

На правах рукописи



Арсланов Амир Динарович

**РАЗРАБОТКА НОВЫХ МЕТОДОВ И ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКОГО
ОБЕСПЕЧЕНИЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ИЗМЕРЕНИЙ, ДИАГНОСТИКИ
СОСТОЯНИЯ УЗЛОВ И СРЕДСТВ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ
ПМР-АНАЛИЗАТОРА НЕФТИ**

2.2.8 Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий,
веществ и природной среды

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань – 2025

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», на кафедре «Приборостроение и мехатроника»

Научный руководитель: Козелков Олег Владимирович,
доктор технических наук, доцент, заведующий
кафедрой «Приборостроение и мехатроника»
ФГБОУ ВО «Казанский государственный
энергетический университет»

**Официальные
оппоненты:** **Вавилова Евгения Леонидовна,**
доктор физико-математических наук, ведущий
научный сотрудник лаборатории физики ферроиков
и функциональных материалов Казанского физико-
технического института имени Е. К. Завойского –
обособленного структурного подразделения ФГБУН
«Федеральный исследовательский центр «Казанский
научный центр РАН», г. Казань;

Иванов Дмитрий Сергеевич,
кандидат физико-математических наук, доцент
кафедры физики молекулярных систем ФГАОУ ВО
«Казанский (Приволжский) федеральный
университет», г. Казань

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Казанский национальный
исследовательский технический университет
им. А. Н. Туполева – КАИ», г. Казань

Защита состоится «26» сентября 2025 г. в 14 ч 00 мин. на заседании
диссертационного совета 24.2.310.01, созданного на базе ФГБОУ ВО
«Казанский государственный энергетический университет», по адресу: 420066,
г. Казань, ул. Красносельская, 51, ауд. Д-224; тел. (843)5194220.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью учреждения, просим направлять
по адресу: 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, КГЭУ, Ученому секретарю
диссертационного совета 24.2.310.01. С диссертацией можно ознакомиться в
научной библиотеке Казанского государственного энергетического
университета и на официальном сайте КГЭУ: <https://kgeu.ru/struktura-vuza/dissertatsionnye-sovety/dissertatsionnyy-sovet-24-2-310-01/soiskatel-arсланov-amir-dinarovich/>

Автореферат разослан « » 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, д.ф.-м.н.



Калимуллин Рустем Ирекович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности

Программа «Цифровая экономика Российской Федерации» ставит актуальные задачи по обеспечению многопараметрического экспресс-контроля параметров добываемой нефти и диагностике оборудования, предназначенного для управления нефтедобычей и нефтеподготовкой, на цифровых месторождениях нефти. Решение данных задач можно осуществить на базе программно-измерительного комплекса (ПИК), совмещающего в одном приборе возможности самодиагностики и измерения свойств нефти. Таковым может являться анализатор протонного (ядерного) магнитного резонанса (ПМР, ЯМР), работа которого основана на принципах квантовой радиофизики.

Метод ПМР является косвенным методом измерения физико-химических свойств (ФХС) нефтяных дисперсных систем (НДС). Уникальные возможности ПМР связаны с тем, что квантово-магнитные свойства ядер не зависят от состояния исследуемого образца: прозрачности, степени перемешанности, непротонных примесей и т.д. В то же время параметры релаксации протонов коррелируют со многими ФХС нефти. В данном методе исследуемые образцы в ответ на импульсную программу ЯМР дают релаксационные кривые амплитуд сигналов спин-эхо (СЭ) во времени, которые можно разложить на три составляющие, соответствующие трем протонным фазам вещества. Из этих данных можно получить времена спин-спиновой релаксации и населенности протонов по трем фазам вещества. Данные параметры вместе с амплитудами сигналов СЭ, в свою очередь, тесно связаны с основными ФХС нефти.

Отечественные и зарубежные ученые: Завойский Е.К., Чижик В.И., Волков В.Я., Вашман А.А., Пронин И.С., Калабин Г.А., Тагиров М.С., Скирда В.Д., Hansen W.W., Packard M., Meiboom S., Purcell E.M., Hahn E.L., Suryan G., - внесли огромный вклад в развитие теории и аппаратуры ЯМР. Однако, из-за отсутствия серийного выпуска отечественных ЯМР-анализаторов нефти, на российском рынке в основном используются зарубежные, либо самодельные варианты. В то же время за рубежом импульсный метод ЯМР уже стал основным для многих видов измерений.

