1570684

На правах рукописи

Костюков Владимир Николаевич

РАЗРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ ТЕОРИИ, ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА АГРЕГАТОВ НЕФТЕХИМИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Специальность 05.02.11.- Методы контроля и диагностика в машиностроении

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва – 2001

Работа выполнена в научно-производственном центре «Диагностика, надежность машин и комплексная автоматизация» – НПЦ «Динамика».

Официальные оппоненты: Заслуженный деятель науки РФ, д.т.н., профессор Баранов В.М.,

д.т.н., профессор Зарицкий С.П.,

д.т.н., профессор Нахапетян Е.Г.

Ведущая организация Научно-инженерный центр «Надежность и ресурс больших систем машин» Уральского отделения РАН.

Защита состоится «26» IV 2001 г. в 14 часов 30 мин на заседании диссертационного совета Д212.141.01 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 107005, Москва, 2-я Бауманская улица , дом 5.

Ваш отзыв в одном экземпляре, заверенный печатью, просим выслать по указанному адресу

С диссертаци м. Н.Э. Баумана.
тел.: 267-0

Авторефе 001 г.

Ученый
диссертационн
канд.техн. ковалов

1570684

Подписано к 2,0 п.л.
Тираж 100 з ия МГТУ
им.Н.Э.Бауман

НТБ МГТУ им.Н.Э.Баумана
1570684
Костюков В.Н. Разработка э

БЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Решение проблемы энергетического обеспечения страны тесно связано с безопасной эксплуатацией машинных агрегатов непрерывных производств нефтегазовой отрасли и, прежде всего, нефтехимических комплексов (НХК). Высокая концентрация машинных агрегатов в НХК: насосных, компрессорных, воздушного охлаждения, дымососов и т.д. с единичными мощностями от десятков кВт до единиц МВт, скрытый характер возникновения и развития неисправностей, плохая наблюдаемость дефектов агрегатов, что внешне проявляется как внезапный отказ - нередко являлись причиной возникновения производственных неполадок и аварийных ситуаций, которые сопровождались большими материальными потерями и загрязнением окружающей среды. Анализ надежности технологических установок современных нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств показывает, что более 70 % отказов оборудования составляют отказы машинных агрегатов, вызывающие простои установок и снижающие коэффициент их технического использования и коэффициент готовности. Более половины аварий агрегатов НХК связано с отрицательным влиянием человеческого фактора. В соответствии с Федеральной целевой программой «Топливо и Энергия» реализация ресурсо – и энергосберегающей политики, разработка и внедрение технологий, обеспечивающих ускоренное техническое перевооружение действующих и создание новых объектов топливо-энергетического комплекса, являются актуальной задачей, тесно связанной с обеспечением безопасности в техногенных средах. В последнее время Госгортехнадзор России предусматривает усиление надзора за техническим состоянием эксплуатируемого оборудования с применением современных методов и автоматических средств мониторинга, адекватно отражающих высокую скорость процессов в кольце «наблюдение-управление-устойчивость-наблюдение». Это требует разработки новых подходов к созданию автоматических систем диагностики и мониторинга (СДМ), обеспечивающих минимальную стоимость автоматического диагностирования, доставки и реализации персоналу НХК диагностических предписаний по управлению состоянием агрегатов с контролем исполнения. Существующая нормативная база и эксплуатационные нормы вибрации не отвечают потребностям автоматических СДМ и не обеспечивают безопасной эксплуатации агрегатов НХК. Требует развития и технология применения автоматических СДМ как стандартных промышленных систем.

Таким образом, в решении важной народнохозяйственной задачи обеспечения безопасной ресурсосберегающей эксплуатации комплексов машин и непрерывных производств возникает научная проблема разработки теории, технологии и оборудования систем мониторинга агрегатов нефтехимических

МГТУ
им. Н. Э. Баумана

комплексов в условиях реального функционирования с учетом влияния человеческого фактора.

Исходной базой и теоретической основой для исследований и разработок автора явились труды отечественных ученых и специалистов - Н.П. Алешина, В.М. Баранова, В.В. Болотина, Н.Г. Бруевича, С.П. Зарицкого, Н.А. Иващенко, В.Я. Кершенбаума, В.В. Клюева, С.С. Кораблева, Н.А. Махутова, Е.Г. Нахапетяна, П.П. Пархоменко, А.С. Проникова, В.Н. Прокопьева, Б.Е. Прусенко. Развитие теории и практики диагностики и мониторинга в настоящей работе базируется на трудах И.И. Артоболевского, М.Д. Генкина, Б.В. Павлова, С.А. Тимашева, А.К. Явленского, К.Н. Явленского и зарубежных ученых А. Мышински, Д. Бентли, Дж. Митчела, Т. Бонда, К. Бевера, Д. Ранкина, Дж. Мервина, А. Мартина, Дж. Робинсона, А. Смита, специалистов фирм Брюль и Къер (Дания), Шенк (Германия), Бентли Невада, Entek-IRD, CSI, DLI (США) и др.

Работа выполнялась в соответствии с межрегиональной программой «СибВПКнефтегаз–2000» конверсии предприятий ВПК в направлении разработки и выпуска оборудования для нефтегазовой отрасли страны.

Цель работы: разработка и внедрение безопасной, экологически чистой ресурсосберегающей технологии эксплуатации агрегатов нефтехимических комплексов путем создания и исследования нормативно-методической базы и оборудования автоматических систем мониторинга для предупреждения аварий и управления техническим состоянием.

Достижение поставленной цели потребовало решения следующих задач.

1. Разработать обобщенную математическую модель системы мониторинга, учитывающую закономерности эксплуатации агрегатов НХК.

2. Разработать обобщенную статическую математическую модель вибрации и состояния, обеспечивающую автоматическую диагностику возникающих в агрегате проблем при неполной информации о его структуре.

3. Разработать обобщенную динамическую модель вибрации и состояния, отражающую различные механизмы износа с учетом влияния человеческого фактора для мониторинга опасности технического состояния агрегата на интервале жизни.

4. Разработать методику автоматического распознавания вибрации, инвариантную к конструкции агрегатов НХК, с рекуррентной селекцией и формированием диагностических признаков из коллектива составляющих.

5. Осуществить структурно-параметрический синтез методов и устройств рекуррентной селекции и формирования диагностических признаков вибрации агрегата, инвариантных к его конструкции.

6. Исследовать закономерности виброакустических процессов, сопровождающих работу агрегатов НХК для целей мониторинга и разработать методики диагностирования, реализующие предложенные методы, модели и алгоритмы.

7. Разработать адаптивные системы и методические основы технологии диагностики и мониторинга в реальном времени.

8. Разработать автоматизированные системы управления и технологию безопасной ресурсосберегающей эксплуатации агрегатов НХК (АСУ БЭР) с ликвидацией фундаментальных причин отказов оборудования (ЛИФПО) и осуществить промышленное внедрение полученных результатов.

Методы исследования. Исследования выполнялись с использованием современных представлений о механизмах износа и старения деталей и машин. Накопление статистики отказов и параметров диагностических сигналов машин: вибрационных процессов, температуры и потребляемого тока, перемещений и деформаций, давления и уровня рабочих и затворных жидкостей и т.д. осуществлялось с помощью разработанных, сертифицированных и внедренных на предприятиях систем компьютерного мониторинга КОМПАКС в ходе многолетних широкомасштабных промышленных экспериментов в процессе мониторинга агрегатов НХК на технологических установках, в серийном и ремонтном производстве. Обработка результатов осуществлялась с широким использованием ПЭВМ на базе общего и специального программного обеспечения. Используемый в работе математический аппарат включает методы теории систем, теории колебаний, статистической радиотехники, теории вероятностей и математической статистики. Достоверность основных теоретических положений и выводов подтверждена моделированием на ЭВМ, результатами широкомасштабных экспериментов и практическим внедрением разработанных автоматических систем мониторинга, исследование, отработка и аттестация которых опирались на комплекс образцовой испытательной и виброизмерительной аппаратуры фирмы Брюль и Кьер (Дания).

Научная новизна работы заключается в следующих результатах:

1) установлены закономерности: вибрации агрегатов НХК, содержащей шумовые, периодические составляющие (ШПС) и вибрационный процесс с максимальной энергией, определяемый структурой агрегата; мультимодальности трендов вибропараметров агрегата, которые определяются превалирующими процессами износа и старения его узлов в каждый момент времени, проявляющимися в различных частотных полосах в виде смеси процессов постепенного и скачкообразного характера с разными скоростями роста, с увеличением дисперсии и расширением спектра диагностического сигнала при возникновении и развитии неисправностей; ортогональности виброускорения, виброскорости, виброперемещения, шумовых и периодических компонент и скоростей их роста вследствие разнообразных причин и механизмов износа агрегатов НХК, порождающих случайные вибрационные процессы в разных частотных полосах; распределения вибропараметров агрегатов и скоростей их роста, описываемых законами Вейбулла-Гнеденко с показателями степени от 0,27 до 15,5; эксплуатации агрегатов НХК, состоящие в спорадическом характере актов управления;

2) разработаны элементы теории систем мониторинга, включающие обобщенную математическую модель; принципы и методологию синтеза программно-аппаратных средств и многоуровневых экспертных систем;

критерий эффективности управления состоянием агрегатов НХК по минимуму эмпирического риска пропуска отказа и аналитические оценки - необходимого быстродействия по критерию наблюдаемости максимальной скорости потери остаточной работоспособности нефтехимическим комплексом, максимальной допускаемой ошибки диагностики технического состояния агрегатов при существующем потоке отказов и требуемом риске пропуска отказа, увеличения ресурса безопасного пробега НХК в зависимости от максимальной ошибки СДМ;

3) разработаны элементы теории мониторинга, включающие обобщенные статическую и динамическую модели вибрации и состояния агрегатов НХК с учетом человеческого фактора, на базе которых предложены способы и методики диагностики и прогнозирования технического состояния с учетом его опасности и остаточного ресурса: автоматического распознавания спектра вибрации с измерением частоты вращения и уточнением структуры машины по параметрам спектра; синтеза рациональных коллективных диагностических признаков по критерию минимума эмпирической вероятности ошибки диагностики; рекуррентной селекции шумовых и периодических составляющих спектра вибрации; по отношению уровней шумовых и периодических составляющих, порождающих инвариантные критерии технического состояния агрегатов; на основе синхронной пиковой демодуляции, обеспечивающие высокую чувствительность к зарождающимся дефектам; путем рандомизированного усреднения с определением характеристик рандомизации по выбросам фазы вибрации диагностируемой машины; на основе совместного использования параметров виброускорения, виброскорости, виброперемещения, обеспечивающего высокую достоверность диагноза; динамической диагностики и прогнозирования опасной деградации состояния агрегатов НХК по фазовой траектории жизни, которые позволяют полностью использовать ресурс заложенный в оборудовании при сохранении его безопасности и ремонтопригодности с учетом человеческого фактора.

