

На правах рукописи

КИТАБОВ Андрей Николаевич

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ
ПОГРУЖНОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ
НА ОСНОВЕ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРАВИЛ
ВЫВОДА ПО ПРЕЦЕДЕНТАМ**

Специальность:

**05.13.01 – Системный анализ, управление
и обработка информации (в промышленности)**

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Уфа – 2013

Работа выполнена на кафедре электроники и биомедицинских технологий ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет»

Научный руководитель

д-р техн. наук, проф.
Ефанов Владимир Николаевич

Официальные оппоненты

д-р техн. наук, проф.
Мунасыпов Рустэм Анварович,
проф. кафедры технической кибернетики
ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный
авиационный технический университет»

канд. техн. наук, ст. науч. сотр.
Служаев Владимир Николаевич,
начальник отдела научно-технической
информации ОАО НПФ «Геофизика»

Ведущая организация

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный
нефтяной технический университет»

Защита диссертации состоится 4 декабря 2013 г. в 10 часов
на заседании диссертационного совета Д-212.288.03
при Уфимском государственном авиационном техническом университете
по адресу: 450000, г. Уфа-центр, ул. К. Маркса, д. 12

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета

Автореферат разослан « 1 » ноября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д-р техн. наук, проф.



В. В. Миронов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. На современном этапе развития нефтедобывающей отрасли лидирующие позиции по объему добытой нефти занимают скважины, оборудованные установками электроцентробежных насосов (УЭЦН). На их долю приходится от 50 до 60% извлекаемого сырья. При этом практика эксплуатации погружного электрооборудования показывает, что повышение срока службы, надежности и межремонтного периода за счет своевременной диагностики, оценки и прогнозирования технического состояния УЭЦН дает значительно больший экономический эффект, чем улучшение других технико-экономических показателей. Кроме того, устранение предпосылок к внезапным отказам оборудования в скважине позволяет избежать дополнительных затрат на аварийное извлечение, а также сократить материальные и временные издержки из-за остановки работы скважины. Все это предопределяет повышенный интерес к системам и методам диагностики, позволяющим оценить техническое состояние погружного электрооборудования на всех этапах его жизненного цикла.

Диагностика погружного электрооборудования является сложным процессом, который характеризуется необходимостью принятия решения в условиях неопределенности и недостаточной информации об объекте исследования, поскольку из-за малого зазора между эксплуатационной колонной и работающими агрегатами невозможно разместить достаточное количество датчиков. В связи с этим предпочтение отдается методам вибродиагностики, поскольку уровень вибрации является наиболее информативным параметром, позволяющим судить о характере дефекта и степени его развития, а также локализовать место возникновения дефекта до того, как он начинает приобретать разрушительный характер. Поскольку процессы, протекающие в погружном электрооборудовании, носят существенно нестационарный характер, для обработки сигналов вибрации приходится использовать методы, способные анализировать их как в частотной, так и во временной области. К числу таких методов относится вейвлет-преобразование. Однако результатами такого преобразования являются многомерные зависимости со сложной топологией, что требует разработки специальной методики интеллектуального анализа с целью извлечения необходимой диагностической информации.

Еще одна проблема диагностики погружного электрооборудования связана с необходимостью принимать решения о наличии или отсутствии тренда параметров оборудования на различных стадиях развития неисправности. При этом результаты диагностики будут корректными лишь в том случае, если будет установлена закономерность изменения параметров, регистрируемых при эксплуатации, на фоне случайных помех или закономерного дрейфа, обусловленного нестационарным характером процессов, протекающих в погружном оборудовании. В этих условиях для постановки правильного диагноза необходимо использовать накопленный опыт, знания и индивидуальные представления специалистов о складывающейся ситуации. Все это требует разработки специальной процедуры принятия решения, использующей знания о предыдущих ситуациях и случаях, направленной на структуризацию исходной информации, позволяющей своевременно выявить зарождающиеся дефекты и оперативно их идентифицировать.

Отмеченные обстоятельства обуславливают актуальность сформулированной темы диссертационной работы, направленной на разработку интеллектуаль-

ной системы диагностики погружного электрооборудования на основе вейвлет-преобразования с использованием правил вывода по прецедентам.

Степень разработанности темы. Анализу вибрационных процессов в электрооборудовании посвящены работы С. П. Алексеева, Н. В. Астахова, А. В. Баркова, А. С. Гольдина, М. М. Исаковича, В. Я. Кучера, Х. Х. Сабанчиева, А. Р. Ширмана В этих работах предложены математические модели вибрационных процессов в электрооборудовании, рассматриваются диагностические признаки различных дефектов на основе спектрального анализа измеренной вибрации. При этом можно утверждать, что большинство работ по диагностике электрооборудования посвящены спектральному анализу вибрации и в гораздо меньшей степени освещают вопросы применения вейвлет-преобразования для анализа сигналов вибрации при формировании диагностических признаков.

В области вейвлет-анализа известны работы Н. М. Астафьевой, И. Ф. Бабичевой, Н. А. Борисенко, А. В. Волошко, С. В. Дворникова, И. Л. Дремина, О. В. Иванова, В. А. Нечитайло, А. Л. Жизняка, И. Р. Кузеева, А. А. Любушина, Г. Ф. Малыхиной, В. Е. Махова, Л. В. Новикова, Д. А. Слесарева, К. Ф. Тагировой, С. Н. Тица, А. В. Тютякина, С. В. Широкова, которые освещают основные преимущества и недостатки вейвлет-преобразования, показывают возможность применения данного типа преобразования в различных предметных областях. Вместе с тем, указанные работы в меньшей степени затрагивают вопросы исследования вибрационных процессов для формирования диагностических признаков различного рода оборудования.

Известные работы в области применения правил вывода по прецедентам авторов: П. Р. Варшавского, А. П. Еремеева, Л. Е. Карпова, В. М. Курейчика, И. Е. Куриленко, Л. Р. Черняховской, Н. И. Федоровой, В. Ф. Шуршева, В. Н. Юдина, А. Aamodt, A. N. Gorban, B. Kegl, F. Marir, E. Plaza, I. D. Watson, D. Wunsch, A.Y. Zinovyev - освещают процессы синтеза указанных правил, особенности построения классов прецедентов и ядер эквивалентности в различных областях, а также довольно широкий круг вопросов их практического применения для решения конкретных задач. Однако специфика вопросов разработки интеллектуальных алгоритмов поддержки принятия решений на основе правил вывода по прецедентам применительно к задаче диагностики погружного электрооборудования на основе вейвлет-анализа требует специального исследования.

Целью работы является повышение эффективности системы диагностики погружного электрооборудования за счет интеллектуальной обработки сигналов вибрации с использованием аппарата непрерывного вейвлет-преобразования и правил вывода по прецедентам.

