параметров *ВА* сигналов, позволяющая производить диагностирование и оценку технического состояния узлов и деталей поршневых компрессоров.

Разработаны методика и алгоритм преобразования исходного виброакустического сигнала и получения интегральных оценок первого и второго порядков на основе ортогональных базисных функций (расчет  $v(t)$  и  $s(t)$  путем интегрирования в частотной области и преобразования полученных данных во временную), которая существенно повышает достоверность диагностирования за счет уменьшения искажений виброакустического сигнала в процессе его интегральных преобразований (пат. 2 314 508).

Алгоритм преобразования *ВА* сигнала заключается в следующем:

- определяют мультипликативную функцию коррекции амплитуды и аддитивную функцию коррекции фазы сигнала для разных значений амплитуды, соответствующих исправному и указанным неисправным состояниям;



Система определяющих критериев неисправностей: нормативные величины диагностических признаков ПК типа 4ГМ16 ( $375 \text{ мин}^{-1}$ ) (см. рис. 1 б), табл. 2)

Параметр / Узел / ТС	ЦПГ (точки 1, 5)			Клапан (точки 2,3,6,7)			КПМ (точки 4, 8)			КП (точки 9-11)		
	Д	ТПМ	НДП	Д	ТПМ	НДП	Д	ТПМ	НДП	Д	ТПМ	НДП
$A_{rms}, \text{ м/с}^2$	7,1	14	28	8,7	18	28	3,6	7,1	14	3,6	7,1	14
$V_{rms}, \text{ мм/с}$	0,9	1,8	3,6	2,8	5,6	11,2	0,9	1,8	3,6	2,8	5,6	11,2
$S_{rms}, \text{ мкм}$	8,7	18	36	8,7	18	36	12	18	36	5,6	11,2	18
$A_{peak}, \text{ м/с}^2$	18	45	71	24	45	71	14	28	56	7,1	14	28
$S_{peak}, \text{ мкм}$	24	36	71	28	45	90	18	36	71	14	24	45
$A_{td1}, \text{ м/с}^2$	18	24	36	22	28	45	-	-	-	-	-	-
$A_{sv1}, \text{ м/с}^2$	18	24	36	22	28	45	-	-	-	-	-	-
$A_{pv2}, \text{ м/с}^2$	18	24	45	22	28	56	-	-	-	-	-	-
$A_{bd1}, \text{ м/с}^2$	22	28	56	28	36	71	-	-	-	-	-	-
$A_{bd2}, \text{ м/с}^2$	22	28	56	28	36	71	-	-	-	-	-	-
$A_{sv2}, \text{ м/с}^2$	14	18	36	18	24	45	-	-	-	-	-	-
$A_{pv1}, \text{ м/с}^2$	28	24	45	22	28	45	-	-	-	-	-	-
$A_{td2}, \text{ м/с}^2$	9	14	28	14	18	36	-	-	-	-	-	-
$K_{(1\div 3)}^{(1)}$	0,45	0,57	0,87	0,45	0,57	0,87	0,24	0,33	0,76	-	-	-
$K_{(1\div 5)}^{(3\div 5)}$	0,57	0,71	0,87	0,71	0,87	0,95	0,45	0,51	0,76	-	-	-
$K_{(1\div 9)}^{(1)}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,45	0,51	0,76
$K_{(1\div 9)}^{(2\div 3)}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,45	0,51	0,76
$K_{(1\div 9)}^{(3\div 9)}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,45	0,51	0,76

– выполняют БПФ сигнала; вычисляют функции коррекции амплитуды  $K_s(f_i)$  и фазы  $K_\phi(f_i)$  сигнала для каждого дискретного значения частоты  $f_i$ ; корректируют амплитуду  $S(f_i)$  и фазу  $\Phi(f_i)$  сигнала:

$$S_A(f_n) = \sum_{i=1}^n [S(f_i) \cdot K_s(f_i)], \quad \Phi_A(f_n) = \sum_{i=1}^n [\Phi(f_i) + K_\phi(f_i)], \quad (8)$$

получают откорректированный спектр сигнала  $S(f_n)$  и анализируют его для диагностики машины, либо используют для дальнейших преобразований для получения интегральных оценок первого и второго порядков:

$$S_V(f_n) = \sum_{i=1}^n [S_A(f_i) \cdot K_s(f_i) / f_i], \quad S_S(f_n) = \sum_{i=1}^n [S_A(f_i) \cdot K_s(f_i) / f_i^2]; \quad (9)$$

– по откорректированному спектру сигнала восстанавливают откорректированный сигнал путем обратного БПФ, оценивают его параметры и по ним осуществляют диагностику;

– коррекцию и преобразование сигнала выполняют автоматически.

Рисунок 15 иллюстрирует снижение искажений ВА сигнала (кривая 2 не имеет низкочастотного тренда) после проведения коррекции и получения интегральной оценки второго порядка (виброперемещение).

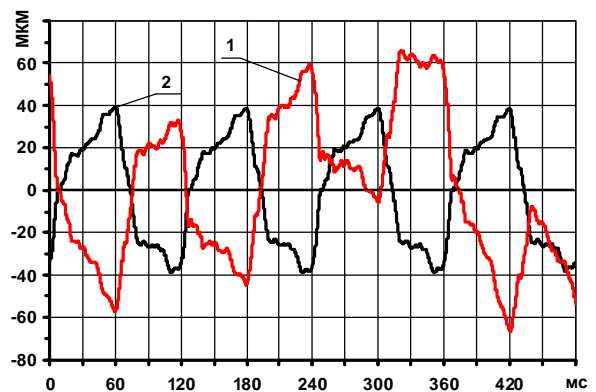


Рис. 15. Формы реализации ВА сигнала во временной области: 1 - до коррекции АФЧХ; 2 - после проведения коррекции.

Кепстральный анализ, являющийся одним из методов нелинейной (гоморфной) обработки сигналов, позволяет разделить во времени информацию о сигнале, полученную при нелинейных преобразованиях и модуляции, что актуально для анализа параметров *ВА* сигналов поршневых машин.

Разработаны методика и алгоритм преобразования исходного виброакустического сигнала для проведения его нелинейной обработки и выявления диагностических признаков, позволяющая повысить достоверность постановки диагноза за счет трансформации кепстра из координат «амплитуда кепстральных компонент – квефренция» в координаты «амплитуда кепстральных компонент – частота» и соответствующей линейризации оси расположения составляющих *ДП*, путем нелинейного преобразования масштаба частот (пат. 2 363 936). Кепстр  $C_S(\tau)$  от спектра  $S(\omega)$  строят по следующей формуле:

$$C_S(\tau) = F^{-1}\{\log|S(\omega)|^2\} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \ln|S(\omega)|^2 e^{i\omega\tau} d\omega = C_{SNL}(f_{NL}), \quad (10)$$

где  $F^{-1}$  – оператор обратного преобразования Фурье;  $C_S(\tau)$  – кепстральная компонента вибросигнала  $s(t)$ , где аргументом служит квефренция (время);  $C_{SN}(f_{NL})$  – модифицированная кепстральная компонента вибросигнала  $s(t)$ , где аргументом служит  $f_{NL}$  – частота в нелинейном масштабе  $f_{NL} = NL[1/\tau]$  при  $\tau_{MIN} \leq \tau \leq \tau_{MAX}$ ,  $f_{MIN} \leq f_{NL} \leq f_{MAX}$ ,  $NL[]$  – оператор нелинейного преобразования;

Анализ отличительных признаков предлагаемого способа диагностики объектов и обеспечиваемых ими технических результатов показал, что перевод кепстра из временной области в частотную, позволяет «растянуть» «сжатую» на временной шкале информацию о высокочастотных дефектах и более точно определить дефект, поскольку кепстр используется при анализе высокочастотных составляющих, когда спектр имеет полигармонический характер, то и полученный кепстр также может иметь громоздкую структуру в области малых значений квефренции, что затрудняет распознавание дефектов (рис. 16).