Практическая ценность состоит в создании и внедрении нормативно-методических материалов, технологии и оборудования мониторинга:

1) ряда методик внедрения СДМ, реализующих стратегию диагностики минимальной стоимости: обеспечения контролепригодности агрегатов НХК взрывозащищенного исполнения; самодиагностики и автоматизированной поверки распределенных систем мониторинга; нормирования диагностических параметров;

2) Руководящего документа «Эксплуатационные нормы вибрации» насосно-компрессорных агрегатов НХК, утвержденного Минтопэнерго и Госгортехнадзором России, в котором впервые совместно пронормированы виброускорение, виброскорость, виброперемещение и скорости их роста на интервале жизни агрегата для эксплуатации по техническому состоянию;

3) программно-аппаратных средств адаптивных систем мониторинга реального времени, инвариантных к конструкции агрегатов и конфигурации нефтехимических комплексов, и сетевых структур автоматической

диагностической сети на базе Internet/Intranet технологий, систем для серийного, ремонтного производства и квазистатического оборудования, что позволило повысить качество ремонта, выпускать "невибрирующие" насосы и двигатели, обеспечить "одноразовый" монтаж и пуск агрегатов в эксплуатацию;

4) автоматизированных систем управления безопасной ресурсосберегающей эксплуатацией агрегатов НХК в реальном времени (АСУ БЭР), объединяющих системы мониторинга на принципах стандарта MIMOSA и обеспечивающих низкую стоимость автоматического формирования, доставки, реализации и контроля исполнения диагностических предписаний персоналом НХК, и технологии ресурсосберегающей эксплуатации агрегатов с ликвидацией фундаментальных причин отказов на всех стадиях жизненного цикла, внедрение которых более чем на порядок увеличивает эффективность управления безопасной эксплуатацией и межаварийный пробег агрегатов;

5) более 100 СДМ и семи АСУ БЭР на 60-ти нефтехимических комплексах и производствах 9-ти предприятий страны–нефтеперерабатывающих заводах г.г. Омска, Ангарска, Ачинска, Волгограда, Ярославля, Астрахани, нефтехимкомбинате в г. Тобольске, МУП «Водоканал» г. Омск, локомотивном депо Омск Западно-Сибирской железной дороги, где они обеспечивают сберегающую эксплуатацию более 2500 машин 350 типов с высоким экономическим эффектом около 1 млн. руб. на один агрегат в год. Новизна, уровень и значимость полученных результатов подтверждены премией Правительства Российской Федерации 1997 г.

На защиту выносятся следующие основные положения работы:

- развитие представлений о закономерностях вибрации агрегатов НХК в связи с причинами и механизмами их отказов;
- обобщенная математическая модель системы, принципы и методики синтеза программно-аппаратных средств и элементов автоматических систем мониторинга;
- обобщенные статическая и динамическая модели вибрации и состояния, способы, устройства и методики диагностики агрегатов на различных этапах жизненного цикла;
- вибрационные нормативы безопасной эксплуатации агрегатов НХК;
- автоматизированные системы управления и технология безопасной ресурсосберегающей эксплуатации агрегатов НХК в реальном времени.

Апробация работы. Основные положения и результаты работ доложены: на совещаниях главных механиков нефтеперерабатывающих заводов России - Рязань (1994), Волгоград (1995), Кириши (1996, 1998), Москва (2001); на совещаниях Госгортехнадзора России - Омск (1994, 1996), Н. Новгород (1997), Москва (1999, 2001); международных симпозиумах и конференциях «Энергодиагностика и Condition Monitoring» - Москва (1995), Н. Новгород (2000), "Защита-95" - Москва (1995), "Производители-потребители компрессоров" - Санкт-Петербург (1996, 1997, 2000), "Актуальные проблемы электронного приборостроения-АПЭП" - Новосибирск (1996, 2000), XV РНТК «Неразрушающий контроль и диагностика» - Москва (1999), 5-й МНТК

Dynamics of machine aggregates - Габчиково (Словакия-2000), семинаре фирмы Entek-IRD – Цинциннатти (США-1995), альянса открытых систем MIMOSA - Скоттдейл (США-1999), МНТК «Двигатель-97» в МГТУ им. Н.Э. Баумана – Москва (1997), МНТК «Динамика систем, механизмов и машин» в ОмГТУ - Омск (1997), Российском с международным участием семинаре «Перспективы применения физических методов и средств контроля на предприятиях химического и машиностроительного комплексов» – Томск (1994), международных семинарах РАО «Газпром» «Диагностика оборудования и трубопроводов» в г.г. Ялта, Одесса (1997), конгрессе и симпозиуме «Проблемы нефеперерабатывающего и нефтехимического комплекса» в г. Уфе (1998, 1999), симпозиумах «Новые высокие технологии для нефтяной и газовой промышленности» - CITOGIC – Уфа (1998), Москва (2000). СДМ КОМПАКС демонстрировались в 1996-2000 г.г. на 12-ти российских и международных выставках, где были награждены дипломами и почетной медалью.

Публикации. Основное содержание диссертации изложено в 68 печатных работах, в том числе одной книге, одной брошюре, 25 патентах и свидетельствах на изобретения.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, семи глав, общих выводов и результатов, списка литературы, включающего 298 источников, и приложения, содержащего документы внедрения. Основной материал изложен на 392 страницах, включая 39 таблиц и 102 иллюстрации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе дан анализ проблем мониторинга нефтехимических комплексов. Мониторинг технического состояния агрегата – наблюдение за процессом изменения его работоспособности с целью предупреждения персонала о достижении предельного состояния - позволяет перевести большинство отказов из категории внезапных для персонала в категорию постепенных за счет раннего их обнаружения. Показана возможность решения проблем мониторинга автоматическими системами с функционально неопределенной структурой, которая не зависит от конструкции агрегата, что позволяет внедрять СДМ в условиях априорной неопределенности, когда часто неизвестны типы подшипников, число лопаток импеллера и т.д. Сформулирован принцип информационной полноты (π-принцип) при выборе диагностических признаков состояния в условиях априорной неопределенности, согласно которому признаки должны составлять полную группу в статистическом смысле, включая как известные признаки, так и дополняющие их до полной группы в избранном базисе сигналов. Это позволяет значительно уменьшить вероятность пропуска дефектов, диагностические признаки которых в данном базисе априорно неизвестны. Наиболее общим и широкополосным базисом сигналов является вибрация, поэтому выводы полученные для него будут справедливы и для других базисов сигналов (тока, температуры и т.д.). Сформулированы задачи исследования и

предложена обобщенная математическая модель системы мониторинга. Допустимая ошибка СДМ η в сложившихся условиях эксплуатации НХК с вероятностью внезапных отказов **Q** и наработкой на отказ T_Q, когда требуется обеспечить наработку не менее T_r, с коэффициентом увеличения ресурса k_T и риском пропуска отказа не более **r**, для экспоненциального закона распределения наработки до отказа:

$$\eta = [Ln(1 - r)] / [Ln(1 - r)+Ln(1 - Q)],\ T_r = T_Q * [Ln(1 - Q)] / [Ln(1 - r)]. \quad (1)$$

$$\text{При } r << Q << 1,\ \eta = r / Q. \qquad k_T = 1 / \eta - 1. \quad (2)$$

Применение СДМ создает временную избыточность для действий персонала в условиях надвигающегося отказа, что существенно повышает безопасность работы НХК. На рис. 1 приведены соответствующие аналитические зависимости. Например, для типичных значений **Q** = 20 %; **r** = 1 %, допустимая ошибка системы диагностики $\eta \leq 4$ %, при этом интервал между производственными неполадками и аварийными ситуациями возрастает в 24 раза, что объясняет существенный технико-экономический выигрыш от внедрения систем мониторинга. Эмпирический риск **r** является также критерием эффективности управления НХК по минимуму вероятности пропуска отказа для сравнения различных систем и технологий управления с вектором параметров **{Z}: r = Min Q{Zi}.**

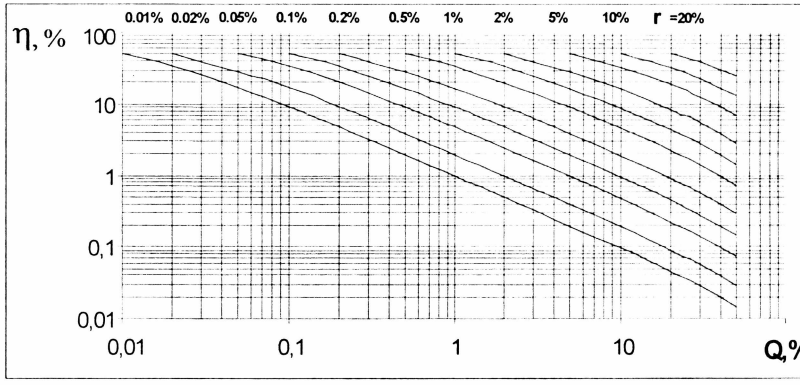


Рис. 1. Допустимая ошибка системы мониторинга η при требуемом риске **r** пропуска отказа и фактической вероятности отказа НХК – **Q**

Техническое состояние агрегата S_1, зависящее от режима его работы S_0 и уровня накопленных погрешностей изготовления, ремонта и эксплуатации **S**, на основании работ Н.Г. Бруевича представим в следующем виде:

$$S_1 = S_0 + S(t) = S(n_0, p_0) + \sum_{j=1}^{m} \frac{\partial S}{\partial q_j} \Delta q_j(t), \qquad (3)$$

где $S_0 = S(n_0, p_0)$ - составляющая, которая характеризует механизм с минимальными, близкими к нулю, обобщенными технологическими и эксплуатационными погрешностями, который работает в диапазоне номинальных скоростных (n_0) и нагрузочных (p_0) режимов; $\Delta q_j = X_j$ - **j**-я погрешность механизма, заложенная при изготовлении ($t = 0$), развивающаяся во времени и определяющая износ, или, в общем случае, степень деградации механизма и степень его старения; $\partial S / \partial q_j$ - чувствительность обобщенной погрешности **S** к **j**-й погрешности механизма по соответствующей обобщенной координате q_j. Здесь и далее, для упрощения записи, аргумент **(t)** приводится для указания на существенную в данной задаче зависимость параметра от времени на рассматриваемом интервале.