К сожалению, программное и аппаратное обеспечение зарубежных производителей, в основном, недоступно для самостоятельной модернизации и модификации, что сдерживает оснащение цифровых месторождений автоматизированными программно-измерительными комплексами на базе ЯМР-анализаторов. Поэтому данный аспект требует пристального внимания и служит стимулом для развития этой отрасли приборостроения в России.

В работах Козелкова О.В., Кашаева Р.С. и его учеников данная тематика развита в части разработки аппаратуры и экспресс-методик контроля в проточном анализаторе нефти третьего поколения ПМРА-III (протонный магнитно-резонансный анализатор 3-го поколения) [1]. Однако за рамками их исследований остались методы диагностики работоспособности узлов ПМР-анализатора, способы повышения его надежности, а также автоматизации процесса экспресс-контроля ФХС нефти. По этой причине в настоящий момент

данный прибор не отвечает всем требованиям к надежности и достоверности измерений при автоматическом экспресс-контроле характеристик нефти. Решение этих вопросов в новой модификации ПМРА-IV позволит повысить качество отечественного анализатора, чтобы составить конкуренцию зарубежным аналогам.

Перспективным направлением для решения задач диагностики анализатора ПМР является анализ электромагнитных шумов электронных узлов комплекса средствами релаксометра ПМР-анализатора. Также возможности для диагностики узлов анализатора дают зависимости, связывающие их мощность с параметрами измерений методиками ПМР.

Обеспечение возможности самодиагностики прибора позволяет сократить временные и финансовые затраты на обслуживание оборудования, а также упростить процесс профилактических работ для прибора и повысить его надежность. Поэтому в обновленном ПИК четвертого поколения ПМРА-IV для обеспечения надежности работы и достоверности измерений предлагается разработать новый метод, средства и программно-техническое обеспечение диагностики его узлов по данным принципам, что и является одной из задач диссертации. В этой области можно выделить труды ученых, которые внесли значимый вклад в основы применения флуктуационно-шумовых методов исследования процессов деградации элементов ПИК: Денисов Е.С., Якубович Б.И., Якимов А.В., Савченко М.П.

Для повышения надежности работы и достоверности измерений ПИК также предлагается внедрить использование таких мер, как резервирование ключевых элементов системы, прогнозирование остаточного ресурса ПИК, корректировка параметров и результатов измерений с учетом зависимостей ПМР-параметров нефти от температуры исследуемых образцов и влияния температуры магнита в датчике ЯМР на резонансную частоту релаксометра. Помимо вышеуказанных мер следует, в том числе, заменить проводную катушку индуктивности в датчике ПМР релаксометра на рулонную с лучшими магнитными параметрами, а также модернизировать и перенести на актуальный контроллер программу управления пробоотбором для повышения точности забора образцов подвижным патрубком.

Следует устранить ещё один весомый недостаток ПМР-анализатора – сложность управления. По этой причине может возникать значительный объем субъективных погрешностей измерений и появляется необходимость в высококвалифицированных специалистах для проведения замеров. Для решения данной задачи необходимо автоматизировать процесс контроля нефти методиками ПМР. Вместе с этим, при создании метода автоматизации измерений основных характеристик нефти, необходимо разработать экспресс-методику определения такого важного параметра, как уровень содержания серы в нефтепродуктах, поскольку это единственная из основных характеристик нефтепродуктов, для которой ранее не проводились измерения вышеуказанным анализатором.

Методология и методы исследования

Объект исследования – блоки и узлы программно-измерительного

комплекса анализа нефти методами ПМР для выявления способов повышения надежности данной системы и разработки новых методик его диагностики.

Предмет исследования – измерения и функционирование программно-измерительного комплекса анализа нефти при автоматизированном экспресс-контроле характеристик исследуемых образцов на технологических объектах цифрового нефтепромысла для выявления диагностических признаков оценки технического состояния блоков данной системы.

Цель работы

Разработка новых методов и программно-технического обеспечения автоматизации измерений, диагностики состояния узлов ПМР-анализатора нефти без остановки его работы и средств повышения надежности данного комплекса.