Задачи исследования. Для достижения указанной цели были сформулированы и решены следующие задачи:

1. Разработка метода диагностики погружного электрооборудования, основанного на аппарате непрерывного вейвлет-преобразования сигналов вибродатчиков, с использованием интеллектуального анализа топологии скейлограмм.
2. Разработка алгоритма принятия решений в задаче диагностики погружного электрооборудования, основанного на использовании правил вывода по прецедентам.
3. Разработка методики количественной оценки степени развития дефектов на основе аналитической зависимости результатов вейвлет-преобразования от характеристик сигналов вибрации.

4. Разработка системных моделей, структурных схем и аппаратных решений интеллектуальной системы диагностики погружного электрооборудования на основе распределенных средств измерения с использованием правил вывода по прецедентам.

5. Оценка эффективности интеллектуальной системы диагностики погружного электрооборудования с использованием разработанных программных продуктов, реализующих предложенные алгоритмы и методики.

Методология и методы исследования. Поставленные в диссертационной работе задачи решались с использованием методов системного анализа, методологии SADT, функционального анализа, теории идентификации, теории принятия решений, теории информационных систем и обработки данных, теории колебаний, теории непрерывного вейвлет-преобразования.

Объектом исследования являются системы диагностики погружного электрооборудования.

Предмет исследования: методики диагностики, оценки и прогнозирования технического состояния погружного электрооборудования для повышения их эффективности за счет интеллектуализации процедуры обработки сигналов вибрации с использованием аппарата непрерывного вейвлет-преобразования и правил вывода по прецедентам.

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод диагностики погружного электрооборудования, основанный на использовании аппарата непрерывного вейвлет-преобразования сигналов вибродатчиков, позволяющий проводить идентификацию дефектов за счет интеллектуального анализа топологии скейлограмм.

2. Алгоритм принятия решений в задаче диагностики погружного электрооборудования, основанный на использовании правил вывода по прецедентам, позволяющий выявлять тренд параметров оборудования на различных стадиях развития неисправностей.

3. Методика количественной оценки степени развития дефектов на основе аналитической зависимости результатов вейвлет-преобразования от характеристик сигналов вибрации, позволяющая оптимизировать стратегию управления техническим состоянием погружного электрооборудования.

4. Системные модели, структурные схемы и аппаратная реализация интеллектуальной системы диагностики погружного электрооборудования на основе распределенных средств измерения с использованием правил вывода по прецедентам, позволяющей идентифицировать вид дефекта и локализовать его местоположение в условиях накопления неисправностей.

5. Результаты оценки эффективности интеллектуальной системы диагностики погружного электрооборудования (патент на изобретение № 2457456 от 27.07.2012 г.) с использованием программных продуктов «Обработка и передача данных многоканальной системы вибродиагностики» и «Интеллектуальная система диагностики погружного электрооборудования».

Научная новизна:

1. Метод диагностики погружного электрооборудования, основанный на использовании аппарата непрерывного вейвлет-преобразования сигналов вибродатчиков, отличается тем, что в качестве диагностических признаков дефектов

при интеллектуальном анализе топологии скейлограмм вибросигналов используется количество локальных максимумов и соответствующие им значения масштабов и сдвигов.

2. Научная новизна алгоритма принятия решений в задаче диагностики погружного электрооборудования заключается в предложенном способе описания прецедентов, принципах формирования ядер классов эквивалентности и правил распознавания, которые учитывают не только количество локальных максимумов анализируемых скейлограмм, но и их расположение по оси масштаба, что отражает индивидуальные особенности проявления различных дефектов.

3. Методика количественной оценки степени развития дефектов на основе аналитической зависимости результатов вейвлет-преобразования от характеристик сигналов вибрации отличается тем, что за счет использования преобразования Карунена-Лоэва трехмерные множества исходных данных удается аппроксимировать линейными многообразиями меньшей размерности.

4. Отличие системных моделей, структурных схем и аппаратной реализации интеллектуальной системы диагностики погружного электрооборудования заключается в использовании распределенных в пространстве средств измерения, что позволяет проводить испытания оборудования во время работы в скважине и измерять параметры контроля по всей длине оборудования. Новизна полученных при этом технических решений подтверждается патентом на изобретение № 2457456 «Система диагностики погружных электродвигателей».

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Метод диагностики погружного электрооборудования на основе непрерывного вейвлет-преобразования позволяет расширить представления о способах идентификации дефектов погружного электрооборудования по виду скейлограмм вибросигналов за счет интеллектуального анализа слабоструктурированных данных о количестве локальных максимумов и об их расположении по осям масштаба и сдвига.

2. Применение алгоритма поддержки принятия решений в задаче диагностики погружного электрооборудования, основанного на использовании правил вывода по прецедентам, позволяет повысить достоверность выявления зарождающихся дефектов за счет использования знаний о предыдущих ситуациях и случаях, которые имели место при эксплуатации аналогичного оборудования.

3. Методика количественной оценки степени развития дефектов на основе аналитической зависимости результатов вейвлет-преобразования от характеристик сигналов вибрации позволяет задавать топологию скейлограмм в более лаконичной форме, выделяя наиболее существенные элементы и исключая избыточную информацию, обеспечивая в то же время восстановление информации, утраченной из-за помех в канале передачи данных, в результате чего появляется возможность для автоматического распознавания дефекта.

4. Интеллектуальная система диагностики погружного электрооборудования на основе распределенных средств измерения с использованием правил вывода по прецедентам обеспечивает повышение срока службы, надежности и межремонтного периода за счет своевременной диагностики, оценки и прогнозирования технического состояния указанного типа оборудования.

5. Программный комплекс для проведения диагностики погружного электрооборудования, включающий программы измерения, начальной обработки и передачи информации с погружной части системы диагностики (свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2009616340 «Обработка и передача данных многоканальной системы вибродиагностики»), позволяет исследовать сигнал вибрации и по результатам исследования давать заключение о виде дефекта, а также о степени его развития. Совместимость этого программного комплекса с широким классом микроконтроллеров общего применения, в частности фирмы Atmel, делает доступным его применение на многих предприятиях по разработке оборудования для нефтегазодобывающего комплекса.

Практическая значимость результатов подтверждается актом внедрения в производственную деятельность ООО НИИ ТС «ПИЛОТ» (г. Уфа).

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность полученных результатов и выводов обосновывается тем, что в теоретических построениях использовались законы и подходы, справедливость которых признана в области вибродиагностики погружного электрооборудования, а также известный и корректный математический аппарат непрерывного вейвлет-преобразования и преобразования Карунена-Лоэва; вводимые допущения мотивировались фактами, известными из практики эксплуатации погружного электрооборудования.