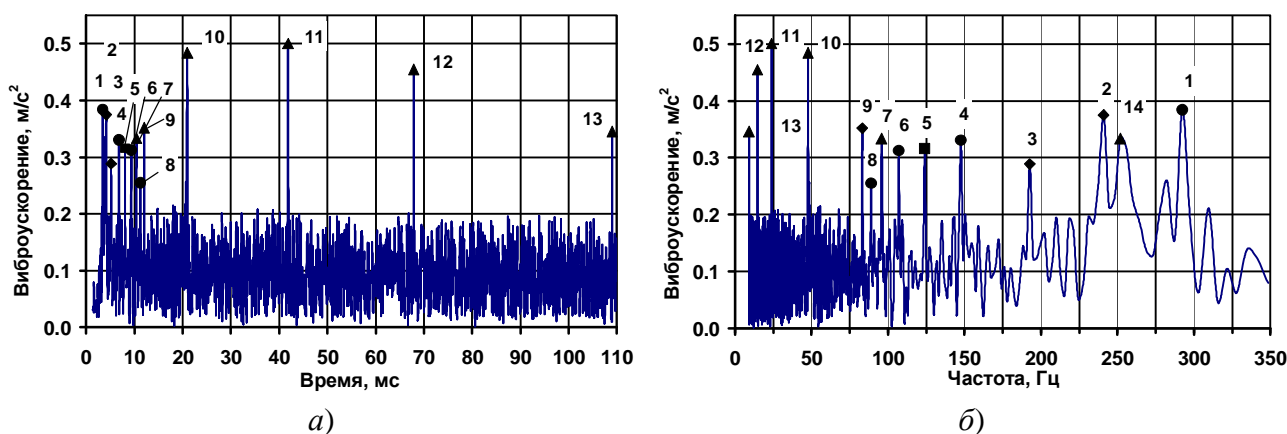


Рис. 16. Кепстр *ВА* сигнала, представленный в координатах: *а*) «амплитуда кепстральных компонент – квефренция»; *б*) «амплитуда кепстральных компонент – частота в логарифмическом масштабе». Амплитуды кепстральных компонент, соответствующие квефренциям и частотам дефектов, обозначены соответствующими цифрами.

На основе параметров *ВА* сигналов разработаны система определяющих критериев неисправностей (табл. 8) и алгоритм функционирования экспертной системы (рис.17), позволяющие проводить оценку технического состояния таких узлов, как *ЦПГ*, клапанов, *КПМ*, *КШМ*, коренных подшипников, нарушений технологического режима компримирования и других причин виброакустической активности поршневых компрессоров. При этом достигнут практически 100% объем диагностирования возникающих отказов по параметрам *ВА* сигналов при необходимой и, в большинстве случаев, достаточной глубине диагностирования (*ГД*), минимальном количестве датчиков *ВА* сигналов, а также достигнута инвариантность и единообразие применения разработанных методик и диагностических признаков для диагностирования узлов *ПК*.

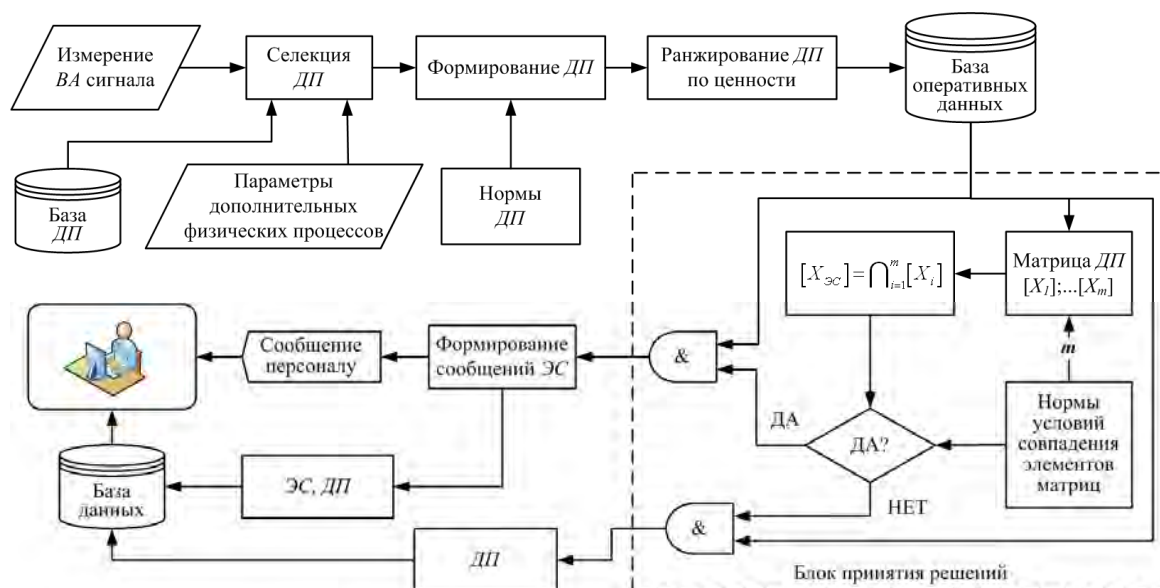


Рис. 17. Алгоритм функционирования экспертной системы (ЭС)

В частности, на основе анализа причинно-следственных связей параметров *ВА* сигнала датчика на цилиндре и причин *ВА* активности, дефектов и неисправностей поршневых компрессоров, таблицы полноты контроля по параметрам *ВА* сигнала, диагностических признаков неисправностей по параметрам *ВА* сигнала датчика на цилиндре в осевом направлении сформирована система диагностических признаков, которая содержит 11 основных (табл. 8) и 7 дополнительных диагностических признаков.

Автоматическое разделение классов неисправностей и соответствующих им экспертных сообщений основывается на присвоении *ценности* диагностическим признакам, возникающим как совместно, так и отдельно с учетом соответствия одинаковых классов неисправностей диагностическим признакам, полученным с других датчиков. Ценность диагностических признаков определяется на основе степени опасности возникновения наиболее тяжелой с точки зрения безопасности эксплуатации и последствий возникновения неисправности в плане ремонтно-восстановительных работ.

Сформированная система определяющих критериев дефектов, неисправностей, нарушений техрежима компримирования и других причин *ВА* активности поршневых компрессоров свидетельствует о том, что при использовании

5 датчиков *ВА* сигнала (на цилиндре в осевом направлении, нагнетательных и впускных клапанах, крейцкопфе, коренном подшипнике), датчика углового положения вала и датчика на *ПК* со стороны привода или на подшипнике привода, формируется 15 диагностических признаков по параметрам *ВА* сигналов, с помощью которых *СДМ* по безусловному алгоритму (рис. 17) в автоматическом режиме в темпе проведения измерений определяет 36 причин *ВА* активности *ПК*.