Задачи диссертации

Для достижения цели в работе решались следующие задачи:

1. Теоретические и экспериментальные исследования процессов измерения методом ПМР с целью выявления диагностических признаков оценки технического состояния узлов релаксометра ПИК ПМРА-IV и разработки нового метода их диагностики по параметрам измерительной последовательности Карра-Парселла-Мейбум-Гилла.

2. Разработка программно-технического обеспечения для реализации метода диагностики состояния релаксометра ПИК ПМРА-IV путем определения уровня электромагнитных шумов его электронных компонентов собственными средствами релаксометра.

3. Внедрение в ПИК ПМРА-IV средств увеличения точности измерений и резервирования ключевых узлов системы для повышения надежности комплекса.

4. Усовершенствование программы управления системой пробоотбора ПИК для повышения точности забора проб подвижным патрубком и обеспечения возможности перехода к более надежной плате управления.

5. Разработка нового метода автоматизации проточного экспресс-контроля основных характеристик нефти и её серосодержания по параметрам ПМР-релаксации, а также программы управления ПМР-анализатором для его реализации.

6. Разработка испытательного стенд ПМРА-IVпр для отработки средств повышения надежности ПИК ПМРА-IV, а также новых методов его диагностики и автоматизации измерений свойств нефти по параметрам ПМР.

Методы исследования

Для решения поставленных задач использовался комплексный подход, основанный на анализе современной и фундаментальной научно-технической литературы, теории обработки сигналов и известных способах диагностики оборудования, а также применялся метод ПМР для исследования релаксационных процессов в нефтепродуктах. Для разработки средств диагностики ПИК использовались методы математической статистики и теории погрешностей; при построениях зависимостей параметров, отражающих работоспособность измерительного комплекса и узла питания релаксометра по

параметрам измерительной последовательности ПМР, применялись численные методы аппроксимации в программе *Advanced Grapher* и расчеты в среде *MATLAB*. Для проверки полученных результатов работы проводились испытания на разработанном стенде ПМРА-IVпр. Подтверждение полученных данных производилось использованием высокоточного измерительного оборудования и эталонных образцов.

Обработка экспериментальных данных осуществлялась на персональном компьютере с помощью разработанного программного обеспечения, написанного на языке программирования *C#*, с использованием средства построения интерфейса пользователя *WPF* и библиотеки для обработки графиков *SciChart*.

Научная новизна работы

1. Реализованы алгоритмы, методы и средства диагностики технического состояния ПИК по избыточному уровню электромагнитных шумов его электронных узлов, определяемых собственными средствами ПМР-релаксометра без остановки его функционирования.

2. Разработана методика расчета числовых параметров диагностических характеристик надежности узлов ПИК, определяемых по параметрам измерительной последовательности импульсов в методе ПМР.

3. Разработан метод и программное обеспечение автоматизации измерений серосодержания и большинства характеристик нефти по параметрам сигналов измерений ПМРА-IV.

Теоретическая значимость результатов работы заключается в создании основ методик экспресс-диагностики исправности узлов ПМР-анализаторов и во внедрении средств повышения достоверности результатов их измерений по параметрам ПМР-релаксации. Применение полученных результатов и разработанных методик позволяет улучшить метрологические и эксплуатационные характеристики существующих ПМР-анализаторов нефти и, в частности, анализатора ПМРА-IV.

Практическая значимость работы определяется возможностью использования следующих полученных результатов:

1. Созданы алгоритмический аппарат и программное обеспечение для автоматизированной обработки данных результатов регистрации сигналов ПМР-анализатора при исследованиях характеристик скважинной жидкости (СКЖ) и нефти. Это позволяет автоматизировать экспресс-контроль НДС, увеличить достоверность измерений, подготовить ПМР-анализатор для внедрения в цифровые технологии добычи и подготовки нефти.

2. Разработана методика автоматизированного проточного экспресс-контроля концентрации содержания серы в нефти с использованием ПМР-анализатора. В данной методике используются экспериментально полученные соотношения, которые дополняют ряд существующих зависимостей для определения основных характеристик нефти по параметрам ПМР.