Обобщенную математическую модель системы мониторинга на основе уравнений переменных состояния представим в следующем виде:

$$\begin{aligned} \{\dot{S}(t)\} &= [A]\{S(t)\} + [B]\{U\} \\ \{Y(t)\} &= [C]\{S(t)\} + [D]\{U\}, \end{aligned} \qquad (4)$$

где **{S(t)}** – вектор функций старения агрегата размерности **m**, каждая составляющая которого характеризует его обобщенный (совокупный) структурный параметр, подлежащий оценке и характеризующий остаточный парциальный ресурс агрегата по этому обобщенному параметру, носит во времени многомодальный характер в силу суммирования частных погрешностей (3); $\{\dot{S}(t)\}$-вектор скорости старения (износа, снижения безаварийности, безопасности, остаточного ресурса), также имеющий многомодальный характер; **{U}** – вектор переменных управления размерности **(p+k)** включает в себя переменные задания режима работы агрегата $\{U_p(t)\}$ и факторы воздействия персонала при регулировке и обслуживании объекта $\{U_k(t)\}$; **{Y(t)}** – вектор диагностических сигналов размерности $n \geq m$, измеряемых системой мониторинга. Матрицы **[A], [B], [C], [D]** представляют собой соответственно квадратную матрицу системы $[A] = [a_{ij}]$; прямоугольную матрицу управления $[B] = [b_{ij}]$, которая определяет влияние действий персонала на состояние агрегата; матрицу наблюдения (матрица выхода) $[C] = [c_{ij}]$, которая определяет наблюдаемость внутреннего состояния; переходную матрицу $[D] = [d_{ij}]$, которая определяет влияние на параметры вибрации агрегата действий персонала по управлению режимом работы и обслуживанию. Элементы матрицы **[A]** – случайные процессы, значения которых в каждый момент времени определяют по выражениям (11), (17). Элементы матриц **[B], [C], [D]** являются коэффициентами соответствующих уравнений регрессии. Система мониторинга (4) вполне управляема как производственный комплекс и наблюдаема при совпадении рангов матриц **[A]** и **[C]** и отсутствии в последней

нулевых столбцов. Размерность вектора {S(t)} (матрицы [A]), которая определяет степень реальной наблюдаемости состояния агрегата, рекомендуется выбирать исходя из причин и статистики отказов агрегатов каждого типа. Составляющие {S(t)}, как правило, недоступны для непосредственного наблюдения и оцениваются по косвенным измерениям. Вектор управления {U} изменяется спорадически при пуске-останове агрегата и техобслуживании. Между этими моментами {U} = **const**. Полная косвенная наблюдаемость состояния агрегатов НХК при мониторинге достигается измерением диагностических сигналов и скоростей их изменения во времени в силу их независимости (7); предельное состояние агрегата $\{S_{ндп}\}$ и опасная скорость его деградации $\{\dot{S}_{ндп}\}$ с точностью до масштаба совпадают с критическими значениями диагностических признаков и скоростей их изменения; приращение диагностических сигналов (вибропараметров) пропорционально приращению износа, утрате безопасности и уменьшению остаточного ресурса агрегата и НХК в целом:

$$\{\Delta Y\} = [C]\{\Delta S\},\ \{\dot{Y}(t)\} = [C]\{\dot{S}(t)\},\{Y_{ндп}\} = [C]\{S_{ндп}\},\ \{\dot{Y}_{ндп}\} = [C]\{\dot{S}_{ндп}\},\ (5)$$
$$\{\Delta S\} = [C]^{-1}\{\Delta Y\},\{\dot{S}\} = [C^{-1}]\{\dot{Y}\},\{S_{ндп}\} = [C]^{-1}\{Y_{ндп}\},\{\dot{S}_{ндп}\} = [C^{-1}]\{\dot{Y}_{ндп}\}.$$

Основной задачей синтеза СДМ является синтез ортогональных диагностических признаков $\{Y_i\}$, отражающих соответствующим образом сформулированные ортогональные классы неисправностей $\{S_i\}$. Это соответствует приведению матрицы наблюдения [C] к диагональной квадратной матрице, устанавливающей взаимнооднозначное (регрессионное) отношение между диагностическим признаком и соответствующей обобщенной погрешностью, и проблема мониторинга состояния заключается в формировании правильной интерпретации этой обобщенной погрешности с учетом частоты появления классов неисправностей. Например, рост виброскорости корпуса центробежного насоса НХК, перекачивающего бензин, соответствует росту обобщенной погрешности «нарушение центровки - дисбаланс». При этом в 85 % случаев наблюдается нарушение центровки и лишь в 10-15 % - дисбаланс. Остальные 5 % роста виброскорости приходятся на другие причины. Наличие такой интерпретации «причина-следствие» (погрешности-вибрация) эквивалентно приведению матрицы наблюдения к диагональной квадратной форме и соответствует мониторингу состояния. Отсутствие такой интерпретации соответствует мониторингу параметра (вибрации, температуры и т.д.). Часто неисправности агрегатов (разрушения поверхностей трения, ослабление крепления и т.д.) неизмеримы в сильных шкалах (отношения, интервалов). В этих случаях значения измеряемых диагностических признаков (вибропараметров) служат мерой таких неисправностей согласно (5). Представляется целесообразным определить техническое состояние агрегата в соответствии с парциальной составляющей его вектора состояния {S(t)}, которая имеет максимальное значение $S_{max}(t)$

среди всех диагностируемых параметров данного агрегата. Опасность состояния агрегата – в соответствии с парциальной составляющей $\dot{S}_{max}(t)$, которая является максимальной среди всех скоростей износа диагностируемого агрегата. Техническое состояние комплекса агрегатов - в соответствии с парциальной составляющей его вектора состояния, которая имеет максимальное значение $S_{max}(t)$ среди всех диагностируемых параметров всех агрегатов НХК. Опасность состояния НХК – в соответствии с парциальной составляющей $\dot{S}_{max}(t)$, которая является максимальной среди всех скоростей износа всех агрегатов НХК. Аналогичные формулировки справедливы и в пространстве диагностических признаков согласно обобщенной математической модели (4), (5). Техническое состояние агрегата и НХК в целом определяется максимальной парциальной составляющей вектора диагностических признаков $Y_{max}(t)$, наблюдаемой СДМ среди узлов агрегата и НХК в целом соответственно. Опасность состояния агрегата и НХК в целом определяется максимальной парциальной составляющей скорости роста тренда вибропараметра $\dot{Y}_{max}(t)$, наблюдаемой СДМ среди всех скоростей по узлам агрегатов и НХК в целом соответственно. Необходимое быстродействие СДМ определяется максимальной скоростью утраты работоспособности и минимальным запасом предельного состояния диагностируемого агрегата:

$$F = \frac{1}{T} = Max\left(B\frac{\dot{S}_{НДП}}{S_{НДП}}\right) = Max\left(B\frac{\dot{Y}_{НДП}}{Y_{НДП}}\right). \qquad (6)$$

Параметр **B** в (6) характеризует качество алгоритма оценки скорости роста измеряемых диагностических признаков. Предложенные модели и определения лежат в основе способов диагностики и СДМ с функционально неопределенной структурой, новизна которых подтверждена патентами на изобретения.

Во второй главе разрабатываются обобщенные математические модели вибрации и состояния агрегата для решения статической и динамической задач диагностики и мониторинга. Колебания агрегата описываются матричной системой дифференциальных уравнений, содержащих в правой части вектор нелинейных, параметрических членов и сил, возбуждаемых в том числе обобщенными погрешностями. На примере шестеренного насоса показано, что согласно π-принципу необходимо измерять вибрацию в широком диапазоне частот от единиц Гц до десятков кГц, что легко достигается при измерении стандартных параметров – виброперемещения (**S**), виброскорости (**V**), виброускорения (**A**), для которых так же, как и для их огибающих, справедливо единообразное представление в виде смеси шумовых и периодических составляющих (ШПС). Эти вибропараметры ортогональны для случайных процессов зарождения и развития неисправностей в силу равенства нулю взаимокорреляционной функции между параметром и его производной в совпадающие моменты времени:

$$B_{VA}(\tau) = -\frac{1}{2\pi}\int_0^{\infty} \omega \cdot V(\omega) \cdot \mathrm{Sin}(\omega\tau) d\omega, \qquad (7)$$

при $\tau = 0$, $\mathrm{Sin}(\omega\tau) = 0$ и $B_{VA}(0) = 0$, $B_{SV}(0) = 0$.

Физически это объясняется тем, что они отражают разные дефекты, которые порождаются различными причинами и превалируют в разных частотных диапазонах. Вибропараметры **A, V, S** тесно связаны лишь в простейшем случае, при синусоидальной возбуждающей силе, что наблюдается у агрегатов НХК достаточно редко лишь при возникновении дисбаланса (5–10 % всех медленно развивающихся дефектов). Сигналы в различных участках спектра целесообразно представить разложением по характерным блокам ШПС на три группы диагностических признаков: дискретные составляющие, частоты которых кратны частоте вращения–лопаточные, зубцовые и оборотные гармоники - $\mathbf{Z}(\omega)$; дискретные составляющие, частоты которых пропорциональны частоте вращения, но связаны с ней дробными коэффициентами, например, подшипниковые частоты - $\pi(\omega)$; частотные составляющие, независимые от частоты вращения, прочие составляющие и непрерывная компонента спектра, заполняющие промежутки между дискретными составляющими первых двух групп - $\mathbf{H}(\omega)$. Обобщенная диагностическая модель спектра вибросигнала (ВС) в виде смеси шумовых и периодических составляющих (ШПС) имеет вид:

$$G(\omega) = Z(\omega) + \pi(\omega) + H(\omega). \qquad (8)$$

Для диагностики агрегата необходимо выделить из смеси и измерить энергетические характеристики составляющих ШПС каждого блока. Представим математическую модель ШПС в рекуррентном виде:

$$\begin{aligned} H_n(t) &= P_{n+1}(t) + H_{n+1}(t), \\ H_n(\omega) &= P_{n+1}(\omega) + H_{n+1}(\omega), \qquad 0 \le n \le m\ q, \end{aligned} \qquad (9)$$

где $P(\omega) = \sum_{k=1}^{N} P_k^2 \delta(\omega - k\omega_p)$ - наиболее высокочастотная на каждом уровне селекции периодическая составляющая с дисперсией **P**, порождаемая машинами и механизмами агрегата; P_k, $k\omega_p$ - амплитуда и частота **k**-й гармоники периодической составляющей; **N** - число гармоник; $\mathbf{H}(\omega)$ – шумовая составляющая сигнала с дисперсией **H**, включающая все остальные периодические и случайные компоненты и представляющая, в свою очередь, ШПС следующего уровня. Дисперсия шума в полосе селекции гармоник периодической составляющей $\mathbf{H}(k\omega_p)$ меньше дисперсии последних и существенно меньше дисперсии шумовой составляющей **H**, вследствие чего обобщенная модель (8), (9) порождает почти ортогональные между собой (с остаточной корреляцией менее 0,3) диагностические признаки ШПС:

при $\omega = k\omega_p$ $P_{n+1}(k\omega_p) > H_{n+1}(k\omega_p) << H$; при $\omega \neq k\omega_p$, $P_{n+1}(\omega) = 0$; $H_{n+1}(\omega) > 0$;

$$\frac{1}{P\,H}\int_0^{\infty} P(\omega)\,H(\omega)\,d\omega = \frac{1}{P\,H}\sum_{k=1}^{N} P_k^2\,H(k\omega_p) << 1\,. \qquad (10)$$

Число уровней ШПС **n**, выделенных при диагностике, определяется тактико-техническими требованиями и технико-экономическими соображениями. В агрегате **n** ограничено произведением числа диагностируемых узлов **m** на количество имеющихся в них кинематических пар и других, например гидродинамических, источников вибрации **q**. Случай **n = 0** соответствует диагностике по исходным параметрам вибрации: виброускорению (**A**), виброскорости (**V**) и виброперемещению (**S**), составляющих полную группу. Обобщенная диагностическая модель ШПС ВС инвариантна к существующим типам агрегатов НХК и лежит в основе адаптивных СДМ с функционально неопределенной структурой.

Разработана матричная модель вибрации, методика синтеза спектральной матрицы (СМ) на основе моделей ШПС (8), (9), введены ее преобразования, способы разбиения на блоки и оценки их норм в различных частотных полосах для синтеза рациональных диагностических признаков.