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: 3-я, 4-я, 5-я Всероссийская молодежная научная конференция «Мавлютовские чтения» (г. Уфа, 2009 г., 2010 г., 2011 г.); 16-я, 19-я международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (г. Москва, 2010 г., 2013 г.); 5-я международная научная конференция «Тинчуринские чтения» (г. Казань, 2010 г.); 3-я ежегодная Международная научно-практическая конференция «Перспективы развития информационных технологий» (г. Новосибирск, 2011 г.); 7-я, 8-я Всероссийская школа-семинар аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы в науке и технике» (г. Уфа, 2012 г., 2013 г.); 8-я международная конференция «Автоматизированные, информационные и управляющие системы 2013: от А до Я» (г. Москва, 2013 г.).

Связь исследований с научными программами. Исследования в данном направлении выполнялись в период с 2008 по 2011 гг. на кафедре Авиационного приборостроения и с 2011 по 2013 гг. на кафедре Электроники и биомедицинских технологий Уфимского государственного авиационного технического университета в рамках работ по исследованию систем и методов диагностики погружного электрооборудования при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (программа «У.М.Н.И.К.» на 2013-2015 гг.).

Публикации. Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 24 работах, включая 6 статей в научных изданиях из списка ВАК, 12 публикаций в трудах и материалах конференций, 4 статьи в межвузовских научных сборниках, 1 патент на изобретение и 1 свидетельство об официальной регистрации программы на ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Основное содержание работы изложено на 146 страницах машинописного текста, включая 53 рисунка, 17 таблиц. Список литературы содержит 184 наименования и занимает 20 страниц. Объем приложений составляет 12 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы, формулируются цель и задачи исследования, излагаются результаты, выносимые на защиту, их новизна и практическая значимость.

В первой главе рассмотрены основные аспекты задачи диагностики погружного электрооборудования с использованием методов обработки сигналов вибрации, позволяющих проводить одновременную локализацию по частоте и по времени. Особое место уделено системам поддержки принятия решений, основанным на правилах вывода по прецедентах и обеспечивающим решение задач диагностики с учетом накопленного опыта эксплуатации погружного оборудования.

Во второй главе предлагается метод диагностики погружного электрооборудования с использованием непрерывного вейвлет-преобразования сигнала вибрации, на основе которого строится скейлограмма - двумерное отображение исходного трехмерного графика. При анализе скейлограмм, соответствующих различным дефектам, было установлено, что каждый дефект обуславливает специфические особенности топологии скейлограмм. Так на рисунке 1 представлены скейлограммы, соответствующие двум характерным дефектам - дисбалансу (*а*) и расцентровке ротора (*б*).

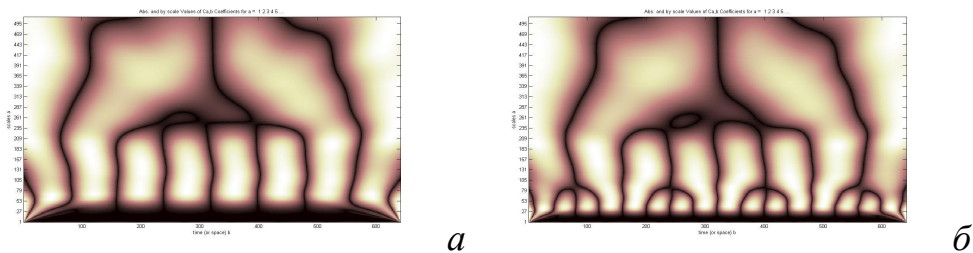


Рисунок 1 – Скейлограммы дефектов: *а* – дисбаланс, *б* – расцентровка

В качестве информативных параметров, позволяющих описать топологию скейлограмм, предложено использовать количество локальных максимумов, их координаты и значения вейвлет-преобразования в точках максимумов. Эти параметры позволяют выработать определенные правила идентификации дефектов и оценить степень их развития.

Вместе с тем, было установлено, что введенные информативные параметры относятся к слабо структурированным величинам, поскольку зависимости между ними имеют как количественный, так и качественный характер. В связи с этим для постановки правильного диагноза потребовалось разработать систему поддержки принятия решений, ориентированную на знания с правилами вывода на основе прецедентов. Разработка подобной системы включает следующие этапы: формирование набора существенных показателей (атрибутов) прецедентов; разбиение множества прецедентов на схожие группы – классы эквивалентности; формирование ядер классов эквивалентностей; разработка правил распознавания принадлежности исследуемого случая к соответствующему классу прецедентов.

В качестве атрибутов прецедентов используются следующие показатели:

$$W_j = \left\{ n_j; \left[(a_1; b_1), (a_2; b_2), \dots, (a_{n_j}; b_{n_j}) \right] \right\}, \quad j=1, 2, \dots, M, \quad (1)$$

здесь M – количество учитываемых дефектов, n_j - количество точек максимума на скейлограмме, соответствующей j -му дефекту,

$\Lambda_j = \left[(a_1; b_1), (a_2; b_2), \dots, (a_{n_j}; b_{n_j}) \right]$ – множество координат точек максимумов.

Предложенный набор атрибутов позволяет описать прецедент таким образом, что ему будет соответствовать только один вид дефекта из множества Ω . При этом качественный характер введенных атрибутов проявляется в том, что количество максимумов для каждого дефекта не является фиксированным числом, а будет меняться в некотором диапазоне значений $[n_{\min}^j, n_{\max}^j]$, кроме того, каждому значению временного сдвига может соответствовать несколько локальных максимумов на разных масштабах. Все это потребовало разработки специальной методики структуризации атрибутов, с помощью которой совокупность координат точек локальных максимумов скейлограммы вейвлет-преобразования разбивается на характерные непересекающиеся области масштабов, в рамках которых точки максимумов сортируются в порядке возрастания параметра временного сдвига.

Следующим шагом в структуризации атрибутов стало формирование ядер классов эквивалентностей, что позволило устранить неопределенность значений атрибутов прецедентов, принадлежащих одному классу эквивалентности. В качестве таких ядер выбрана совокупность центров точек максимумов:

$$C_i^a(j, n_j) = \frac{1}{N_i^j} \sum_{k=1}^{N_i^j} a_k^{(i)}(j, n_j), \quad C_i^b(j, n_j) = \frac{1}{N_i^j} \sum_{k=1}^{N_i^j} b_k^{(i)}(j, n_j), \quad (2)$$

где $C_i^a(j, n_j)$, $C_i^b(j, n_j)$ – центры класса j в точке i по параметру масштаба и сдвига соответственно; N_i^j – количество прецедентов в j -м классе, соответствующее заданному n_j количеству локальных максимумов; $a_k^{(i)}(j, n_j)$, $b_k^{(i)}(j, n_j)$ – соответственно, значения масштаба и сдвига i -го локального максимума из n_j k -го из прецедента в j -м классе.