Таблица 8

Обобщенная система определяющих критериев неисправностей:  
база закономерностей *ДП* по параметрам *ВА* сигнала датчика на цилиндре

№	Диагностический признак	ГД	Неисправности и причины виброактивности <i>ПК</i>	Экспертное сообщение	Ценность
1.	$[A_{rms}] \& \{[A_{bd1}] + [A_{td2}]\}$	<i>A</i>	Попадание в полость нагнетания жидкости -> гидроудар -> повышенные нагрузки,	Гидроудар, проверка техрежим	100
2.	$[A_{peak}] \& \{[A_{td1}] + [A_{bd2}]\}$	<i>B</i>	Попадание в полость нагнетания конденсата -> повышенное давление -> повышенные нагрузки,	Конденсат, проверка техрежим	80
3.	$[S_{rms}]$	<i>B</i>	Попадание в полость нагнетания жидкости при недостаточной линейной жесткости крепления	Гидроудар, проверка крепление	90
4.	$[S_{peak}]$	<i>Г</i>	Попадание в полость нагнетания жидкости при нелинейной жесткости крепления	Гидроудар, проверка целостность крепления	100
5.	$[A_{peak}] \& \{[A_{td1}] + [A_{bd2}]\} \& \left[ K_{(1 \div 5)}^{(3 \div 5)} \right]$	<i>Д</i>	Удары вследствие повышенных зазоров, ослабления крепления (кольца);	Проверь зазоры, кольца	70
6.	$[A_{rms}] \& \{[A_{bd1}] + [A_{td2}]\} \& \left[ K_{(1 \div 5)}^{(3 \div 5)} \right]$	<i>E</i>	Удары вследствие повышенных зазоров, ослабления крепления деталей <i>ЦПГ</i> (поршень-шток);	Проверь зазоры, крепление поршня	90
7.	$\{[A_{sv1}] + [A_{sv2}]\} \& \left[ K_{(1 \div 3)}^{(1)} \right]$	<i>Ж</i>	Впускные клапаны: загрязнение; поломка пружин, пластин; несоответствие параметра «время-сечение» параметрам газа	Проверь впускные клапаны	80
8.	$\{[A_{pv1}] + [A_{pv2}]\} \& \left[ K_{(1 \div 3)}^{(1)} \right]$	<i>З</i>	Нагнетательные клапаны: загрязнение; поломка пружин, пластин; несоответствие параметра «время-сечение» клапана параметрам состава газа	Проверь нагнетательные клапаны	80
9.	$\{[A_{sv1}] + [A_{sv2}]\} \& [Ap]$	<i>И</i>	Параметр «время-сечение» впускных клапанов не соответствует параметрам состава газа вследствие наличия конденсата	Проверь впускные клапаны	90
10.	$\{[A_{pv1}] + [A_{pv2}]\} \& [A_{peak}]$	<i>К</i>	Параметр «время-сечение» клапанов не соответствует параметрам состава газа вследствие наличия конденсата	Проверь нагнетательные клапаны	90
11.	$\{[S_{rms}] + [V_{rms}]\} \& \left[ K_{(1 \div 9)}^{(2 \div 3)} \right]$	<i>Л</i>	Ослабление крепления в осевом направлении	Проверь крепление	100

В шестой главе на основе разработанных моделей и в соответствии с задачами исследования разработаны элементы адаптивных *СДМ*, целью которых является получение информации о состоянии агрегата и *НХК* в необходимом количестве и качестве для обеспечения наблюдаемости его технического состояния, позволяющие в реальном масштабе времени путем использования алгоритмов экспертной системы поддержки принятия решений реального времени автоматически осуществлять постановку диагноза в темпе измерения диагностических сигналов и удовлетворяющие требованиям ГОСТ Р 53564, СА 03-002-05.

Реализация принципа информационной полноты СДМ (ГОСТ Р 53564, СА 03-002-05) основывается на количественной оценке величин ДП, которая связана с погрешностями учета характеристик канала распространения ВА сигнала, измерительного тракта, аналого-цифрового преобразования, алгоритмов и параметров цифровой обработки измеренного сигнала.

На основе теории спектрального анализа сигналов (Харкевич А.А.) и вибрации (Сидоренко М.К.) можно показать, что для разделения спектральных составляющих с частотами  $f_{i+1}$  и  $f_i$  разрешение по частоте  $\Delta f$  в спектре должно быть:

$$\Delta f \leq f_i \cdot (d-1)/4, \quad (11)$$

где  $d$  – отношение частот соседних спектральных составляющих  $f_{i+1}$  и  $f_i$ , генерируемых кинематически связанными узлами, которое постоянно и не зависит от оборотов.

Согласно (11) определены параметры аналого-цифрового преобразования и цифровой обработки ВА сигналов для ПК с различными частотами вращения (табл. 9).

Таблица 9

Параметры аналого-цифрового преобразования и цифровой обработки ВА сигналов

Параметр / частота вращения	167 мин <sup>-1</sup>	300 мин <sup>-1</sup>	375 мин <sup>-1</sup>	500 мин <sup>-1</sup>	750 мин <sup>-1</sup>
1. Первая оборотная, $f_0$ , Гц	2,783	5	6,25	8,33	12,5
2. Разрешение по частоте $\Delta f$ , Гц	0,566	1	1,25	2,083	2,5
3. Длительность выборки $T_r$ , мс	1796	1000	800	480	400
4. Частота дискретизации $f_s$ , Гц	18240	16384	20480	17066	20480
5. Максимальная частота $f_{MAX}$ , Гц	9120	8192	10240	8533	10240
6. Длина выборки $N_{MIN}$	32768	16384	16384	8192	8192
7. Длина выборки $N_{MAX}$	65576	32768	32768	16384	16384

Известно, что выборочная спектральная плотность случайного процесса будет давать статистически несостоятельные (т.е. неустойчивые) оценки спектра, если не используется операция вычисления математического ожидания спектральных составляющих или усреднения спектра. При этом нормированная среднеквадратичная ошибка  $\varepsilon_r$  оценки спектральной плотности связана с разрешающей способностью по частоте  $B_e$ :

$$B_e' = \frac{n_d}{T_r}, \varepsilon_r' = \sqrt{\frac{1}{n_d}}; B_e'' = \frac{L}{T_r}, \varepsilon_r'' = \sqrt{\frac{1}{L}}; B_e''' = \frac{n_d L}{T_r}, \varepsilon_r''' = \sqrt{\frac{1}{n_d L}}; T_r = \frac{1}{B_e'''' (\varepsilon_r'''' )^2}, \quad (12)$$

где  $B_e', B_e'', B_e'''$  – разрешающая способность по частоте при усреднении по отрезкам, частотам, совместно по отрезкам и частотам соответственно при усреднении по частотам  $L$  и сегментам  $n_d$  реализации методами Даньелла и Бартлетта.