Разработана динамическая модель состояния и вибрации агрегата на интервале жизни с учетом человеческого фактора, которая устанавливает экспоненциальную форму связи между диагностическими признаками, структурными параметрами и остаточным ресурсом:

$$\{\dot{Y}\} = [a]\{Y\} + \{u\},\ \{\ddot{Y}\} = [a]\{\dot{Y}\};\ [C][A][C]^{-1} = [a],\ [C]\big[[B] - [A][C]^{-1}[D]\big]\{U\} = \{u\};$$

$$\{Y(t)\} = e^{[a](t-t_0)}\{Y(t_0)\} + \left(e^{[a](t-t_0)} - 1\right)[a]^{-1}\{u\}. \qquad (11)$$

Второе слагаемое в последнем уравнении (11) определяется остаточным вектором управления $\{u\} = Const$ и при малых интервалах времени остаточного ресурса $T = t - t_0$ практически равно нулю. В этом случае влиянием второго члена можно пренебречь. Обозначая $Y(t_0) = Y(0) = Y_0$; $Y(t - t_0) = Y(T) = \Delta Y$, получим:

$$\{\Delta Y\} = \{Y(T)\} = e^{[a]T}\{Y_0\};\qquad \{\Delta S\} = [C]^{-1}e^{[a]T}\{Y_0\} = \{S(T)\}; \qquad (12)$$

$$\{\dot{Y}\} = [a]e^{[a]T}\{Y_0\};\qquad \{\dot{S}\} = [C]^{-1}[a]e^{[a]T}\{Y_0\}.$$

Уравнения (11), (12) полностью определяют динамику состояния агрегатов НХК через динамику диагностических признаков вибрации, температуры и др. и скоростей их изменения. Предложенные модели позволяют учесть различные факторы, влияющие на вибронагруженность агрегата, его работоспособность и остаточный ресурс. Человеческий фактор проявляется в нарушениях режима работы агрегата (гидроудар, кавитация, перекосы и т.д.) и

правил его эксплуатации (заливка грязного масла, отсутствие охлаждающей воды и т.д.), что вызывает быстрые тренды и резкие скачки вибрации, температуры, тока и сопровождается быстрой утратой работоспособности агрегатом. Полученные теоретические результаты лежат в основе ряда патентов на способы и устройства диагностики и прогнозирования технического состояния агрегатов и обеспечивают реализацию стратегии диагностики минимальной стоимости при внедрении СДМ агрегатов НХК.

В третьей главе изложена методика автоматического распознавания и рекуррентной селекции диагностических признаков на основе установленной закономерности существования основного вибрационного процесса с максимальной энергией, определяемого структурой агрегата. Предложен алгоритм рекуррентной фильтрации ШПС вибрации, который позволяет одновременно оценить амплитуду и частоту периодической составляющей ШПС по максимуму функционала правдоподобия $\rho(j)_{max} = \max_{1<j<p_{ka}} \rho(j)$, если задать ядро $V_j(t)$ неоднородного интегрального уравнения Винера-Хопфа в спектральной области $V_j(k\omega_j)$ в виде решетчатой функции известной структуры (зубьями гребенки вверх):

$$\rho(j) = [s(\omega)]\,[V_j(k\omega_j)], \quad \rho(j) = \sum_{k=1}^{N} s_{pkj} * 1(p_{kj})$$

$$V_j(t) = \sum_{1}^{N} 1 * \mathrm{Cos}(k\ \omega_z\ t) = \sum_{1}^{N} 1 * \mathrm{Cos}\left(k \frac{F_{mj}}{N} 2\pi t\right), \qquad (13)$$

где $s(\omega)$ – сигнал, содержащий ШПС; $1(.)$ – единичная амплитуда; $k\,\omega_z$ – перестраиваемые в заданных пределах поисковые частоты гармоник основного периодического процесса; N – число искомых гармоник; F_{mj}, p_{kj}- предполагаемая частота N-й гармоники основного периодического процесса и номер k–й гармоники при j-й итерации (на j-ом шаге). Максимум функционала достигается на той частоте F_{mo}, которая совпадает с N-й гармоникой основного процесса с заданной погрешностью, лежащей в полосе анализа **df,** пропорционален мощности искомого полигармонического процесса и однозначно определяет частоту и амплитуду $s(p_{kj})$ каждой его гармоники. Для выделения шумовой компоненты $H(t)$ из вибросигнала $s(t)$ ядро $V_{Hj}(t)$ задаем также в виде решетчатой функции (зубьями гребенки вниз) вида $V_{Hj}(t) = 1 - V_j(t)$. Глобальный минимум функционала правдоподобия $\rho_H(j)$, достигаемый при перестройке в диапазоне частот возможного нахождения основных гармоник, соответствует максимальному подавлению гармоник периодической компоненты в спектре вибросигнала и наиболее «чистому» выделению шумовой компоненты $H(t)$ из сигнала. Структура разработанного алгоритма фильтрации ШПС приведена на рис. 2 и составляет основу способа и устройства диагностики, защищенного патентом. Предложены способ, устройство и адаптивный алгоритм автоматического распознавания спектральной матрицы ШПС, по максимуму выходного сигнала гребенчатого фильтра, достигаемого настройкой на основной виброакустический процесс

$\mathbf{P_1(t)}$, инвариантные к конструкции машины и режиму ее функционирования с оценкой частоты вращения и уточнения структуры машины по спектру вибрации, результаты исследования которых приведены на рис. 3.

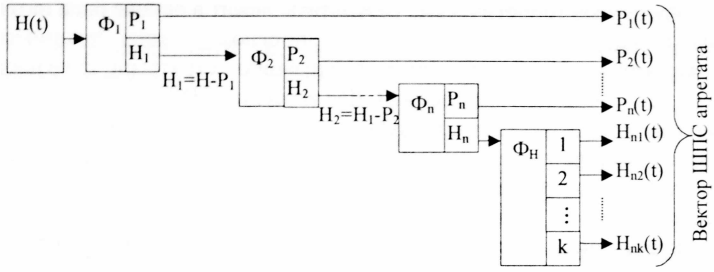
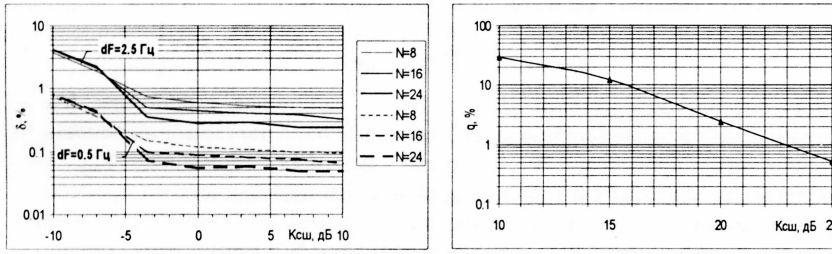


Рис. 2. Алгоритм рекуррентной фильтрации ШПС как функций времени:
H (t) – исходный вибрационный «шум» агрегата;
$\mathbf{P_1(t)}$ - $\mathbf{P_n(t)}$ – отфильтрованные периодические составляющие;
$\mathbf{H_{n1}(t)}$ - $\mathbf{H_{nk}(t)}$ – отфильтрованные шумовые составляющие-случайные процессы; $\mathbf{\Phi_1}$ - $\mathbf{\Phi_n}$ – фильтры, с ядром (13) по выходу **P** и с ядром $\mathbf{V_{Hj}(t)}$ по выходу **H**; $\mathbf{\Phi_H}$ – набор полосовых фильтров



а) б)

Рис. 3. Относительная погрешность измерения частоты вращения **δ** и эмпирическая ошибка распознавания **q** числа лопаток импеллера центробежного насоса по спектру вибрации в зависимости от отношения сигнал/шум **Ксш** и ширины полосы анализатора **dF**:
а) **δ**-при разном числе учитываемых оборотных гармоник **N**;
б) **q**-при числе учитываемых лопаточных гармоник **N** = 2

Четвертая глава посвящена структурно-параметрическому синтезу формирователей инвариантных диагностических признаков, разработанных на базе статической модели вибрации и методики распознавания ее спектра. Селекция ШПС из спектра ВС, удовлетворяя **π**-принципу, обеспечивает формирование ортогональных, линейно-независимых признаков для диагностики машин. Физическая природа этой ортогональности определяется участием различных структур механизма в генерации периодических и

случайных компонент вибрации. Анализ корреляционной матрицы вибропараметров насосных агрегатов, имеющих различное техническое состояние, полученных с помощью предложенной структуры (рис. 2), включает среднеквадратичное значение виброускорения в диапазоне 10 Гц ÷ 3 кГц (**A**), эффективное значение высокочастотной (первой) периодической компоненты $\mathbf{P_1}$, соответствующее основному периодическому процессу, порождаемому лопаточными гармониками импеллера центробежного насоса ($\mathbf{A_Z}$), эффективное значение второй периодической компоненты ($\mathbf{P_2}$), порождаемой оборотными гармониками вследствие развития индивидуальных погрешностей муфты, дисбаланса и нарушения центровки валов ($\mathbf{A_O}$), и эффективное значение шумовой компоненты ($\mathbf{H_2}$), отражающей остальные погрешности агрегата. Коэффициенты корреляции Пирсона минимальны между шумовой составляющей $\mathbf{H_2}$ и периодической составляющей лопаточных гармоник $\mathbf{P_1}$. Линейная связь между признаками $\mathbf{P_1}$ и $\mathbf{P_2}$, отражающими связь между двумя периодическими компонентами - лопаточных и оборотных гармоник, а также между шумовой $\mathbf{H_2}$ и периодической $\mathbf{P_2}$ составляющими весьма слабая и незначима на 1 % уровне. Диагностические признаки ШПС, сформированные по предложенному алгоритму, практически ортогональны и позволяют диагностировать дополнительные классы неисправностей.

Наибольший коэффициент корреляции наблюдается между шумовой составляющей $\mathbf{H_2}$ и исходной вибрацией **A**, что указывает на перспективы дальнейшей фильтрации ШПС. Распределения ШПС хорошо аппроксимируются законом Вейбулла–Гнеденко с показателями степени от 1.85 (**Az**) до 2,87 ($\mathbf{H_2}$). На базе данного метода селекции реализован метод диагностики пяти классов неисправностей насосных агрегатов по кусочно-линейным дискриминантным функциям, защищенный патентом.

Разработано семейство формирователей диагностических признаков по отношению уровней шумовых и периодических составляющих внутренних характеристик вибрации, инвариантных к условиям диагностики, порождающих инвариантные критерии оценки технического состояния агрегатов с зарождающимися и накапливающимися дефектами, которые представлены в табл. 1.

Таблица 1

Инвариантные обобщенные диагностические признаки

Критерий	$W_{PS}=\frac{P}{s}$	$W_P=\frac{P}{H}$	$W_h=\frac{H}{P}$	$W_{ph}=\frac{P}{H}\frac{H}{P}=W_p-W_h$
Критич. Знач.	0,5	1	1	0
Исправен	> 0,5	> 1	< 1	> 0
Неисправен	< 0,5	< 1	> 1	< 0
Чувствит-ность	Равномер.	Зар.деф.	Нак.деф.	Зар./нак.деф.

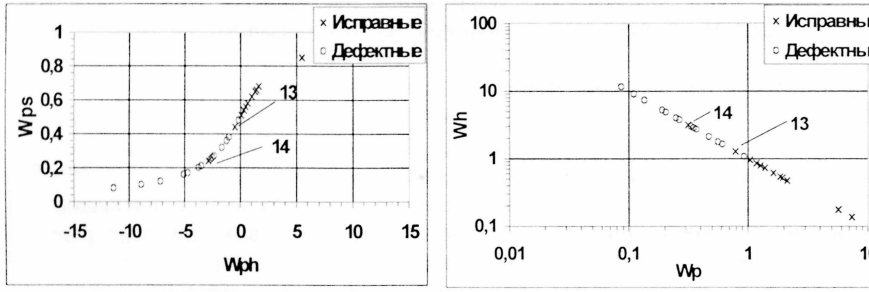
В предложенных признаках естественной мерой разделения машин на два класса (дихотомии) является критерий равенства мощностей (дисперсий)

периодической и шумовой составляющих **P = H**, который является инвариантом для вибрационных процессов, представляющих собой смесь ШПС. Например, для W_h имеем:

$$W_h = \frac{H}{P} = \frac{(a^2 + \sigma_q^2)\exp(\sigma_v \omega_{cp})}{(a^2 + r\sigma_q^2)} - 1, \qquad (14)$$

где **a**, σ^2_q, **r** – среднее, дисперсия и коэффициент корреляции амплитуд; σ^2_v – дисперсия фазы импульсов сил взаимодействия деталей.