Расчет ядер с помощью формул (2) справедлив для классов с единственным числом n_j локальных максимумов. Однако возможна ситуация, когда при одинаковом общем числе может наблюдаться различное их количество на разных масштабах. Чтобы формируемые ядра классов эквивалентности учитывали возможный разброс локальных максимумов на разных масштабах, в работе введена специальная матрица D_j :

$$D_j = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{11}^{p_j}, b_{11}^{p_j} \\ a_{12}^{p_j}, b_{12}^{p_j} \\ \dots \\ a_{N_j 1}^{p_j}, b_{N_j 1}^{p_j} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} a_{12}^{p_j}, b_{12}^{p_j} \\ a_{22}^{p_j}, b_{22}^{p_j} \\ \dots \\ a_{N_j 2}^{p_j}, b_{N_j 2}^{p_j} \end{bmatrix} & \dots & \begin{bmatrix} a_{1p_j}^{p_j}, b_{1p_j}^{p_j} \\ a_{2p_j}^{p_j}, b_{2p_j}^{p_j} \\ \dots \\ a_{N_j p_j}^{p_j}, b_{N_j p_j}^{p_j} \end{bmatrix} \end{bmatrix}, \quad j=1, 2, \dots, M; \quad (3)$$

здесь $\dim D_j = N_j \times p_j$, где N_j – количество прецедентов в j -м классе, p_j – максимальное число локальных максимумов среди прецедентов данного класса.

Элементами этой матрицы являются координаты локальных максимумов соответствующих прецедентов. Заполнение матрицы производится в следующем порядке. Первые строки матрицы заполняются координатами локальных максимумов для прецедентов, у которых количество максимумов равно p_j . Оставшиеся строки матрицы заполняются координатами локальных максимумов для преце-

дентов, у которых количество максимумов меньше p_j . При этом учитывается, какие позиции в строке будут заполнены координатами соответствующих максимумов, а какие останутся пустыми. Данная процедура осуществляется следующим образом: координаты $[a_{rq}^n, b_{rq}^n]$ локального максимума q для прецедента r помещаются в строку с номером r и столбец с номером l^* , для которого выполняется условие минимального отклонения временного сдвига применительно ко всем прецедентам с числом максимумов p_j .

На основе построенной матрицы формируется вектор $N_j = [N_1^j, N_2^j, \dots, N_{p_j}^j]$, где N_i^j – количество ненулевых значений в i -м столбце матрицы D_j , который позволяет рассчитать атрибуты ядра Ω_j^* в общем случае:

$$W_j^* = \left\{ p_j; \left[(a_1^*; b_1^*), (a_2^*; b_2^*), \dots, (a_{p_j}^*; b_{p_j}^*) \right] \right\}, \quad a_i^* = \frac{1}{N_i^j} \sum_{l=1}^{m_j} a_{li}^{p_j}; \quad b_i^* = \frac{1}{N_i^j} \sum_{l=1}^{m_j} b_{li}^{p_j} \quad (4)$$

Задача идентификации дефектов предусматривает оценку принадлежности исследуемого случая к тому или иному классу прецедентов (распознавание класса). С этой целью в работе сформулированы правила распознавания, учитывающие существующую неопределенность в количестве локальных максимумов скейлограмм вибросигналов. В связи с этим для анализируемого случая в первую очередь определяется перечень классов, к которым может относиться данный случай. Поскольку число n_k локальных максимумов анализируемого случая может отличаться от числа p_j в сопоставляемом с ним ядре класса эквивалентности Ω_j^* , то необходимо провести корректное сокращение указанных ядер, выделив в их составе n_k локальных максимумов, наиболее близких к анализируемому случаю. Для этого в работе предлагается оценивать расстояния между точками максимумов исследуемого случая и центрами ядра класса:

$$\rho_l^k = \min_i |b_l^k - b_i^*|, \quad i = 1, 2, \dots, p_j; l = 1, 2, \dots, n_k. \quad (5)$$

Индексы $i^*(l) = \arg \rho_l^k$ ($l = 1, 2, \dots, n_k$), для которых выполняются условия (5), соответствуют тем центрам ядра класса, которые должны быть выделены для дальнейшей процедуры распознавания. В результате вектор атрибутов ядра класса эквивалентности Ω_j^{**} для оценки анализируемого случая примет вид:

$$W_j^{**} = \left\{ n_k; \left[(a_{i^*(1)}^*; b_{i^*(1)}^*), (a_{i^*(2)}^*; b_{i^*(2)}^*), \dots, (a_{i^*(n_k)}^*; b_{i^*(n_k)}^*) \right] \right\}. \quad (6)$$

Следующим этапом в формировании правил распознавания является комплексная оценка расстояния между исследуемым случаем и сформированным ядром класса эквивалентности $\rho(S_k, W_j^{**})$. Поскольку расстояния по масштабу и по временному сдвигу не являются равнозначными с точки зрения оценки близости исследуемого случая и сформированного ядра класса эквивалентности, то в работе предлагается комплексный критерий, учитывающий относительную важность этих показателей:

$$P^* = \alpha_1 \rho(a) + \alpha_2 \rho(b), \quad \alpha_1 + \alpha_2 = 1, \quad (7)$$

где $\rho(a)$ – расстояние по масштабу, $\rho(b)$ – расстояние по временному сдвигу, α_1 , α_2 – весовые коэффициенты, которые назначаются с помощью экспертных оценок.

При выборе метрики в пространстве атрибутов для определения соответствующих расстояний $\rho(a)$ и $\rho(b)$ в работе был проведен сравнительный анализ качественных, количественных и смешанных метрик. Было установлено, что качественные метрики, такие как метрики Хемминга, Роджерса–Тонимото, оценивают меру близости по количеству полностью совпадающих элементов. В силу этого в нашей задаче такие метрики не могут быть использованы. Что касается количественных метрик (Евклидова, Канберра, Манхэттенская, Минковского и т.д.), то комплексный критерий (7) оказался инвариантным к выбору метрики.