С целью выявления потенциальных возможностей усреднения выборки длиной 32768 отсчетов и снижения  $\varepsilon_r$  методом Уэлча, в котором подход Бартлетта применяется к перекрывающимся сегментам, проведен корреляционный анализ сегментов временной реализации ВА сигнала поршневого компрессора и выявлено, что коэффициент корреляции  $\rho_{xy}$  двух реализаций, полученных из одной выборки и сдвинутых на 45 градусов по углу поворота вала, достигает 0,2 в области ВМТ, на остальных интервалах не превышает 0,05 (рис. 18). В результате из выборки длиной  $N_{MAX}=32768$  отсчетов путем сдвига отсчетов на 45 градусов

по углу поворота вала можно формировать  $n_d=40$  сегментов временной реализации длиной  $N_{MIN}=16384$  отсчета каждый.

Для расчета спектральных инвариант необходимо знать величины спектральных составляющих именно на гармониках частоты вращения вала  $f_0$ , поэтому построена зависимость  $\varepsilon_r$  спектральных составляющих на частотах  $kf_0$  (рис. 19), которая показывает, что  $\varepsilon_r$  оценки величины спектральных составляющих  $kf_0$  при использовании  $n_d=40$  сегментов и усреднении полученных спектров, не превышает 0,05 (рис. 19, график 5). Дополнительное усреднение по трем соседним частотам ( $L=3$ ) незначительно уменьшает величину  $\varepsilon_r$  (рис. 19, график 6). На рисунке 19 график 1 соответствует  $\varepsilon_r$  при усреднении по 11 отдельным реализациям; график 2 – дополнительно произведено усреднение по трем частотам; график 3 – усреднение по 11 сегментам одной реализации; график 4 – дополнительно произведено усреднение по трем частотам.

Реализован принцип (пат. 2 314 508) коррекции неидеальностей измерительных трактов вычислительными методами на основе применения автоматической коррекции сигнала для обеспечения линейной АЧХ и ФЧХ измерительного канала (рис. 20). Согласно данному способу, для вибродиагностической аппаратуры получают АЧХ и ФЧХ виброканала путем возбуждения вибросигнала в датчике в заданном диапазоне частот и амплитуд.

Полученные АЧХ и ФЧХ используют для получения линейного виброизмерительного канала путем автоматического их применения при приеме и обработке сигнала. При этом отпадает необходимость в поэлементной калибровке составляющих измерительного канала, которая к тому же не гарантирует линейность всего тракта.

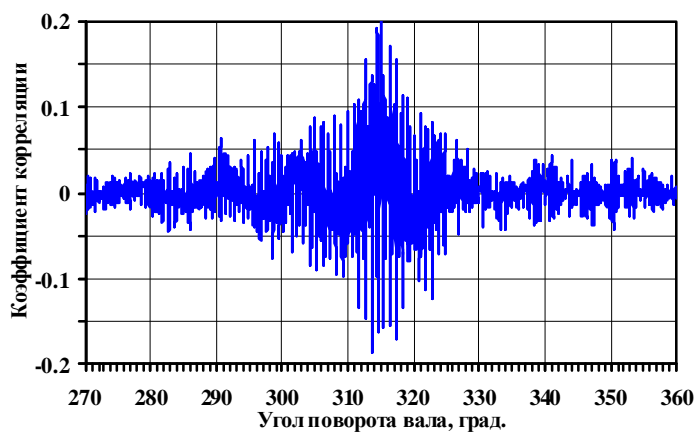


Рис. 18. Взаимная корреляционная функция двух реализаций ВА сигнала (сдвига 45 град.)

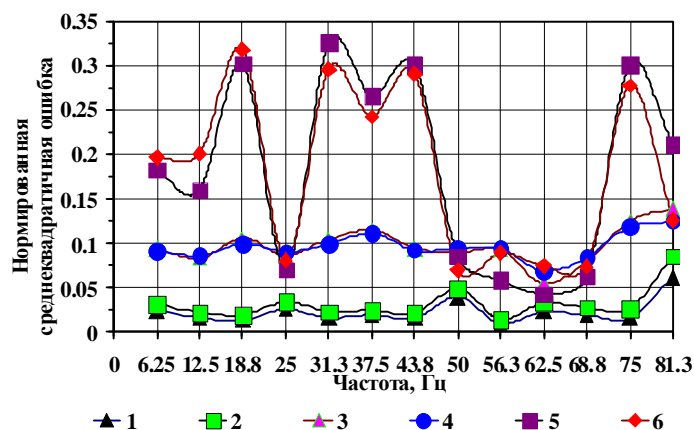


Рис. 19. Зависимость  $\varepsilon_r$  спектральных составляющих на частотах оборотных гармоник

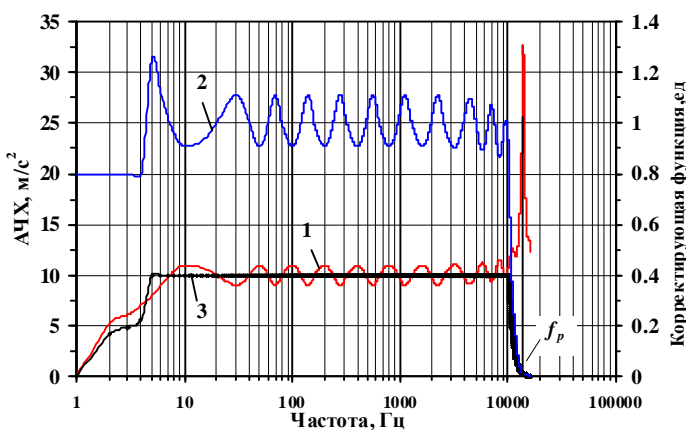


Рис. 20 – Способ коррекции АЧХ:

1 – до применения ФК; 2 – функция коррекции (ФК); 3 – после применения ФК



Коррекцию сигнала для обеспечения линейной  $AЧХ$  и  $\PhiЧХ$  выполняют автоматически путем введения функции коррекции ( $\PhiК$ ) по формулам (рис. 20):

$$K_A(f_i) = 1/A(f_i), \text{ при этом } K_A(f_i) \cdot A(f_i) = 1; \quad (13)$$

$$K_\varphi(f_i) = -\varphi(f_i), \text{ при этом } K_\varphi(f_i) + \varphi(f_i) = 0, \quad (14)$$

где  $A(f_i)$  –  $AЧХ$  канала;  $\varphi(f_i)$  –  $\PhiЧХ$  канала;  $K_A(f_i)$  – мультипликативная  $\PhiК$  амплитуды канала;  $K_\varphi(f_i)$  – аддитивная  $\PhiК$  фазы канала;  $i$  – порядковый номер полосы  $БПФ$ -спектра;  $i=1, \dots, N$  – количество полос  $БПФ$  преобразования.

В основе технологии мониторинга и диагностирования поршневых машин лежит сбор и обработка данных (рис. 21), которые обеспечивают определение дефектов и неисправностей поршневых машин с заданной глубиной их детализации, достоверностью и степенью их опасности. Реализация данной технологии основывается на использовании предложенных моделей структуры виброакустических сигналов при возникновении различных неисправностей поршневых компрессоров (Глава 2), совокупности (Глава 3) и нормативных значений диагностических признаков (Глава 4), способов их преобразования и системы определяющих критериев (Глава 5).



Рис. 21 – Методология обработки сигналов

Методология мониторинга и технология  $ВА$  диагностирования (рис. 22) представлены на основе известной схемы, предложенной Генкиным М.Д. и Соколовой А.Г.