Когда параметры импульсов сил взаимодействия деталей постоянны, то есть $\sigma_q \to 0$, $\sigma_v \to 0$, $r \to 1$, то непрерывная часть спектра исчезает, а дискретная часть совпадает со спектром мощности периодической последовательности немодулированных импульсов, $W_h = 0$. При росте погрешности, случайного возбуждения и вариации амплитуд импульсов σ_q / a, уменьшения их корреляции **r** и увеличения флуктуации фазы σ_v относительный уровень шумовой составляющей W_h возрастает. Относительные значения параметров ШПС вибрации машины служат надежным диагностическим признаком, отражающим ее техническое состояние (рис. 4) и, кроме того, не зависят от погрешностей измерительно–преобразовательного тракта.



а) б)

Рис. 4. Разделение агрегатов на два класса с исправными и дефектными подшипниками качения в координатах диагностических признаков: а) W_{ph} - W_{ps}; б) W_p - W_h; 13, 14 агрегаты с кавитационной эрозией

Разработаны метод и устройство синхронной пиковой демодуляции (СПД), обеспечивающие высокую чувствительность к зарождающимся дефектам. При этом диагностика проводится по огибающей накопленных пиков виброимпульсов, что делает этот метод инвариантным к высокооборотным (центробежные компрессоры с $n = 12000$ мин$^{-1}$ и скважностью импульсов соударения деталей $\Theta \le 0{,}63$) и низкооборотным (поршневые компрессоры с $n = 375$ мин$^{-1}$ и $\Theta \ge 12{,}1$) машинам. Относительная эффективность СПД по сравнению с амплитудной демодуляцией E_B и синхронным накоплением E_H, соответственно, определяется выражениями:

$$E_в = \frac{1}{1-e^{-\Theta}}, \qquad E_н = \sqrt{\frac{2\Theta}{1-e^{-2\Theta}}}, \tag{15}$$

Зависимости коэффициентов $E_в$ и $E_н$ от скважности Θ приведены на рис. 5 и удовлетворительно совпадают с практическими результатами, полученными по уравнениям регрессии, $E_в$ = 2,43 при Θ = 0,63 и $E_н$ = 5,04 при Θ = 12,1.

Разработан метод и устройство повышения достоверности результатов диагностики и мониторинга путем рандомизированного усреднения с определением характеристик рандомизации на основе экстремальных характеристик выбросов фазы ШПС вибрации. Полученные научные результаты реализованы в ряде способов диагностики и структур диагностических устройств, новизна которых подтверждена 7 патентами на изобретения.

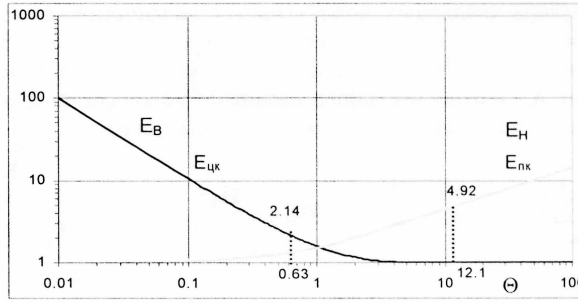


Рис. 5. Эффективность метода синхронной пиковой демодуляции

В пятой главе изложены результаты исследования эмпирических закономерностей и разработки методик диагностики и прогнозирования на основе статической и динамической моделей. По 11751 реализации получены статистические, корреляционные и спектральные оценки виброускорения, виброскорости, виброперемещения и входящих в них шумовых и периодических составляющих агрегатов НХК, которые подтверждают со статистической надежностью 0,999 достоверность и адекватность основных соотношений обобщенных математических моделей, методов фильтрации ШПС, оценки частоты вращения по спектру вибрации, синтеза и преобразования спектральной матрицы и являются основой для нормирования вибрации. Установлены закономерности мультимодальности трендов вибропараметров агрегата; ортогональности виброускорения, виброскорости, виброперемещения, шумовых и периодических компонент и скоростей их роста; распределения и пределов изменения виброускорения, виброскорости, виброперемещения и скоростей их роста, максимальные значения которых не превышают 60 м/с^2, 25 мм/с и 100 мкм для вибрации, 8 м/с^2/ч, 6 мм/с/ч

МГТУ им. Н.Э. Баумана
Библиотека

и 27 мкм/ч для скоростей соответственно, шумовых и периодических составляющих вибрации агрегатов НХК, описываемых законами распределения Вейбулла-Гнеденко с показателями степени от 0,7 до 2,9, а для коллективных и относительных признаков ШПС от 0,27 до 15,5.

Разработана методика статической диагностики агрегатов НХК на основе совместного использования параметров виброускорения **A**, отражающего проблемы механизмов в высокочастотной области спектра (подшипники, кавитация), виброскорости **V**, отражающей проблемы машин в среднечастотной области спектра (нарушение центровки, балансировки), виброперемещения **S**, отражающего проблемы агрегата в низкочастотной области спектра (нарушение крепления узлов между собой и агрегата к фундаменту и присоединенным конструкциям-рис. 6). Практически подтвержденная достоверность диагноза лежит в пределах 96-99 % с доверительной вероятностью 0,99. Разработана методика синтеза и рационального выбора скалярных коллективных диагностических признаков ШПС, которая обеспечивает ошибки диагностирования менее 0,01 % (табл. 2-объем выборки сигналов 10^6). Суммарный уровень оборотных гармоник A_{oij}, зубцовых гармоник A_{zij} и относительного уровня шумовой составляющей W_{hij} в полосах **i-j** зубцовых гармоник определялся по выражениям:

$$A_{oij} = \sum_{k=i}^{j} A_{ok};\ A_{zij} = \sum_{k=i}^{j} A_{zk};\ W_h 9 = \frac{H_1 9}{A_z 9};\ W_h 111 = \frac{H_1 111}{A_z 111}. \qquad (16)$$

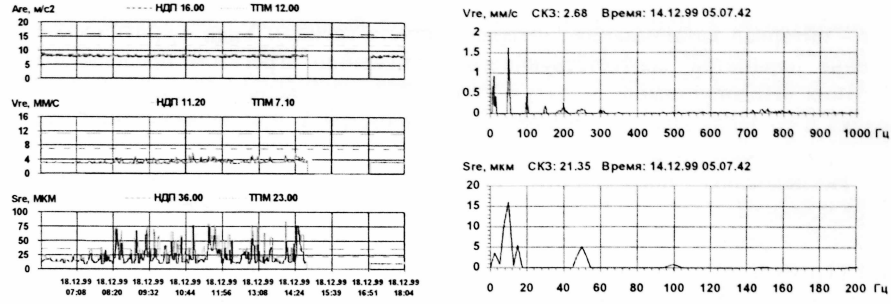
Таблица 2

Коллективные признаки ШПС с минимальными ошибками диагностики износа зубьев шестеренного топливного насоса ГТД по выборке 326 насосов

Признак	W_h111	A_O111	A_O9	W_h9
Ошибка (по восстановленным распределениям Вейбулла-Гнеденко), **%**	0,001	0,008	0,013	0,027
Число составляющих «коллектива»	176	77	63	144

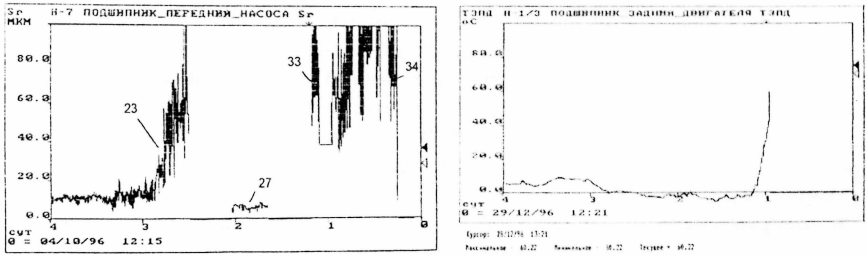
Разработана методика динамической диагностики и прогнозирования опасной деградации состояния агрегатов НХК (рис. 7) по фазовой траектории жизни, которая позволяет полностью использовать ресурс оборудования при сохранении его безопасности и ремонтопригодности (рис. 8). Из (12) для скалярного случая получим оценку параметра скорости роста **a(t)** и интервала прогноза **T(t)**:

$$a(t) = \frac{1}{(1-n)\tau}\left[-\frac{\Delta_n^1 Y(t)}{Y(t)} \times \frac{(n-1)\tau}{(n-1)\tau}\right] = \frac{V_Y(t)}{Y(t)},\ T(t) = \frac{Y(t)}{V_Y(t)} \ln \frac{Y_{НДП}}{Y(t)}, \qquad (17)$$



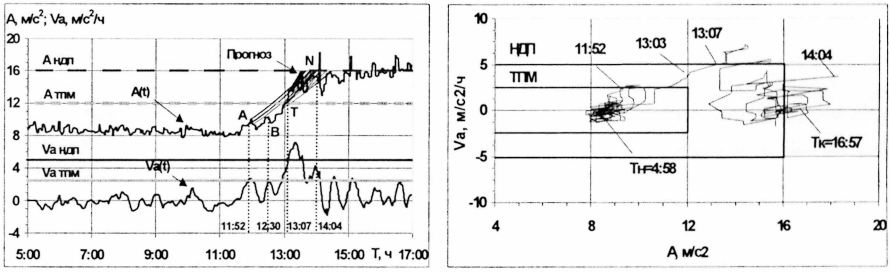
а) б)

Рис. 6. Вибрация двигателя ВАО-71-292 при ослаблении крепления:
а) тренды **A, V, S** до и после ремонта; б) спектры **V, S** перед ремонтом



а) б)

Рис. 7. Быстрые тренды диагностических сигналов:
а) виброперемещения при ослаблении крепления насоса НК210;
б) температуры подшипника скольжения электродвигателя ВАО500L-2 центробежного насосного агрегата НПС200/700



а) б)

Рис. 8. Диагностика и прогнозирование состояния насосного агрегата: а) прогноз разрушения подшипника по трендам виброускорения **A(t)** и скорости его роста **Va(t)**; б) диагностика на фазовой плоскости **A-Va**

где τ – интервал запаздывания (интервал отсчета тренда); $Y_{НДП}$ – критическое значение параметра, соответствующего достижению агрегатом предельного состояния «Недопустимо»; $\Delta_n^1 Y(t) = Y(t) - Y(t - n\tau)$ – конечная разность 1-го порядка n-го запаздывания - приращение параметра Y при запаздывании $n\tau$; V_Y- скорость роста вибропараметра.