Для автоматического распознавания дефекта необходимо установить непосредственную связь между характеристиками скейлограммы и показателями, которые позволяют количественно оценить степень развития дефекта погружного электрооборудования. В качестве такого показателя в работе предлагается использовать среднеквадратичное значение (СКЗ) виброскорости, критические значения которой используется в целом ряде действующих ГОСТов и Технических регламентов для оценки работоспособности электродвигателей самого различного назначения. Для аналитического описания указанной зависимости между значениями вейвлет-преобразования (W) и СКЗ виброскорости ($V_{скз}$)

$$V_{скз} = f(W), \quad (8)$$

предлагается использовать метод анализа главных компонент, суть которого заключается в аппроксимации множества исходных данных линейными многообразиями меньшей размерности. В качестве исходных данных использовалось конечное множество векторов $W_1(b_i; a_i), W_2(b_i; a_i), \dots, W_m(b_i; a_i) \in \mathcal{R}^n$, описывающих локальные максимумы вейвлет-преобразования с координатами $(b_i; a_i), i = \overline{1, n}$, для m СКЗ виброскорости. Механизм количественной оценки степени развития дефектов на основе аналитической зависимости результатов вейвлет-преобразования от характеристик сигналов вибрации предусматривает использование преобразование Карунена-Лоэва, которое позволяет задавать топологию трехмерных сцен с помощью множества линейных отрезков фиксированной длины, выделяя наиболее существенные элементы и исключая избыточную информацию, обеспечивая в то же время восстановление информации, утерянной из-за помех в канале передачи данных. Формирование искомым линейных многообразий производится в следующем порядке.

Среди всех линейных многообразий в \mathcal{R}^n находится такое $L_1 = \{\alpha_0 + \alpha_1 V_{скз} | V_{скз} \in \mathcal{R}\} \subset \mathcal{R}^n$, где $\{\alpha_0, \alpha_1\} \subset \mathcal{R}^n$ – ортонормированные вектора, что сумма квадратов уклонений $W_l(b_i; a_i)$ от L_1 минимальна:

$$\sum_{l=1}^m dist^2(W_l(b_i; a_i), L_1) \rightarrow \min, \quad (9)$$

где $dist^2(W_l(b_i; a_i), L_1) = \|W_l(b_i; a_i) - \alpha_0 - \alpha_1 \langle \alpha_1, W_l(b_i; a_i) - \alpha_0 \rangle\|^2$ – Евклидово расстояние от точки до линейного многообразия; при этом $\|\cdot\|$ – Евклидова норма,

$\langle \alpha_1, W_l(b_i; a_i) \rangle$ – евклидово скалярное произведение, или в координатной форме:

$$dist^2(W_l(b_i; a_i), L_1) = \sum_{i=1}^n \left(W_{li}(b_i; a_i) - \alpha_{0i} - \alpha_{1i} \sum_{q=1}^n \alpha_{1q} (W_{lq}(b_i; a_i) - \alpha_{0q}) \right)^2.$$

Решение задачи аппроксимации для $k = 0, 1$ включает построение вложенных линейных многообразий $L_0 \subset L_1$. Эти линейные многообразия определяются ортонормированным набором векторов $\{\alpha_0, \alpha_1\}$. Вектор α_0 ищется, как решение задачи минимизации для L_0 :

$$\alpha_0 = \arg \min_{\alpha_0 \in \mathbb{R}^n} \left(\sum_{l=1}^m dist^2(W_l(b_i; a_i), L_0) \right), \quad (10)$$

или, что то же самое:

$$\alpha_0 = \arg \min_{\alpha_0 \in \mathbb{R}^n} \left(\sum_{l=1}^m \|W_l(b_i; a_i) - \alpha_0\|^2 \right). \quad (11)$$

В результате оказывается, что α_0 является выборочным средним исходных векторов $W_l(b_i; a_i)$, $l = \overline{1, m}$

$$\alpha_0 = \frac{1}{m} \sum_{l=1}^m W_l(b_i; a_i) = W_{cp}(b_i; a_i). \quad (12)$$

Чтобы найти ортонормированный вектор α_1 , необходимо централизовать вектор исходных данных $W_l^*(b_i; a_i) = W_l(b_i; a_i) - W_{cp}(b_i; a_i)$, в результате чего получаем: $\sum_{l=1}^m W_l^*(b_i; a_i) = 0$. Далее, решается следующая задача оптимизации:

$$\alpha_1 = \arg \min_{\|\alpha_0\|=1} \left(\sum_{l=1}^m \|W_l^*(b_i; a_i) - \alpha_1 \langle \alpha_1, W_l^*(b_i; a_i) \rangle\|^2 \right). \quad (13)$$

С использованием описанной методики в работе были найдены аналитические зависимости значений вейвлет-преобразования от СКЗ виброскорости для вибросигналов с частотами 50 Гц, 100 Гц, 150 Гц, 200 Гц и 25 Гц:

1. $W = 15,439 \cdot V_{СКЗ} + 0,0294$; 2. $W = 10,75 \cdot V_{СКЗ} - 0,022$; 3. $W = 8,764 \cdot V_{СКЗ} + 0,001454$;
4. $W = 7,5817 \cdot V_{СКЗ} - 0,001536$; 5. $W = 21,993 \cdot V_{СКЗ} - 0,0581$.

Найденные соотношения позволили решить обратную задачу - найти зависимость СКЗ виброскорости от значений вейвлет-преобразования:

1. $V_{СКЗ} = 0,06477 \cdot W - 19 \cdot 10^{-4}$; 2. $V_{СКЗ} = 0,093 \cdot W + 2 \cdot 10^{-3}$; 3. $V_{СКЗ} = 0,1141 \cdot W - 16,6 \cdot 10^{-5}$;
4. $V_{СКЗ} = 0,1319 \cdot W + 2 \cdot 10^{-4}$; 5. $V_{СКЗ} = 0,04547 \cdot W + 26 \cdot 10^{-4}$.

Полученные зависимости доказывают практическую возможность количественной оценки степени развития дефектов по характеристикам скейлограммы вибросигналов.

В третьей главе разработаны системные модели и структурные схемы интеллектуальной системы диагностики погружного электрооборудования на основе распределенных средств измерения с использованием правил вывода по пре-

цедентам. Проведенный с помощью IDEF0-технологии анализ предметной области позволил сформировать требования к функциональному облику и информационному интерфейсу системы диагностики.

Функциональная модель данной системы разрабатывалась с использованием стандартных средств SADT-методологии. В результате была получена 5-ти уровневая модель, с помощью которой разработана структурная схема измерительной части системы, представленная на рисунке 2. В основе этой схемы лежит способ организации распределенных средств измерения, позволяющий измерять параметры контроля в нескольких точках оборудования с учетом расположения устройств измерения в вертикальной скважине. В рамках указанного способа реализуется концепция построения системы диагностики, предусматривающая разделение функций измерения и обработки данных между микропроцессорными средствами погружной и наземной частей, а также размещение датчиков совместно с микропроцессорной системой нижнего уровня непосредственно на поверхности корпуса испытываемого оборудования.