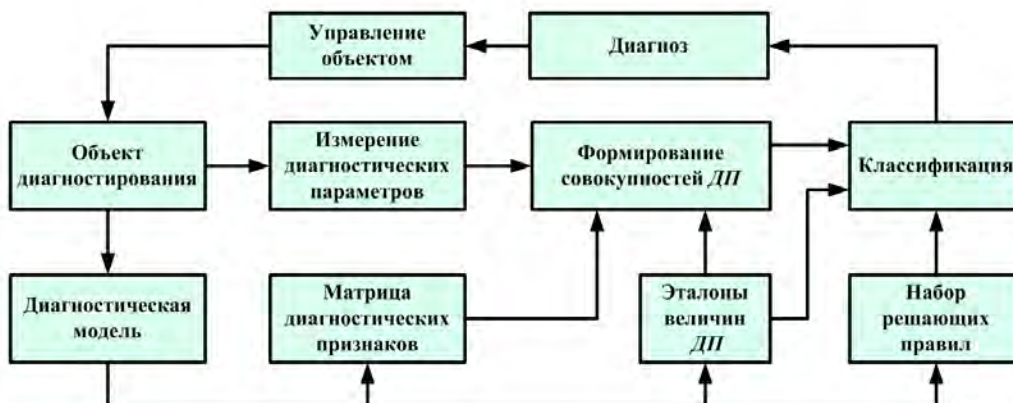


Рис. 22. Методология мониторинга и технология  $ВА$  диагностирования

Диагностическая модель, построенная на основе моделей механизмов формирования структур виброакустических сигналов, определяет матрицу диагностических признаков (см. табл. 5, 7, 8), их эталонные значения (см. табл. 6) и ценность (см. табл. 8), определяющих функционирование набора решающих

правил. Методология построения систем обеспечивает измерение, анализ параметров диагностических сигналов, расчет и формирование диагностических признаков и диагноза на основе анализа параметров  $VA$  сигналов, а технология и алгоритмы мониторинга и диагностирования поршневых компрессоров, лежащие в основе реализаций конфигураций *СДМ КОМПАКС*<sup>®</sup>, в т.ч. с учетом использования переносных средств диагностики Compac<sup>®</sup>-micro (пат. на пром. образцы № 44623, 44991), отвечают требованиям ГОСТ Р 53563, ГОСТ Р 53564 СА 03-002-05, СТО-03-002-08, СТО 03-004-08, СТО 03-015-11 и дают возможность осуществлять мониторинг технического состояния поршневых компрессоров в реальном времени.

Опыт использования *СДМ* для мониторинга технического состояния и диагностики поршневых компрессоров *НХК* и результаты мониторинга и диагностирования подтверждают эффективность применения *СДМ КОМПАКС*<sup>®</sup>. Приведенные копии экранов (рис. 23, 24) системы *КОМПАКС*<sup>®</sup> показывают функционирование автоматической экспертной системы поддержки принятия решений в виде светофорных пиктограмм и текстовых сообщений. Тренд на рис. 8 отражает адекватность реакции диагностического признака  $A_{td1}$  на заброс конденсата и возникновение гидроударов. Тренды на рис. 25, 26 показывают эффективность и адекватность реакции предложенных диагностических признаков на изменения технического состояния узлов *ПК*

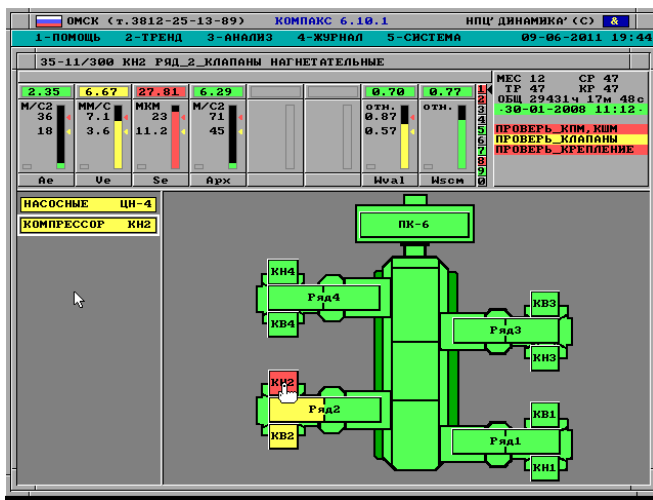


Рис. 23. Экран МОНИТОР показывает состояние *ПК* и сообщения ЭС



Рис. 24. Тренды  $V_{rms}$  и  $S_{rms}$  отражают процесс виброналадки по параметрам вибрации

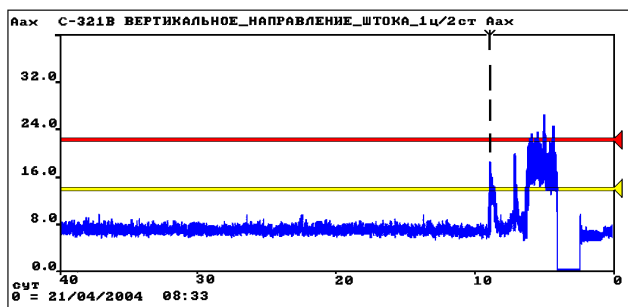


Рис. 25. Тренд параметра  $A_{amp1}$  штока отражает изменение  $TC$  и эффективность ремонта

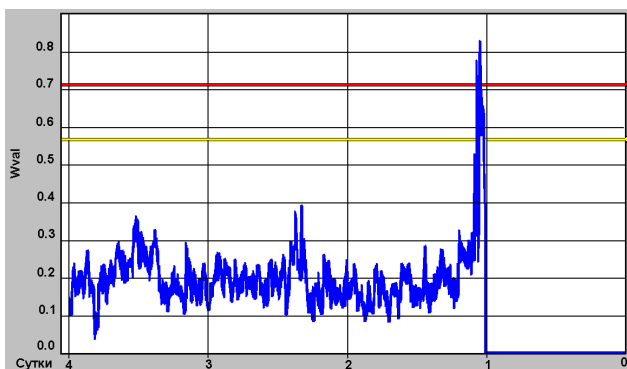


Рис. 26. Тренд спектрального инварианта клапана при ухудшении его состояния



Результаты внедрения и эксплуатации *СДМ КОМПАКС®* на установке гидроочистки дизельных топлив Л-24/9, результатов ремонтов поршневых компрессоров на установке Л-24/9 и комплекса глубокой переработки мазута (*КТ-КХ*), эксплуатирующих по три однотипных компрессора, компримирующих водородосодержащий газ, показывают, что внедрение *СДМ* обеспечивает увеличение средних межремонтных пробегов одного компрессора в 2,1 раза, компрессорного парка в целом – в 2,7 раза, снижает среднюю ежегодную стоимость ремонта *ПК* в 1,3 раза, а затраты на ремонт за три года – в 3,3 раза.

Экономия от внедрения *СДМ* только за счет снижения затрат на ремонты за один год без учета экономии от увеличения межремонтного пробега *ПК* и технологических установок путём исключения неэффективных внеплановых и планово-предупредительных ремонтов, исключения аварий и простоев из-за отказов машин превышает стоимость *СДМ* установки Л-24/9, которая при этом контролирует не только три поршневых компрессора, но и около двух десятков центробежных насосных агрегатов.