Исследованы погрешности прогноза, которые аппроксимированы распределением Вейбулла-Гнеденко с показателем степени $a \approx 1$, медианой упреждения равной 30 % длительности прохождения вибропараметром зоны ТПМ (Требует принятия мер) при опасном состоянии агрегата. Непрерывное измерение в реальном времени нового независимого диагностического признака – скорости роста тренда – почти в два с половиной раза увеличило интервал времени, в течение которого персонал НХК может предотвратить аварию, производственную неполадку и перевести объект в безопасное состояние без нарушения нормального функционирования технологического процесса. Максимальный интервал прогноза почти в десять раз превышает интервал наблюдения при ошибках прогноза менее 15 %. Такая глубина прогноза стала возможной благодаря эффективной математической модели. Полученные научные результаты лежат в основе методик диагностирования, новизна которых подтверждена 8 патентами и авторскими свидетельствами на изобретения. Методики применяются в качестве алгоритмов в программном обеспечении автоматических адаптивных СДМ.

В шестой главе разработаны автоматические системы и методические основы технологии мониторинга. Разработаны принципы синтеза адаптивных СДМ с функционально неопределенной структурой, ядром которых является IBM-совместимый компьютер и распределенная полевая сеть модулей сбора и передачи диагностической информации. Принцип информационной полноты обеспечивает выбор диагностических признаков, снижающий вероятность пропуска отказа; принцип достаточности регламентирует выбор минимального числа датчиков вторичных процессов, сопровождающих работу машин, которые обеспечивают наблюдаемость технического состояния прежде всего путем расширения полосы частот; принцип инвариантности и коллективного распознавания регламентирует выбор и селекцию коллективных диагностических признаков, которые инвариантны к конструкции машины и форме связи с параметрами ее технического состояния; принцип структурной гибкости и программируемости обеспечивает реализацию оптимальной параллельно-последовательной структуры распределенных СДМ, исходя из критериев необходимого быстродействия при минимальной стоимости и адаптивного управления измерительными каналами в зависимости от скорости деградации состояния агрегата; принцип коррекции неидеальностей измерительных трактов вычислительными методами на ЭВМ - нелинейности датчиков, амплитудно-фазовых характеристик согласующе-преобразовательных звеньев и т.д. позволяет обеспечить высокие метрологические свойства СДМ при небольших аппаратных затратах; принцип самодиагностики и автоматизированной поверки всех измерительных каналов

СДМ обеспечивает поэтапный ввод и легкий пуск систем в эксплуатацию, простоту обслуживания и ремонта отдельных каналов, высокую метрологическую и функциональную надежность системы, ее выживаемость и приспособляемость к постоянно меняющимся условиям реального производства; принцип дружественности интерфейса при максимальной информационной емкости экрана представления данных обеспечивает восприятие оператором состояния технологической системы в целом при одном взгляде на монитор и получение целеуказающего предписания на ближайшие неотложные действия; принцип многоуровневой организации обеспечивает работу с системой специалистам разных уровней квалификации и ответственности. Системы разных цехов объединяются в диагностическую сеть предприятия, к которой подключены также и компьютеры пользователей-руководителей - от заместителей и начальников цехов до главных механиков и инженеров производств и предприятия в целом. Другой стороной диагностической сети является организация автоматизированной системы диагностических исследований в рамках всего предприятия, что обеспечивает постоянное развитие и совершенствование подобных систем. Такая многоуровневая организация обеспечивает эффективное управление состоянием оборудования и его безопасной эксплуатацией на базе локальных, производственных и глобальных информационно-диагностических сетей на принципах Intranet/Internet. Разработаны программно-аппаратные средства адаптивных СДМ реального времени, параллельно-последовательная структура которых обеспечивает баланс характеристик систем в координатах "быстродействие-стоимость", и сетевые структуры автоматической диагностической сети. Стационарные системы непрерывного компьютерного мониторинга **КОМПАКС®** имеют простую распределенную архитектуру типа Fieldbus. Главным «кирпичиком» этой архитектуры - полевой диагностической сети **CoRNet®** - является периферийный интеллектуальный модуль **PIM™**, обеспечивающий подключение любых типов датчиков с гарантируемым радиусом сбора информации не менее 1000 м от операторной с питанием модулей и датчиков от контроллера без дополнительных источников. В **табл. 3** приведены результаты расчета периода **T** диагностики состояния нефтехимического комплекса по критерию наблюдаемости максимальной скорости (6) для диагностических признаков с минимальными критическими значениями и максимальными скоростями роста, полученных в гл. 5. Допустимая продолжительность постановки диагноза по одному каналу измерения, **τ**, рассчитывалась для средней системы с числом датчиков **M=100**. Для надежной оценки скорости экспоненциального роста рекомендуется принимать минимальное число измерений **B = 3-10**. В этих условиях период диагностирования всех агрегатов, входящих в нефтехимический комплекс, не должен превышать 4,8 мин (**B = 10**) с доверительной вероятностью пропуска быстроразвивающейся неисправности не более 0,1 %. При этом продолжительность диагноза по одному каналу не должна превышать $\tau \leq 2{,}9$ **с**. За счет организации параллельной работы до 16 каналов и конвейерной

подготовки и обработки данных СДМ КОМПАКС адаптируется к НХК без потери адекватного отображения опасных состояний.

Таблица 3

Расчет периода T диагностики состояния нефтехимического комплекса и продолжительности τ постановки диагноза по одному каналу

Период **T** опроса НХК и продолжительность диагностирования τ по одному каналу	Диагностические признаки и скорости их роста							
	A_H, м/с^2	V_{AH}, м/с^2/ч	V_H, мм/с	V_{VH}, мм/с/ч	S_H, мкм	V_{SH}, мкм/ч	T_H, °C	V_{TH}, °C/ч
	12	15	7,1	5	23	25	80	10
T, при **B=10**	4,8 мин		8,6 мин		5,5 мин		46 мин	
τ, при **B=10, M=100**	2,9 с		5,2 с		3,3 с		27,6 с	

Программное обеспечение СДМ КОМПАКС имеет новые опции (рис. 9), которые дают ряд важных преимуществ перед известными: автоматическое определение и указание наиболее опасного агрегата и его узла, определяющих опасность состояния всего НХК; речевое предупреждение персонала; журнал механика-электрика – организатора обратной связи «персонал-СДМ», обеспечивающего контроль за исполнением диагностических предписаний с расшифровкой действий персонала; инвариантность экспертной системы к типам диагностируемых агрегатов, благодаря инвариантности диагностических признаков; блокировка агрегатов по сообщениям экспертной системы в диалоге оператора с СДМ, что повышает безопасность НХК при отсутствии автоматики технологических потоков.

Разработаны принципы, структура и язык синтеза многоуровневых адаптивных экспертных систем (ЭС) поддержки принятия решения при диагностике механизмов, машин и агрегатов и созданы экспертные системы, содержание которых определяется предметной областью СДМ и минимумом априорной информации (рис. 10). На первом уровне синтеза необходима априорная информация о мощности и типе агрегата, что достаточно для реализации методик статической и динамической диагностики по стандартным вибропараметрам и скоростям роста. На втором уровне синтеза необходима информация о частоте вращения и структуре машины, что позволяет реализовать методики автоматического распознавания спектра с уточнением структуры машины и фильтрацией ШПС основных гармоник ($\mathbf{P_1}$), оборотных гармоник ($\mathbf{P_2}$) и шумовой составляющей между ними. Ортогональных признаков при этом достаточно для надежной диагностики всех основных дефектов агрегатов. На третьем уровне синтеза требуется информация о конструкции отдельных узлов, например подшипников. На последующих уровнях используются специальные программно-технические средства для реализации специальных методик диагностики: синхронных измерений по нескольким каналам; с привязкой к углу поворота вала и т.д.

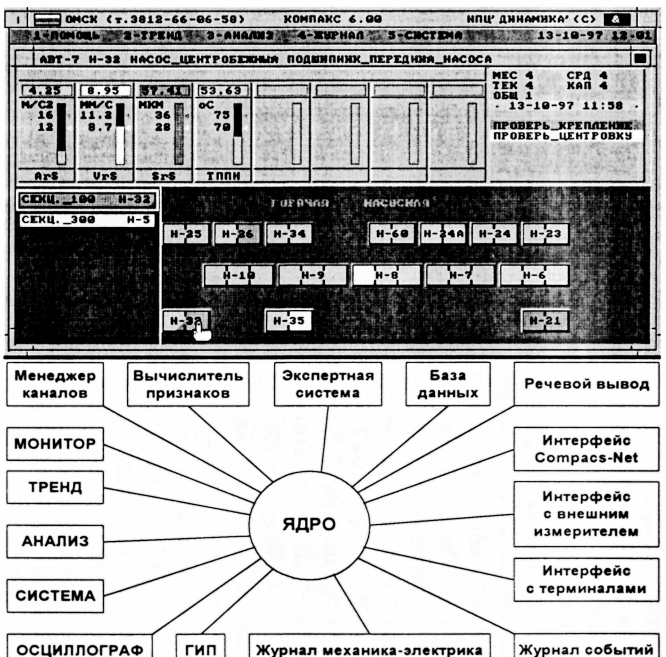


Рис. 9. Экран СДМ КОМПАКС с географией агрегатов, автоматическим указанием наиболее опасного агрегата, предписанием персоналу и структура ПО

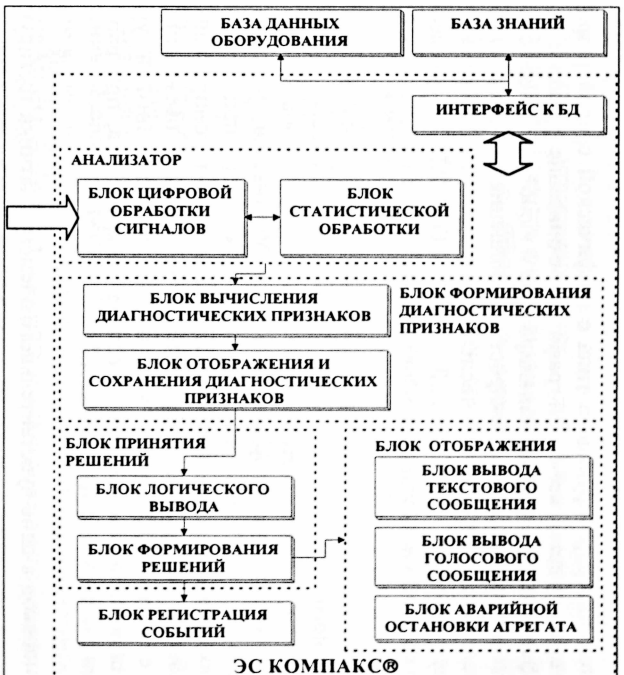


Рис. 10. Структура экспертной системы

Специализированный язык программирования CDPL структур СДМ и ЭС является языком интерпретирующего типа с графической средой разработки программ, которая представляет собой графическое описание функций и связей между ними. Все функции языка скомпилированы и включены в ядро системы, что позволяет оптимизировать по скорости выполнения сложные операции, требующие большого количества вычислений, и упростить программу. Базы данных оборудования и базы знаний в ЭС КОМПАКС® отделены от исполняемого кода, что позволяет модифицировать ЭС, не затрагивая основной программы.

Предложена методика обеспечения контролепригодности агрегатов НХК взрывозащищенного исполнения путем расширения полосы частот для диагностики (с использованием **A, V, S**); оригинального способа замены трехкоординатного датчика однокоординатным типа Vibro-scalar, размещаемым внутри телесного угла вектора динамических сил при различных неисправностях; унифицированных устройств их крепления, опирающихся на типовые резьбовые соединения в агрегатах; и уникальных пьезодатчиков с собственной емкостью 0,25 мкФ, которая обеспечивает низкий уровень собственных шумов, не превышающий единиц микрометров, при работе на длинные линии связи в несколько сот метров.