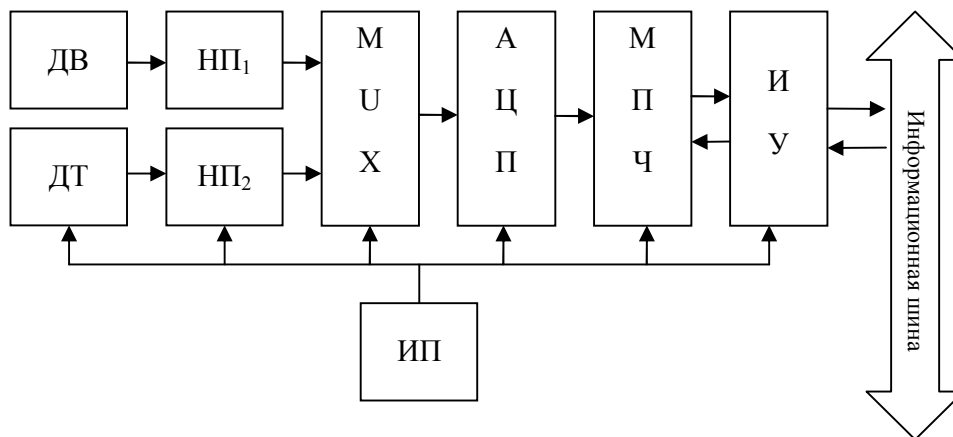


Рисунок 2 – Структурная схема устройства для измерения параметров контроля в заданной точке

Первичные преобразователи, которые крепятся на корпус оборудования, снабжены микроконтроллерами и элементами для организации канала связи. Таким образом, в состав каждого измерительного модуля (ИМ) параметров контроля, расположенного в заданной точке оборудования, входят следующие устройства: датчик температуры (ДТ); датчик вибрации (ДВ); нормирующие преобразователи для датчиков (НП); мультиплексор (МУХ); аналого-цифровой преобразователь (АЦП); микропроцессор или микроконтроллер (МПЧ); элементы и узлы для обеспечения работы канала связи (ИУ); источник питания (ИП).

Реализация концепции построения системы диагностики на основе распределенных средств измерения потребовала детальной проработки следующих вопросов: выбор канала связи между наземной и погружной частью системы; обоснование аппаратного состава наземной части системы диагностики; выбор первичных преобразователей и других элементов ИМ в соответствии с ограничениями на габаритные размеры с учетом величины зазора между оборудованием и скважиной; оптимизация структуры ИМ в целом.

Результаты проведенных исследований оформлены в виде патента на изобретение «Система диагностики погружных электродвигателей» № 2457456 от 27.07.2012 г.

В четвертой главе проводится исследование эффективности разработанной интеллектуальной системы диагностики погружного электрооборудования с использованием программных продуктов «Обработка и передача данных многоканальной системы вибродиагностики» и «Интеллектуальная система диагностики погружного электрооборудования».

Оценка проводилась применительно к варианту практической реализации интеллектуальной системы диагностики погружного электродвигателя ПЭД45-117ЛГВ5. Был обоснован выбор элементной базы для устройств диагностики в соответствии с требованиями, сформулированными в предыдущей главе. Погружная часть исследуемого варианта технической реализации системы диагностики включает определенное множество ИМ, количество которых определяется индивидуальной конструкцией оборудования и может достигать 32-х (максимальное число устройств подключаемых к шине по стандарту RS485). Каждый ИМ имеет в своем составе следующие функциональные узлы: акселерометр ADXL 103 (Analog device); датчик температуры TMP37 (Analog device); нормирующие преобразователи (фильтр нижних частот (ФНЧ) и усилитель напряжения (УН) на операционном усилителе OP284 (Analog device); микроконтроллер Mega 16 (Atmel); микросхема интерфейса MAX491 (Maxim); компенсационный стабилизатор; параметрический стабилизатор. Структурная схема ИМ, построенного на основе вышеперечисленных компонентов представлена на рисунке 3.

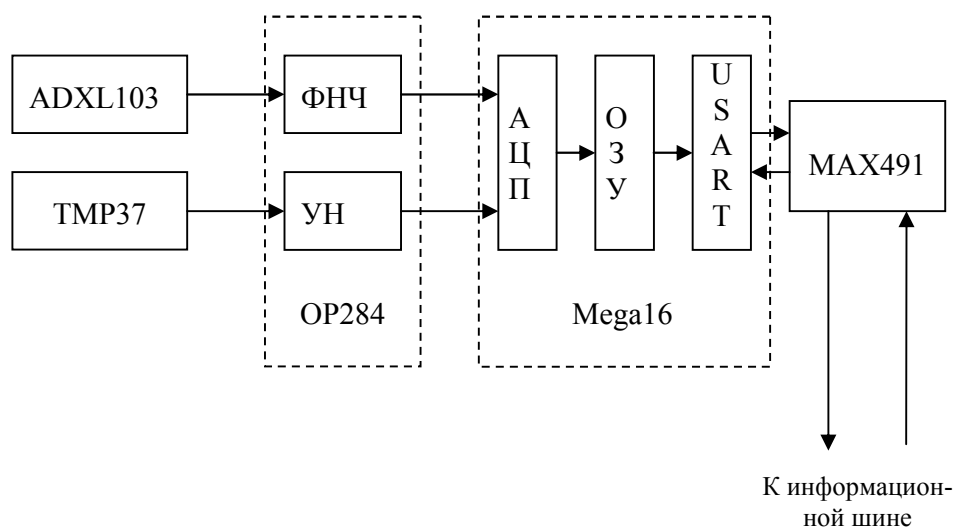


Рисунок 3 – Структурная схема измерительного модуля

Обработку измеренных параметров в соответствии с принятой концепцией разделения функций между микропроцессорными средствами погружной и наземной частями предложено выполнять с помощью компьютера. При этом наземная часть системы диагностики включает следующие функциональные узлы: устройство преобразования форматов (УПФ) данных; ПК или ноутбук; станцию управления с контроллером.

В свою очередь УПФ состоит из следующих компонентов: микросхема преобразования интерфейсов RS485-RS232 – MAX491; микросхема преобразования интерфейсов RS232-USB – FTDI232; элементы питания схемы (ИП). Структурная схема наземной части системы диагностики на основе вышеперечисленных компонентов представлена на рисунке 4.