**В заключении** приведены основные научные и практические результаты и выводы по результатам выполненных исследований.

**В приложении** к диссертации приведены документы внедрения, исходные данные и результаты расчетов.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Выполненные исследования позволили решить важную научную проблему по развитию научно-методических основ мониторинга поршневых машин на основе виброакустической диагностики и предложить научно обоснованные методические, технические и технологические решения и разработки в области мониторинга технического состояния поршневых компрессоров в реальном времени, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие нефтегазоперерабатывающего, химического секторов экономики страны и обеспечивает безопасную ресурсосберегающую эксплуатацию поршневых компрессоров *НХК*, увеличение срока их службы, расширение автоматизации производственных процессов и, как следствие, повышение их технико-экономических показателей.

В результате исследований в области диагностики и мониторинга технического состояния машин и механизмов в реальном времени разработаны и *впервые* в Российской Федерации приняты три национальных стандарта (ГОСТ Р 53563, ГОСТ Р 53564, ГОСТ Р 53565) и шесть отраслевых стандартов (СА 03-001-05, СА 03-002-05, СТО 03-002-08, СТО 03-003-08, СТО 03-004-08, СТО 03-015-11) в области мониторинга состояния оборудования опасных производств в т.ч. *впервые* в Российской Федерации принят отраслевой стандарт «Стационарные компрессорные установки с поршневыми компрессорами: эксплуатационные нормы вибрации» (СТО 03-015-11), в котором для ряда типовых размеров поршневых компрессоров приведены нормированные значения параметров виброакустических сигналов для различных состояний машин.

Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Выполнено развитие научно-методических основ виброакустической диагностики и мониторинга технического состояния поршневых компрессоров в реальном времени:

- **разработаны** обобщенная и частные модели механизмов формирования структур виброакустических сигналов, учитывающие наличие и взаимодействие трех основных источников возбуждения виброакустических колебаний в объекте, идентифицируемые по типам возбуждаемых колебаний, – свободных затухающих, вынужденных незатухающих, случайных широкополосных и узкополосных колебаний, а также характеристики преобразования виброакустических колебаний в электрический эквивалент, которые показывают, что в структуре виброакустического сигнала присутствуют не только составляющие от каждого источника, их суперпозиций, но и результаты нелинейных взаимодействий шумовых и периодических составляющих виброакустических колебаний;

- **установлена** ортогональность (декорреляция) параметров виброакустических сигналов поршневых компрессоров (виброускорение, виброскорость, виброперемещение, также их СКЗ, амплитуд, пик-фактора) вследствие разнообразных причин и механизмов износа, повреждений узлов и деталей машин, порождающих случайные вибрационные процессы в различных частотных полосах;

- **разработана** обобщенная *методология* обработки и анализа параметров виброакустических сигналов для выделения диагностических признаков, заключающаяся в интегро-дифференциальном преобразовании, дисперсионном, амплитудно-фазовом и частотном анализе, анализе параметров огибающей сигнала.

- **выявлены** наиболее уязвимые узлы и детали поршневых компрессоров и **определены** места установки вибродатчиков на корпусе и узлах машин;

2. **Разработана** (*впервые* для ПК) *система определяющих критериев* неисправностей, которая представляет собой обобщенную базу закономерностей в виде зависимостей, связывающих место измерения вибрации, узел диагностируемой машины, вид неисправности, систему совокупности диагностических признаков на основе таких параметров виброакустических сигналов как СКЗ виброускорения, виброскорости, виброперемещения, амплитуды ВА сигнала за цикл работы машины и с использованием когерентной (синхронной пиковой) селекции сигнала с заданным уровнем вероятности, и *впервые* – параметров характеристической функции и спектральных инвариант виброакустического сигнала, обусловленной причинно-следственными связями между ними и состоянием машины.

3. **Предложен алгоритм** функционирования автоматической экспертной системы, позволяющий проводить оценку технического состояния узлов деталей, нарушений технологического режима компримирования и других причин виброактивности поршневых компрессоров в реальном времени в темпе проведения измерений без участия эксперта, при этом достигнут практически 100% объем диагностирования возникающих отказов методами виброакустической диагностики при необходимой и, в большинстве случаев, достаточной глубине диагностирования и минимальном количестве датчиков виброакустического сигнала.

4. Проведены исследования параметров виброакустических сигналов поршневых компрессоров при возникновении различных неисправностей и дефектов их узлов и деталей, которые позволили *впервые* для *ПК* **определить**:

- количественные **закономерности** связей технических состояний узлов, деталей, машины в целом и таких параметров виброакустических сигнала как средние квадратические и амплитудные значения за цикл работы машины и согласно циклограмме работы *ПК* по углу поворота вала, характеристическая функция и спектральные инварианты;

- **закономерности** распределения вероятностей значений диагностических признаков, соответствующих различным технического состояния узлов, деталей и поршневых компрессоров в целом, которые описываются законами Вейбулла-Гнеденко с показателями степени от 0,6 до 20;

- *систему* нормативных опасных и предупредительных величин диагностических признаков для различных типов машин.

5. Проведено развитие технологии мониторинга состояния и диагностирования поршневых машин:

- **предложен способ диагностики** технического состояния поршневых машин по вибрации корпуса, основанный на базе закономерностей, связывающей спектральные инварианты амплитудно-частотного спектра вибрации в виде соотношений предложенной структуры и их нормированные величины, независимо от типа и параметров поршневых машин, с конкретными классами дефектов (патент РФ 2 337 341);

- **разработана методика и алгоритм** преобразования исходного виброакустического сигнала для проведения его нелинейной обработки и выделения диагностических признаков неисправностей *ПК*, позволяющие повысить достоверность постановки диагноза (патент РФ 2 363 936);

- **разработана методика и алгоритм** преобразования исходного виброакустического сигнала и получения интегральных оценок первого и второго порядков на основе ортогональных базисных функций, которая существенно повышает достоверность диагностирования за счет уменьшения искажений виброакустического сигнала в процессе его интегральных преобразований (патент РФ 2 314 508);

- **показаны** инвариантность и единообразие применения разработанных методик для диагностики деталей *ЦППГ*, клапанов, деталей и узлов *КПМ* и *КШМ*.

6. Осуществлено развитие элементов систем диагностики и мониторинга:

- **разработана методика** и проведен расчет параметров измерительного тракта, которые обеспечивают получение адекватных диагностических сигналов с нормированной среднеквадратичной ошибкой  $\varepsilon_r$  оценки диагностических признаков не более 0,05;

- **предложены методические и алгоритмические** решения линеаризации и корректирования *АФЧХ* канала измерения *ВА* сигнала, реализующие принцип коррекции неидеальностей измерительных трактов вычислительными методами, которые обеспечивают более точную передачу исходного *ВА* сигнала

от места его возникновения и позволяют существенно уменьшить искажение ВА сигнала вследствие аппаратурной неравномерности АФЧХ измерительного канала (патент РФ 2 314 508);

- **предложены принципы** построения и **алгоритмы** функционирования систем диагностики и мониторинга, обеспечивающие измерение, анализ параметров диагностических сигналов, расчет диагностических признаков, формирование ДП и диагноза, на основе анализа параметров ВА сигналов, а также функционирования *экспертной системы поддержки принятия решений реального времени автоматически* осуществляющей постановку диагноза в темпе измерения диагностических сигналов;

- **предложены** реализации конфигураций систем диагностики и мониторинга КОМПАКС<sup>®</sup>, позволяющие *в реальном времени* производить мониторинг технического состояния поршневых компрессоров в конкретных условиях реальных производств НХК.