Разработана методика самодиагностики распределенных СДМ, опирающаяся на ввод в цепь чувствительного элемента датчика тестирующего сигнала и анализ его прохождения до дисплея диагностической станции, и автоматизированной поверки на основе совместного автоматического функционирования СДМ и управляемого ею калибратора диагностических сигналов при поверке в условиях реальной эксплуатации, по фактическому метрологическому состоянию.

Предложена методика нормирования диагностических параметров, опирающаяся на статистические распределения диагностических признаков исправных агрегатов и нормирования критических значений на уровне 95-98 процентилей распределения. На базе этой методики разработаны, широко апробированы и утверждены Минтопэнерго и Госгортехнадзором России Руководящий документ и вибрационные нормативы безопасной эксплуатации насосно-компрессорных агрегатов НХК, в которых впервые пронормированы совместно виброускорение, виброскорость, виброперемещение и скорости их роста на интервале жизни агрегата для диагностики и эксплуатации по фактическому техническому состоянию. Менее 5 % агрегатов за шесть лет эксплуатации этих норм потребовало впоследствии уточнения критических границ как в сторону увеличения (высокооборотные, 12 000 $мин^{-1}$, центробежные компрессоры – по **A**, низкооборотные, 430 $мин^{-1}$, водяные насосы – по **S**), так и в сторону уменьшения в связи с улучшением качества ремонта приводных электродвигателй и фундаментов на установках. Разработанные нормативы успешно работают на импортных и отечественных агрегатах в разных климатических зонах страны: от г. Ярославля на западе до г. Ангарска на востоке и от г. Тобольска на севере до г. Астрахани на юге.

Это позволяет утверждать, что найденные критические значения вибропараметров являются инвариантами для широкого класса агрегатов НХК. На базе разработанных принципов, структур и методик разработаны СДМ квазистатического оборудования, для серийного и ремонтного производства. Внедрен ряд стендов и систем в ремонтном производстве: входной диагностики подшипников, балансировки роторов насосов и двигателей, диагностики и испытаний их после ремонта, что позволило получить высокое качество изготовления и ремонта, выпускать "невибрирующие" насосы и двигатели, обеспечить "одноразовый" монтаж и пуск агрегатов в эксплуатацию. Система аттестована на взрывозащиту по классу 0ExiaIIC, испытана и принята комиссией департамента нефтепереработки Минтопэнерго РФ, сертифицирована и внесена в Государственный реестр Госстандартом РФ, разрешена к применению Госгортехнадзором на всей территории России. Новизна предложенных адаптивных СДМ, подтверждена патентами на изобретения и промышленные образцы.

В седьмой главе разработаны автоматизированная система и технология управления безопасной ресурсосберегающей эксплуатацией агрегатов НХК в реальном времени (АСУ БЭР), объединяющие СДМ предприятия на принципах стандарта MIMOSA – рис. 11. Разработана стратегия диагностики минимальной стоимости (СДМС), которая опирается: при проектировании - на инвариантные диагностические модели и методики, сокращающие сроки проектирования в условиях априорной неопределенности; при производстве - на распределенную сетевую модульную структуру программных и аппаратных средств, самодиагностику и автоматизированную поверку, снижающих затраты на строительно-монтажные и пусконаладочные работы и обеспечивающих быстрый поэтапный ввод систем в эксплуатацию; в эксплуатации - на полную прозрачность состояния агрегатов, персонала и самих программно- аппаратных средств. Последовательная реализация СДМС на всех этапах создания, внедрения и эксплуатации систем обеспечивает низкую стоимость получения и реализации диагностических предписаний по фактическому состоянию оборудования, которая с учетом всех затрат на внедрение оборудования, подготовку персонала, эксплуатацию СДМ и контроль за исполнением этого предписания не превышает 0,01 коп. Повышение производительности диагностики и мониторинга по сравнению с переносными приборами превышает миллион раз. Применение СДМ позволяет реализовать технологию ресурсосберегающей эксплуатации и ликвидации фундаментальных причин отказов агрегатов (ЛИФПО), которые обусловлены отсутствием наблюдаемости качества изготовления, ремонта и монтажа агрегатов на установке и качества последующей эксплуатации. Наблюдаемость технического состояния агрегата после изготовления или ремонта обеспечивают стендовые СДМ, а после монтажа на установке и в эксплуатации обеспечивают стационарные СДМ на установках. В работе приведены распределения вибропараметров до и после внедрения СДМ, которые показывают существенное снижение динамических нагрузок в агрегатах.

Рис. 11. Автоматизированная система управления и технология безопасной ресурсосберегающей эксплуатации агрегатов НХК:
ОГМ – служба механика, ОГЭ – служба энергетика, СТН - служба технадзора, КИП – служба контрольно-измерительных приборов

Таблица 4

Эффективность и рентабельность АСУ БЭР и технологии

№ п/п	Наименование удельного показателя (**критерия эффективности**) на один агрегат в год	Год внедрения			
		Ремонты: ППР + ТС			Тех.Сост.
		1	2	3	4
		1993	1994	1995	1996
1	Частота аварий	0,24	0,08	0,03	0,02
2	Частота ремонтов торцовых упл.	1,52	0,72	0,76	0,49
3	Частота ремонтов из-за износа, в том числе подшипников	5,68 4,57	5,58 3,81	5,44 4,29	2,77 1,91
4	Число деталей на 1 ремонт	1,94	1,21	1,44	1,3
5	Общее количество ремонтов	7,2	6,3	6,2	3,3
6	Затраты на ремонт	1,0	0,78	0,78	0,24

1. Увеличение межаварийного пробега комплекса машинных агрегатов - в 12 и более раз;
2. Увеличение межремонтного пробега - в 2 и более раз;
3. Снижение эксплуатационных затрат - в 4 и более раз.

ППР - планово-предупредительные ремонты;
ТС – ремонты по фактическому техническому состоянию

Мониторинг практических результатов применения технологии сберегающей эксплуатации в течение ряда лет приведенный в табл. 4 подтверждает, что эффективность управления эксплуатацией агрегатов НХК по критерию минимума эмпирического риска пропуска внезапного отказа и аварии при внедрении АСУ БЭР и предлагаемой технологии в 12 раз выше, чем традиционного управления нефтехимическим комплексом, оснащенным современной АСУ ТП.

Эксплуатация оборудования нефтегазовой отрасли страны на основе разработанных АСУ БЭР и безопасной ресурсосберегающей технологии снижает аварийность НХК более чем на порядок и дает экономию эксплуатационных затрат и потерь прибыли около 2-х долларов на тонну перерабатываемой нефти в год, что эквивалентно увеличению глубины переработки нефти на 1-2 %.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Внезапные отказы и аварии агрегатов нефтехимических комплексов обусловлены плохой наблюдаемостью, скрытым характером возникновения и развития неисправностей, отрицательным влиянием человеческого фактора. Повышение степени наблюдаемости технического состояния и его опасности на основе автоматических систем мониторинга реального времени с функционально неопределенной структурой позволяет перевести более 90 % отказов из категории внезапных в категорию постепенных при выборе диагностических признаков неисправностей согласно принципу информационной полноты. Для этого наряду с параметрами диагностических сигналов необходимо измерять и скорости их роста. Целесообразно в качестве переменных состояния агрегата использовать парциальные функции старения, отражающие обобщенные погрешности, и их скорости, техническое состояние агрегата оценивать по состоянию его диагностируемого узла, имеющего максимальные погрешности, минимальную остаточную работоспособность и ресурс, а опасность технического состояния агрегата оценивать по опасности потери работоспособности его узлом, имеющим максимальную скорость старения. Рекомендуется оценивать техническое состояние нефтехимического комплекса и опасность потери им работоспособности, соответственно, по минимальной остаточной работоспособности и максимальной скорости ее потери, наблюдаемых среди коллектива агрегатов, составляющих комплекс.

2. Физические закономерности реодинамики и кинетики случайных процессов зарождения и развития неисправностей с учетом человеческого фактора являются причиной ортогональности шумовых и периодических составляющих виброускорения, виброскорости, виброперемещения, других диагностических сигналов и скоростей их роста, а также мультимодальности трендов, отражающих парциальные функции старения агрегата, которые определяются превалирующими процессами износа его узлов в каждый момент времени, проявляются в различных частотных полосах в виде смеси процессов

постепенного и скачкообразного характера с разными скоростями роста, с увеличением дисперсии и расширением спектра диагностического сигнала по мере развития неисправностей. Распределения вибродиагностических признаков адекватно описываются законами Вейбулла-Гнеденко с показателями степени от 0,27 до 15,5.

3. Структура вибрационного процесса с максимальной энергией, определяемая структурой агрегата НХК, лежит в основе статической модели вибрации, обеспечивающей автоматическое распознавание спектра вибрации с измерением частоты вращения и уточнением структуры машины по параметрам спектра, синтез рациональных коллективных диагностических признаков по критерию минимума эмпирической вероятности ошибки диагностики и создание ряда методик, способов и устройств статической диагностики, инвариантных к конструкции агрегатов НХК, что минимизирует сроки и стоимость внедрения систем в условиях априорной неопределенности: на основе рекуррентной селекции шумовых и периодических составляющих спектра вибрации; по отношению уровней шумовых и периодических составляющих, порождающих инвариантные критерии технического состояния агрегатов; на основе синхронной пиковой демодуляции, обеспечивающей высокую чувствительность к зарождающимся дефектам; путем рандомизированного усреднения с определением характеристик рандомизации по параметрам выбросов фазы вибрации диагностируемой машины; на основе совместного использования параметров виброускорения, виброскорости, виброперемещения, обеспечивающего высокую достоверность диагноза.

4. Основные неисправности агрегатов НХК, связанные с неисправностями центровки, крепления и подшипников, порождаются также сопутствующими дефектами, в том числе допущенными персоналом, и сами провоцируют появление новых дефектов, действуя как фактор положительной обратной связи, что объясняет физические причины экспоненциальных трендов старения агрегатов, подтверждающих динамическую модель вибрации и состояния, на основе которой созданы методика, способы и устройства динамической диагностики и прогнозирования опасной деградации состояния агрегатов НХК по фазовой траектории жизни, которые позволяют полностью использовать ресурс оборудования при сохранении его безопасности и ремонтопригодности.

5. Разработаны принципы синтеза и программно-аппаратные средства адаптивных систем мониторинга реального времени, инвариантные к конструкции агрегатов и конфигурации нефтехимических комплексов, параллельно-последовательная функционально неопределенная структура которых обеспечивает баланс характеристик систем в координатах “быстродействие-стоимость”; системы для серийного и ремонтного производства, которые позволили выпускать “невибрирующие” насосы и двигатели, обеспечить “одноразовый” монтаж и пуск агрегатов в эксплуатацию; диагностики квазистатического оборудования и сетевые структуры автоматической диагностической сети на базе Internet/Intranet технологий.

Получены аналитические оценки необходимого быстродействия СДМ по критерию наблюдаемости максимальной скорости потери остаточной работоспособности нефтехимическим комплексом и определения максимальной допускаемой ошибки диагностики технического состояния агрегатов НХК при существующем потоке отказов и требуемом риске пропуска отказа.