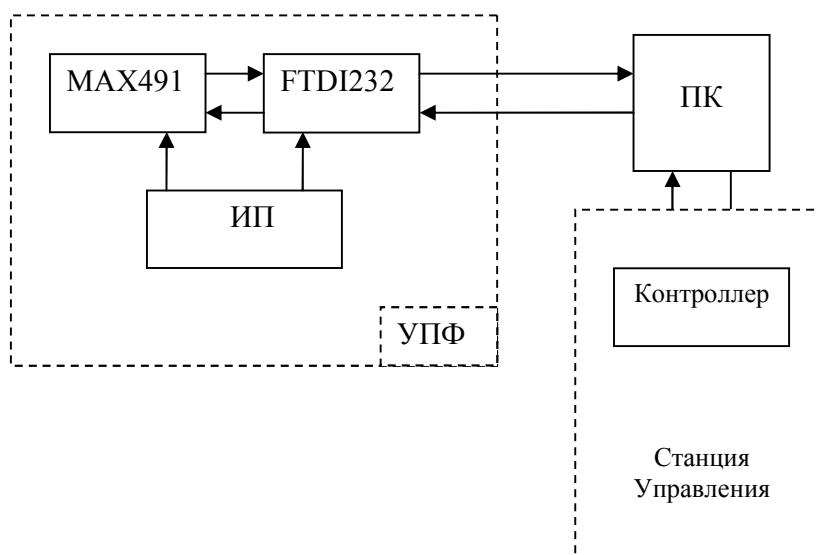


Рисунок 4 – Структурная схема наземной части системы диагностики

Отличительной особенностью приведенного варианта практической реализации интеллектуальной системы диагностики погружного электродвигателя является возможность модификации используемых схемных решений в соответствии с индивидуальными требованиями соответствующей нефтяной компании.

Для проведения опытных работ по экспериментальной проверке системы диагностики погружного оборудования при непосредственном участии автора диссертационного исследования был создан испытательный комплекс «Термовибротест». Испытания проводились применительно к варианту системы, включающей восемь ИМ, наземный блок и ПК. На рисунке 5 представлен внешний вид ИМ, закрепленного на корпусе оборудования.



Рисунок 5 – Внешний вид ИМ

Реализация предложенного в работе алгоритма поддержки принятия решений в задаче диагностики погружного электрооборудования и методики количественной оценки степени развития дефектов потребовала разработки программного комплекса, позволяющего автоматизировать процедуры, связанные с выполнением сложных математических и логических операций при вычислении вейвлет-преобразования сигнала вибрации, определении комплексной оценки расстояния между ядрами классов и исследуемым прецедентом и осуществлении

других действий, необходимых для поддержки принятия решений на основе правил вывода по прецедентам.

Разработанный программный комплекс «Интеллектуальная система диагностики погружного электрооборудования» включает три основных модуля: модуль вейвлет-преобразования, модуль поддержки принятия решений на основе прецедентов и модуль количественной оценки степени развития дефекта. Модуль вейвлет-преобразования реализован с использованием пакета MATLAB Wavelet Toolbox. Остальные два модуля были реализованы в среде C++ Builder 2010.

На рисунке 6 представлен сценарий диагностики погружного электродвигателя ПЭД45-117ЛГВ, выполненный с помощью разработанного программного комплекса. Согласно приведенным экранным формам интерфейса пользователя был диагностирован дефект типа «дисбаланс». При этом комплексное расстояние анализируемого случая до ядра соответствующего класса эквивалентности равно 4,69, что более чем в 4 раза больше относительно следующего ближайшего класса «расцентровка ротора». Также было определено СКЗ скорости вибрации, которое оказалось равным 2,54 мм/сек, что соответствует степени развития дефекта в 63,72 %.

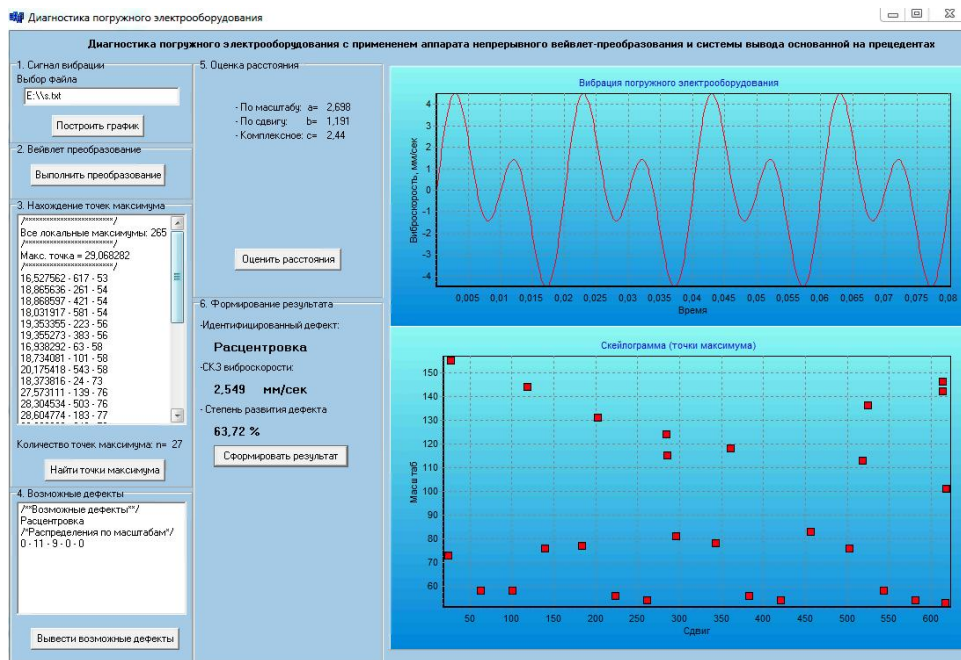


Рисунок 6 – Экранные формы интерфейса пользователя

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе сформулированы и решены задачи построения интеллектуальной системы диагностики на основе непрерывного вейвлет-преобразования, позволяющей повысить эффективность оценки технического состояния погружного электрооборудования за счет интеллектуальной обработки сигналов вибрации и использования правил вывода по прецедентам.

1. Предложен метод вибродиагностики погружного электрооборудования на основе непрерывного вейвлет-преобразования, который позволяет по виду скейлограмм, расположению точек локальных максимумов и значениям вейвлет-преобразования идентифицировать вид дефекта, а также определить степень его развития.

2. Разработан интеллектуальный алгоритм поддержки принятия решений в задачах диагностики погружного электрооборудования, основанный на правилах вывода по прецедентам, в рамках которого раскрыты основные этапы процедуры принятия решения с целью выявления тренда параметров диагностируемого оборудования.

3. Разработана методика количественной оценки степени развития дефектов погружного электрооборудования с использованием преобразования Карунена-Лоэва, в результате чего были получены аналитические зависимости между показателями вейвлет-преобразования и среднеквадратическими значениями виброскорости, которые используются в большинстве отраслевых стандартов в качестве критерия изношенности погружного электрооборудования.

4. Предложены системные модели, структурные схемы и аппаратная реализация интеллектуальной системы диагностики погружного электрооборудования на основе распределенных средств измерения, позволяющей идентифицировать вид дефекта и локализовать его местоположение.