7. С 1995 по 2011 гг. на нефтегазохимических комплексах и производствах в г.г. Омска, Ангарска, Астрахани, Ачинска, Бургаса, Волгограда, Саратова, Сызрани, Ухты и др. **внедрены и эксплуатируются** системы диагностики и мониторинга более 50 поршневых компрессоров.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК

1. Костюков В.Н., Науменко А.П. Вибродиагностика поршневых компрессоров // Компрессорная техника и пневматика. 2002. №3. С. 30-31.

2. Опыт применения системы стационарного мониторинга состояния оборудования «КОМПАКС» в ОАО «Сильвинит» / В.Н. Костюков, А.П. Науменко [и др.]. // Горные машины и автоматика. 2004. №10. С. 23-26.

3. Костюков В.Н., Науменко А.П. Нормативно-методическое обеспечение мониторинга технического состояния поршневых компрессоров // Контроль. Диагностика. 2005. №11. С. 20-23.

4. Костюков В.Н., Науменко А.П. Система мониторинга технического состояния поршневых компрессоров нефтеперерабатывающих производств // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. 2006. №10. С. 38-48.

5. Костюков В.Н., Науменко А.П. Система контроля технического состояния машин возвратно-поступательного действия // Контроль. Диагностика. 2007. №3. С. 50-59.

6. Науменко А.П. Методология виброакустической диагностики поршневых машин // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Специальный выпуск. Серия Машиностроение. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2007. С. 85-95.

7. Новая высокоэффективная берегающая технология эксплуатации металлургического оборудования ОАО ВМЗ на основе мониторинга состояния КОМПАКС<sup>®</sup> / В.Н. Костюков, А.П. Науменко [и др.] // Металлург. 2007. № 11. С. 38-43.

8. Комплексный мониторинг технологических объектов опасных производств / В.Н. Костюков, А.П. Науменко [и др.]. // Контроль. Диагностика. 2008. № 12. С. 8-18.

9. Костюков В.Н., Науменко А.П. Решения проблем безопасной эксплуатации поршневых машин // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2009. №3. С. 27-36, 1-ая, 4-ая стр. обл.

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. Современные средства мониторинга состояния и диагностики поршневых компрессоров (часть 1) // Главный энергетик. 2010. №11. С. 46-55.

12. Костюков В.Н., Науменко А.П. Современные средства мониторинга состояния и диагностики поршневых компрессоров (часть 2) // Главный энергетик. 2010. №12. С. 40-51.

13. Науменко А.П. Современные методы и средства real-time мониторинга технического состояния поршневых машин // Компрессорная техника и пневматика. 2010. №8. С. 27-34.

14. Костюков В.Н., Науменко А.П. Разработка и внедрение систем диагностики и мониторинга поршневых компрессоров // Компрессорная техника и пневматика. 2011. №5. С. 31-34.

#### **Патенты**

15. Костюков В.Н., Бойченко С.Н., Науменко А.П., Стряпонов А.Е. Вибротермотахометр: пат. 44991 Рос. Федерация. №96500075; заявл. 30.01.96; опубл. 16.01.99. Бюл. № 2.

16. Костюков В.Н., Бойченко С.Н., Науменко А.П., Стряпонов А.Е. Система компьютерного мониторинга технического состояния машин: пат. 44623 Рос. Федерация. №96500076; заявл. 30.01.96; опубл. 16.09.98. Бюл. № 26.

17. Костюков В.Н., Науменко А.П., Бойченко С.Н. Способ вибродиагностики машин: пат. 2 314 508 Рос. Федерация. 2006135874/28; 10.10.2006; опубл. 10.01.2008. Бюл. № 1.

18. Костюков В.Н., Науменко А.П., Бойченко С.Н. Способ вибродиагностики технического состояния поршневых машин по спектральным инвариантам: пат. 2 337 341 Рос. Федерация. № 2007113529/28; заявл. 11.04.2007; опубл. 27.10.2008. Бюл. № 30.

19. Костюков В.Н., Науменко А.П. Способ вибродиагностики объектов: пат. 2 363 936 Рос. Федерация. 2008121486/28; заявл. 27.05.2008. опубл. 10.08.2009. Бюл. №22.

#### **Нормативные документы**

20. ГОСТ Р 53563-2009. Контроль состояния и диагностика машин. Мониторинг состояния оборудования опасных производств. Порядок организации. М.: СТАНДАРТИНФОРМ, 2010. 8 с.

21. ГОСТ Р 53564-2009. Контроль состояния и диагностика машин. Мониторинг состояния оборудования опасных производств. Требования к системам мониторинга. М.: СТАНДАРТИНФОРМ, 2010. 20 с.

22. ГОСТ Р 53565-2009. Контроль состояния и диагностика машин. Мониторинг состояния оборудования опасных производств. Вибрация центробежных насосных и компрессорных агрегатов. М.: СТАНДАРТИНФОРМ, 2010. 8 с.

23. СА 03-001-05. Центробежные насосные и компрессорные агрегаты опасных производств. Эксплуатационные нормы вибрации: стандарт ассоциации «РОСТЕХЭКСПЕРТИЗА» / Колл. авт. М.: Изд-во «Компрессорная и химическая техника». 2005. 24 с.

24. СА 03-002-05. Системы мониторинга опасных производственных объектов. Общие технические требования: стандарт ассоциации «РОСТЕХЭКСПЕРТИЗА» / Колл. авт. М.: Изд-во «Компрессорная и химическая техника». 2005. 42 с.

25. СТО 03-002-08. Мониторинг оборудования опасных производств. Порядок организации: стандарт НПС «РИСКОМ» // В кн. Мониторинг оборудования опасных производств. Стандарт организации / Колл. авт. М.: НПС РИСКОМ, 2008. С. 25-63.

26. СТО 03-003-08. Мониторинг опасных производств. Термины и определения: стандарт НПС «РИСКОМ» // В кн. Мониторинг оборудования опасных производств. Стандарт организации / Колл. авт. М.: НПС РИСКОМ, 2008. С. 5-24.

27. СТО 03-004-08. Мониторинг оборудования опасных производств. Процедуры применения: стандарт НПС «РИСКОМ» // В кн. Мониторинг оборудования опасных производств. Стандарт организации / Колл. авт. М.: НПС РИСКОМ, 2008. С. 65-77.

28. СТО 03-015-11. Мониторинг оборудования опасных производств. Стационарные поршневые компрессорные установки опасных производств: эксплуатационные нормы вибрации: стандарт НПС «РИСКОМ» / Колл. авт. М.: Изд-во «КХТ», 2011. 19 с.

#### **Учебные пособия**

29. Основы строительной механики двигателей внутреннего сгорания: учеб. пособие // Н.А. Иващенко, А.П. Науменко [и др.]. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1995. 28 с.

30. 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.

31. Костюков В.Н., Науменко А.П. Основы виброакустической диагностики и мониторинга машин: учебное пособие. Изд-во Омск: ОмГТУ, 2011. 360 с.

#### **Публикации в других изданиях**

32. Мониторинг технического состояния поршневых компрессоров / Костюков В.Н., А.П. Науменко [и др.] // Химическая техника. 2004. №6. С.6-12.