6. Разработана нормативно-методическая база технологии мониторинга: методика обеспечения контролепригодности агрегатов НХК взрывозащищенного исполнения; методика самодиагностики и автоматизированной поверки распределенных систем мониторинга; методика синтеза многоуровневых адаптивных экспертных систем поддержки принятия решения; методика нормирования диагностических параметров, на базе которой разработаны, широко апробированы и утверждены Минтопэнерго и Госгортехнадзором России Руководящий документ и вибрационные нормативы безопасной эксплуатации насосно-компрессорных агрегатов НХК, в которых впервые совместно пронормированы виброускорение, виброскорость, виброперемещение и скорости их роста на интервале жизни агрегата для диагностики и эксплуатации по фактическому техническому состоянию.

7. Разработаны: автоматизированная система управления безопасной ресурсосберегающей эксплуатацией агрегатов НХК в реальном времени (АСУ БЭР), объединяющая системы мониторинга на принципах стандарта MIMOSA; стратегия диагностики минимальной стоимости (СДМС), обеспечивающая низкую стоимость автоматического формирования, доставки, реализации и контроля исполнения диагностических предписаний персоналом НХК; технология ресурсосберегающей эксплуатации агрегатов с ликвидацией фундаментальных причин отказов (ЛИФПО) на всех стадиях жизненного цикла. Сформулирован критерий эффективности управления состоянием агрегатов НХК по минимуму эмпирического риска пропуска отказа. Получены аналитические оценки увеличения ресурса безопасного пробега НХК в зависимости от максимальной ошибки СДМ. Внедрение АСУ БЭР более чем на порядок увеличивает эффективность управления безопасной эксплуатацией и межаварийный пробег агрегатов НХК, что сберегает значительные средства для реконструкции предприятий.

8. Результаты практического внедрения подтверждают инвариантность и единообразие применения разработанных методик и систем для диагностики подшипников качения и скольжения, клапанов, газогидродинамических и электромагнитных узлов, зубчатых, кривошипно-шатунных, крейцкопфных и других механизмов, центробежных и шестеренных насосов, электродвигателей, поршневых и центробежных компрессоров и других машин, аппаратов воздушного охлаждения и других агрегатов НХК, имеющих нарушения поверхностей качения и скольжения, центровки и балансировки, крепления узлов между собой, машин и агрегатов к фундаментам и присоединенным конструкциям, а также режима функционирования, по параметрам абсолютной и относительной вибрации, тока, температуры.

9. Создано и внедрено более 100 СДМ и семь АСУ БЭР на 60-ти нефтехимических комплексах и производствах 9-ти предприятий страны, где они обеспечивают сберегающую эксплуатацию более 2500 машин 350 типов. Новизна, уровень и значимость полученных результатов подтверждены премией Правительства Российской Федерации.

Основные публикации по теме диссертации:

1. Костюков В.Н., Бойченко С.Н., Костюков А.В. Автоматизированные системы управления безопасной ресурсосберегающей эксплуатацией оборудования нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств (АСУ БЭР-КОМПАКС®)/Под ред. В.Н. Костюкова.-М.: Машиностроение, 1999.– 163 с.
2. Костюков В.Н. Безопасность и ресурсосберегающая эксплуатация оборудования – технология XXI века. – Омск, 1998. - 20 с.
3. Костюков В.Н. Обобщенная диагностическая модель виброакустического сигнала объектов периодического действия // Омский науч. вестн. - 1999. – Вып. 6. – С. 37-41.
4. Костюков В.Н. Вибромониторинг насосных агрегатов нефтеперерабатывающих производств // Омский науч. вестн. – 1999. – Вып. 8. – С. 55–59.
5. Костюков В.Н. Синтез спектральной матрицы вибрации машины и ее распознавание для целей диагностики // Омский науч. вестн.– 2000.– Вып. 12. – С. 71–77.
6. Костюков В.Н. Синтез инвариантных диагностических признаков и моделей состояния агрегатов для целей диагностики // Омский науч. вестн. – 2000. – Вып. 12. – С. 77–81.
7. Костюков В.Н. Адаптивный метод виброакустической диагностики // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП-2000): Труды V междунар. конф. – Новосибирск, 2000. - Т. 6. – С. 142-147.
8. Костюков В.Н. Ранговые системы самообучающейся диагностики. // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП-2000): Труды V междунар. конф. – Новосибирск, 2000. – Т. 6.– С. 148-153.
9. Костюков В.Н. Опыт внедрения систем стационарного вибромониторинга и диагностики в АООТ "Омский НПЗ" // Энергодиагностика: Труды первой междунар. конф.-М., 1995.-Т. 2.-С. 104.
10. Костюков В.Н. Мониторинг оборудования нефтехимических производств // Неразрушающий контроль и диагностика: Тез. докл. XV Росс. науч.-техн. конф. - М., 1999. - Т. 1. - С. 253.
11. Виброизмерительные преобразователи промышленного применения / Донсков В.И., Иванов А.А., Костюков В.Н. и др. // Зарубежная радиоэлектроника. – 1996. - № 9. - С. 65-67.
12. Костюков А.В., Бойченко С.Н., Костюков В.Н. Диагностика насосно-компрессорных агрегатов путем мониторинга трендов вибропараметров

// Диагностика оборудования и трубопроводов: Труды XVII междунар. тематич. сем. РАО «Газпром».- Одесса, 1997. - С. 187-194.
13. Костюков В.Н., Донсков В.И., Тишина Т.Г. Система компьютерного мониторинга для предупреждения аварий и контроля технического состояния "КОМПАКС" // Зарубежная радиоэлектроника. – 1996. - № 9. - С. 68-69.
14. Костюков В.Н., Науменко А.П. Мониторинг состояния поршневых компрессоров // Потребители-производители компрессоров и компрессорного оборудования-1997: Труды третьего междунар. симпоз. - СПб., 1997.- С. 254-256.
15. Мониторинг и диагностика центробежных компрессоров / В.Н. Костюков, В.А. Стариков, Е.В. Тарасов и др. // Потребители-производители компрессоров и компрессорного оборудования-2000: Труды шестого междунар. симпоз. - СПб., 2000. - С. 174 - 177.
16. Руководящий документ. Центробежные электроприводные насосные и компрессорные агрегаты, оснащенные системами компьютерного мониторинга для предупреждения аварий и контроля технического состояния КОМПАКС: Эксплуатационные нормы вибрации / Костюков В.Н., Бойченко С.Н., Тарасов Е.В.– М., 1994.- 7 с.
17. А.с. № 783621 СССР, G01M15/00. Устройство для диагностики циклических механизмов / В.Н. Костюков, С.А. Морозов, Г.Я. Зименс // Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки. – 1980. - № 44.
18. А.с. № 868408 СССР, G01M13/02, G01H1/00. Способ диагностики механизмов / В.Н. Костюков, С.А. Морозов, С.Г. Трушников, Г.А. Гетманская //Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки.-1981.- № 44.
19. Пат. 1280961 РФ, МКИ F04B51/00, G01M13/02. Способ виброакустической диагностики машин периодического действия и устройство для его осуществления / В.Н. Костюков //Открытия. Изобретения. - 1986.- № 48.
20. Пат. 1343259 РФ, МКИ G01M7/00. Устройство для виброакустической диагностики механизмов периодического действия / В.Н. Костюков // Открытия. Изобретения. - 1987.- № 37.
21. Пат. 1379664 РФ, МКИ G01M7/00. Устройство для вибрационной диагностики механизмов периодического действия / В.Н. Костюков // Открытия. Изобретения. - 1988.- № 9.
22. Пат. 1467412 РФ, МКИ G01M7/00. Устройство для вибрационной диагностики механизмов периодического действия / В.Н. Костюков // Открытия. Изобретения. - 1989.- № 11.
23. Пат. 1519350 РФ, МКИ G01M15/00. Способ диагностики и прогнозирования технического состояния машин / В.Н. Костюков // Открытия. Изобретения. - 1989.- № 40.
24. Пат. 1647323 РФ, МКИ G01M7/00. Устройство для диагностики машин / В.Н. Костюков // Открытия. Изобретения. - 1991.- № 17.
25. Пат. 1739245 РФ, МКИ G01M15/00. Устройство для диагностики машин / В.Н. Костюков // Изобретения. - 1992.- № 21.

26. Свидетельство на полезную модель 1537 РФ, МКИ G01M15/00. Система для диагностики машин по вибрации их корпуса / В.Н. Костюков //Полезные модели. Промышленные образцы. - 1996 - № 1.
27. Пат. 2068553 РФ, МКИ G01M15/00, F04B51/00. Способ оценки технического состояния центробежного насосного агрегата по вибрации корпуса / В.Н. Костюков, С.Н. Бойченко, А.В. Костюков и др. // Изобретения. - 1996.- № 30.
28. Пат. 2103668 РФ, МКИ G01M15/00. Способ диагностики и прогнозирования технического состояния машин по вибрации корпуса /В.Н. Костюков, С.Н. Бойченко, А.В. Костюков//Изобретения.-1998.-№ 3.
29. Пат. 2149374 РФ, МКИ G01M13/04. Способ установки вибропреобразователя / В.Н. Костюков // Изобретения. Полезные модели.- 2000.- № 14.
30. Принципы построения измерительно-диагностических систем машин и оборудования / В.Н. Костюков, С.Н. Бойченко, А.В. Костюков и др. //Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–96): Труды 3-й междунар. науч.-тех. конф. Новосибирск, 1996.-Т. 5.–С. 81–86.
31. Эффективность внедрения стационарных систем вибродиагностики "КОМПАКС" на Омском НПЗ / Е.А. Малов, И.Б. Бронфин, В.Н. Костюков и др. // Безопасность труда в промышленности.– 1997.- № 1.– С. 9 – 15.
32. Безаварийность производства – путь к повышению рентабельности. Внедрение систем мониторинга КОМПАКС® / А.А. Шаталов, Ф.И. Сердюк, В.Н. Костюков и др. // Химия и технология топлив и масел.- 2000.- № 3.- С.9-13.
33. Embedding Wide-scale Experience of Vibrodiagnostics Stationary systems COMPACS / E.A. Malov, I.B. Bronfin, V.N. Kostyukov and oth. // Chemistry and Technology of Fuels and Oils. (USA). - 1997.- № 1. - P. 10-13.
34. Kostjukov V.N. Вибродиагностика и мониторинг машинных агрегатов непрерывных производств // DYNAMICS OF MACHINE AGGREGATES: Proceedings of the 5th International Conference, June 27-29, Gabčikovo, Slovak Republic, 2000.– C. 95–100.
35. Kostjukov V.N. The etalonless method of vibroacoustic diagnostics. // PROCEEDINGS APEIE-2000: 5th Innternational conference on actual problems of electronic instrument engineering. – Novosibirsk, 2000. - V.1, Selected Papers on English/ (USA): IEEE Catalog # 00EX833. – P. 210-214.
36. Kostjukov V.N. Adaptive systems of diagnostics of machines. // PROCEEDINGS APEIE-2000: 5th Innternational conference on actual problems of electronic instrument engineering. – Novosibirsk, 2000. - V.1, Selected Papers on English / (USA): IEEE Catalog # 00EX833.– P. 18-24.
37. Fail-safety of Production – the Way to increase Cost-effectiveness. Introduction of Permanent Monitoring Systems Compacs / A.A. Shatalov, F.I. Serdyuc, V.N. Kostyukov and oth. // Chemistry and Technology of Fuels and Oils. (USA). – 2000. - № 3. - P. 9-13.