5. Исследована эффективность разработанных алгоритмов и методик интеллектуальной диагностики погружного электрооборудования на примере оценки технического состояния погружного электродвигателя ПЭД45-117ЛГВ.

ПУБЛИКАЦИИ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых журналах из перечня ВАК

1. Информационно-измерительная система диагностики погружного электродвигателя / А. Н. Китабов, В. П. Токарев // Вестник УГАТУ. 2011. Т.15, № 1 (41). С. 153–164.

2. Повышение информативности измерений вибрации системой погружной телеметрии / А.В. Кудрявцев, И.Р. Енгальчев, А.Н. Китабов // Нефтегазовое дело: электронный научный журнал. 2011. №2. С. 4–13. URL: http://www.ogbus.ru/authors/KudryavtsevAV/KudryavtsevAV_1.pdf

3. Вибрационная диагностика погружного электрооборудования с применением аппарата непрерывного вейвлет-преобразования / В. Н. Ефанов, А. Н. Китабов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2013. № 6. С. 56–62.

4. Анализ метрик в задачах распознавания дефектов погружного электрооборудования / В. Н. Ефанов, А. Н. Китабов // Динамика сложных систем – XXI век. 2013. № 2. С. 94–98.

5. Система поддержки принятия решений в задачах диагностики погружного электрооборудования / В. Н. Ефанов, А. Н. Китабов // Контроль. Диагностика. 2013. № 8. С. 65–70.

6. Использование прецедентов в задаче выявления тренда параметров погружного электрооборудования / В. Н. Ефанов, А. Н. Китабов // Промышленные АСУ и контроллеры. 2013. № 9. С. 39–46.

В других изданиях

7. Система измерения вибрации и температуры погружного электродвигателя / А. Н. Китабов // Мавлютовские чтения: сб. тр. в 5 т. Уфа: УГАТУ, 2009. Т. 2. С. 106–108.

8. Возможности применения акселерометров для оценки технического состояния погружного оборудования / А. Н. Китабов // Мавлютовские чтения: сб. тр. в 5 т. Уфа: УГАТУ, 2009. Т. 2. С. 108–109.

9. Анализ современных систем диагностики погружных электродвигателей / А. Н. Китабов, В. П. Токарев // *Электромеханика, электромеханические комплексы и системы: межвуз. науч. сб.* Уфа: УГАТУ, 2010. С. 102–105.
10. Информационная система диагностики погружного оборудования / И. Р. Енгальчев, А. Н. Китабов // *Электромеханика, электромеханические комплексы и системы: межвуз. науч. сб.* Уфа: УГАТУ, 2010. С. 143–147.
11. Многоточечная система диагностики погружного электродвигателя / А. Н. Китабов, В. П. Токарев // *Электронные устройства и системы: межвуз. науч. сб.* Уфа: УГАТУ, 2010. С. 268–272.
12. Микропроцессорная система контроля погружного электродвигателя / А. Н. Китабов // *Тинчуринские чтения: матер. докл.* Казань: КГЭУ, 2010. Т. 1. С. 92–93.
13. Система диагностики погружного электродвигателя при стендовых испытаниях / А. Н. Китабов // *Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: тез. докл. в 3 т.* М.: Изд. дом МЭИ, 2010. Т. 1. С. 461–462.
14. Система погружной телеметрии для модернизации УЭЦН / А. В. Кудрявцев, И. Р. Енгальчев, А. Н. Китабов // *Казанская наука.* 2010. №10. С. 50–51.
15. Обнаружение неисправностей погружного электродвигателя по вибрационным параметрам / А. Н. Китабов // *Мавлютовские чтения: сб. тр. в 5 т.* Уфа: УГАТУ, 2010. Т. 2. С. 107–108.
16. Повышение точности измерений вибрации погружного электродвигателя / А. Н. Китабов // *Мавлютовские чтения: сб. тр. в 5 т.* Уфа: УГАТУ, 2011. Т. 2. С. 71–72.
17. Функциональная модель процесса диагностики погружного электродвигателя на основе IDEF0-технологии / А. Н. Китабов // *Мавлютовские чтения: сб. тр. в 5 т.* Уфа: УГАТУ, 2011. Т. 2. С. 73–74.
18. Высокоскоростная скважинная телеметрия / А. В. Кудрявцев, И. Р. Енгальчев, А. Н. Китабов, А. Р. Кашапов // *Перспективы развития информационных технологий: сб. матер. в 2 ч.* Новосибирск: Изд. НГТУ, 2011. Ч. 2. С. 20–24.
19. Метод предварительной обработки данных вибрации в погружной части системы телеметрии / А. В. Кудрявцев, И. Р. Енгальчев, А. Н. Китабов, А. Р. Кашапов // *Перспективы развития информационных технологий: сб. матер. в 2 ч.* Новосибирск: Изд. НГТУ, 2011. Ч. 1. С. 66–71.
20. Идентификация состояния сложных технических систем на основе диагностики источников вибрации / А. Н. Китабов // *Актуальные проблемы в науке и технике: сб. тр.* Уфа: УГАТУ, 2012. Т. 2. С. 179–182.
21. Применение вейвлет-преобразования в задачах идентификации дефектов погружного электродвигателя / А. Н. Китабов // *Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: тез. докл. в 4 т.* М.: Изд. дом МЭИ, 2013. Т. 2. С. 114.
22. Диагностика механических источников вибрации погружного электрооборудования с применением вейвлет-преобразования / А. Н. Китабов // *Актуальные проблемы в науке и технике: сб. тр.* Уфа: УГАТУ, 2013. Т. 2. С. 140–144.
23. Свид. о гос. рег. программы для ЭВМ № 2009616340. Обработка и передача данных многоканальной системы вибродиагностики / А. Н. Китабов, В. П. Токарев // *Зарег. 17.11.2009.* М.: Роспатент, 2009.
24. Патент на изобретение № 2457456 Система диагностики погружных электродвигателей / Р. И. Алимбеков, В. Г. Акшенцев, А. Н. Китабов, А. Р. Кашапов, А. С. Шулаков // *Опубл. 27.07.2012.* Бюл. № 21.

КИТАБОВ Андрей Николаевич

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ
ПОГРУЖНОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ
ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ПРАВИЛ ВЫВОДА ПО ПРЕЦЕДЕНТАМ

Специальность:

05.13.01 – Системный анализ, управление
и обработка информации (в промышленности)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано к печати 29.10.2013 г. Формат 60x84 1/16
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Times New Roman.
Усл. печ. л. 1,0. Уч. – изд. 1,0.
Тираж 100 экз. Заказ № 574

ФГБОУ ВПО Уфимский государственный авиационный
технический университет
Центр оперативной полиграфии УГАТУ
450000, Уфа-центр, ул.К. Маркса, 12