33. Мониторинг неисправностей клапанов поршневых компрессоров / Костюков В.Н., А.П. Науменко [и др.] // Химическая техника. 2004. №9. С. 17-19.

34. Система мониторинга металлургического оборудования / В.Н. Костюков, А.П. Науменко [и др.]. // Технический альманах «Оборудование». 2006. №2. С. 59-62.

35. Костюков В.Н., Науменко А.П. Анализ современных методов и средств мониторинга и диагностики поршневых компрессоров. Часть 1: Системы on-line мониторинга // В мире неразрушающего контроля. 2010. №3. С. 12-18.

36. Костюков В.Н., Науменко А.П. Анализ современных методов и средств мониторинга и диагностики поршневых компрессоров. Часть 2: Системы on-line мониторинга // В мире неразрушающего контроля. 2010. №4. С. 28-35.

37. В.Н. Костюков, А.П. Науменко. О базовых принципах технологии диагностирования и мониторинга поршневых машин // Приложение к Вестнику Сибирского отделения Академии военных наук. 2011. №10. С. 198-203.

### **Труды конференций**

38. Костюков В.Н., Науменко А.П. Мониторинг состояния поршневых компрессоров // Потребители-производители компрессоров и компрессорного оборудования: тр. III междунар. симпозиума. С-Пб: СПбТГУ, 1997. С. 254-256.

39. Костюков В.Н., Науменко А.П. Практика виброакустической диагностики поршневых машин: сб. науч. тр. по проблемам двигателестроения, посвященный 175-летию МГТУ им. Н.Э. Баумана [под ред. Н.А. Иващенко, Л.В. Грехова]. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. С. 30-35.

40. Науменко А.П. Исследование виброакустических параметров поршневых машин // Двигатель–2007: сб. науч. тр. по материалам Междунар. науч.-техн. конф. [под ред. Н.А. Иващенко, В.Н. Костюкова, А.П. Науменко, Л.В. Грехова]. М: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. С. 518-525.

41. Костюков В.Н., Науменко А.П. Виброакустическая диагностика и мониторинг состояния поршневых машин // Hermetic Sealing, Vibration Reliability and Ecological Safety of Pump and Compressor Machinery: 12<sup>th</sup> International Scientific and Engineering Conference (9-12 September 2008). Kielce, 2008. Volume II. P. 365-372.

42. Костюков В.Н., Науменко А.П., Сидоренко И.С. Использование характеристической функции для диагностики поршневых машин // Динамика систем, механизмов и машин: матер. VII Междунар. науч.-техн. конф. (10-12 ноября 2009 г.). Омск. ОмГТУ, 2009. Кн. 2. С. 32-35.

43. Науменко А.П. Real-time condition monitoring of reciprocating machines // CM2009/MFPT2009 (The sixth international conference on condition monitoring and machinery failure prevention technologies): materials of a conference (June 23-25, 2009). Irish, Dublin, 2009. Pp. 1202-1213.

44. Науменко А.П., Костюков В.Н. Condition monitoring of reciprocating machines // COMADEM 2009: Proceedings of the 22<sup>nd</sup> International Congress on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management (June 9-11, 2009). Spain, San Sebastian, 2009. Pp. 113-120.

45. Науменко А.П. Diagnostics and Condition Monitoring of piston compressors // CM2010/MFPT2010 (The Seventh International Conference on Condition Monitoring and Machinery Failure Prevention Technologies) (June 22-24, 2010): materials of a conference. England, Stratford-upon-Avon, 2010. Pp. 1-11.

46. Науменко А.П., Костюков В.Н. System for Condition Monitoring of Reciprocating Machines // COMADEM 2010: Proceedings of the 23<sup>rd</sup> International Congress on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management (June 28 – July 2, 2010). Japan, Nara, 2010. Pp. 265-272.

47. Науменко А.П. О некоторых моделях структуры виброакустических сигналов поршневых машин // Двигатель-2010: сб. науч. тр. междунар. конф., посвящ.

180-летию МГТУ им. Н.Э.Баумана (16 октября 2010 г.) [под. ред. Н.А. Иващенко, В.А.Вагнера, Л.В.Грехова]. М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2010. С. 75-79.

48. Науменко А.П. Современные достижения в области мониторинга поршневых компрессоров // Потребители-производители компрессоров и компрессорного оборудования-2010: тр. XV междунар. симпозиума (9-10 июня 2010 г.). С-Пб: Изд-во СПбТГУ, 2010. С. 216-225.

49. Науменко А.П., Костюков В.Н. Choice of reciprocating compressors units for real time health monitoring // COMADEM 2011: Proceedings of the 24<sup>th</sup> International Congress on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management (May 30 - June 1, 2011). Norway, Stavanger, 2011. Pp. 824-833.

50. Науменко А.П. Modern methods and means of on-line monitoring of parameters and real-time health monitoring of piston machines // CM2011/MFPT2011 (The Eighth International Conference on Condition Monitoring and Machinery Failure Prevention Technologies) (June 22-24, 2011): materials of a conference. England, 2011. Pp. 1-13.

Сокращения, принятые в работе:

*АФЧХ* – амплитудно-фазовая частотная характеристика;  
*АЧХ* – амплитудно-частотная характеристика;  
*БПФ* – быстрое преобразование Фурье;  
*ВА* – виброакустический;  
*ДВС* – двигатель внутреннего сгорания;  
*ДП* – диагностический признак;  
*КПМ* – кривошипно-ползунный механизм;  
*КШМ* – кривошипно-шатунный механизм;  
*НДП* – недопустимо;  
*НХК* – нефтегазоперерабатывающий, химический комплекс;  
*ПК* – поршневой компрессор;  
*ПМ* – поршневая машина;  
*РМФР* – регрессионная модель функции распределения;

*СДМ* – система диагностики и мониторинга;  
*СКЗ* – среднее квадратичное значение;  
*ТПМ* – требует принятия мер;  
*ТС* – техническое состояние;  
*ТФР* – теоретическая функция распределения;  
*ФК* – функция коррекции;  
*ФР* – функция распределения ;  
*ФЧХ* – фазочастотная характеристика;  
*х.ф.* – характеристической функции;  
*ЦПГ* – цилиндропоршневая группа;  
*ШПС* – шумовые и периодические составляющие;  
*ЭС* – экспертная система;  
*ЭФР* – эмпирическая функция распределения;  
*ЭМФР* – эмпирическая модифицированная функция распределения;  
*ГД* – глубина диагностирования.

Автор выражает благодарности д.т.н., профессору Вешкурцеву Ю.М. за поддержку в работе, ценные советы и замечания, а также к.т.н. Бойченко С.Н., к.т.н. Костюкову А.В., без помощи и поддержки которых многие идеи и технические решения ещё долго не были бы реализованы.

Науменко Александр Петрович

### **Научно-методические основы вибродиагностического мониторинга поршневых машин в реальном времени**

Автореферат диссертации на соискание учёной степени доктора технических наук

Отпечатано с оригинал-макета, предоставленного автором  
Подписано в печать 16.12.2011 г. Формат 60×84<sup>1/16</sup>. Отпечатано на дупликаторе.  
Бумага офсетная. Усл.-печ. л. 2,325. Уч.-печ. л. 1,74. Тираж 100. Заказ № .

Издательство ОмГТУ. 644050, г.Омск, пр.Мира, 11.  
Типография ОмГТУ