3. Внедрены дополнительные меры повышения надежности и достоверности измерений ПИК ПМРА-IV: зарезервированы отдельные ключевые элементы системы, использованы методики самодиагностики

оборудования, усовершенствована программа управления системой пробоотбора, применены дополнительные средства повышения точности измерений.

4. Разработан испытательный стенд, позволяющий отработать разработанные средства диагностики элементов ПМРА-IV по уровню электромагнитных шумов, и метод автоматизированного контроля характеристик нефти по ПМР-параметрам.

На защиту выносятся

1. Новый метод определения исправности узла питания релаксометра ПМР по зависимости мощности его передатчика от коэффициента заполнения импульсов в измерительной последовательности КПМГ и разработанное программно-техническое обеспечение диагностики работоспособности основных узлов релаксометра в составе ПИК ПМРА-IV.

2. Новый метод автоматизации экспресс-контроля основных характеристик нефти и её серосодержания по параметрам ПМР-релаксации, алгоритмы и программно-техническое обеспечение для его реализации.

3. Испытательный стенд ПМРА-IVпр для отработки средств повышения надежности ПИК ПМРА-IV, а также новых методов его диагностики и автоматизации измерений свойств нефти по параметрам ПМР.

Соответствие паспорту специальности

Диссертация соответствует научной специальности 2.2.8 «Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды» и отвечает пунктам паспорта специальности: 1 – «Научное обоснование новых и совершенствование существующих методов, аппаратных средств и технологий контроля, диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды, способствующее повышению надёжности изделий и экологической безопасности окружающей среды»; 2 – «Разработка методологий прогнозирования работоспособности и остаточного ресурса изделий, направляющих оптимизацию методов, приборов, систем контроля и диагностирования изделий, повышение надёжности изделий и экологической безопасности окружающей среды»; 3 – «Разработка, внедрение, испытания методов и приборов контроля, диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды, способствующих повышению надёжности изделий и экологической безопасности окружающей среды»; 6 – «Разработка математических моделей, алгоритмического и программно-технического обеспечения обработки результатов регистрации сигналов в приборах и средствах контроля и диагностики с целью автоматизации контроля и диагностики, подготовки их для внедрения в цифровые информационные технологии».

Личный вклад автора

В программно-измерительном комплексе ПМРА-IV автором была реализована методика самодиагностики состояния работоспособности элементов и узлов релаксометра путем определения избыточной интенсивности электромагнитных шумов средствами релаксометра ПМР. Были внедрены средства повышения надежности и достоверности результатов измерений ПИК,

а также метод определения исправности узла питания релаксометра по корреляции мощности передатчика релаксометра с параметрами измерительной последовательности в методике ПМР.

Разработаны новый метод автоматизированного анализа релаксационных данных и характеристик исследуемой нефти, а также программа управления и контроля комплекса ПМРА-IV для его реализации. В рамках работы по данному научному направлению автором были также проведены исследования по определению содержания серы в нефтях для того, чтобы дополнить имеющийся математический аппарат зависимостями, отражающими связь между характеристиками нефти и параметрами ПМР-релаксации в ней.

Автор принимал непосредственное участие в обсуждении, анализе и интерпретации полученных результатов, а также самостоятельно готовил документы для получения свидетельств о регистрации программ, писал научные статьи по результатам исследований и участвовал с докладами на конференциях.

Достоверность и обоснованность полученных научных результатов диссертации обеспечивается корректной постановкой задач, подтверждается независимой экспертизой, проведенной при рецензировании опубликованных статей и РИД, использованием фундаментальных принципов физики, применением высокоточной измерительной аппаратуры, совпадением теоретических результатов с экспериментальными исследованиями, высокой повторяемостью, а также отсутствием противоречий с данными других исследователей.

По теме диссертации опубликовано 18 работ, включая 1 статью в рецензируемом научном издании, индексируемом в международной базе данных SCOPUS; 2 статьи в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК (категория К2) по специальности диссертации; 2 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ; 13 публикаций в сборниках материалов докладов международных и всероссийских конференций, в их числе 11 публикаций, включенных в РИНЦ.

Апробация работы. Основные результаты работы представлялись и докладывались на следующих конференциях: Межвузовский международный конгресс «Высшая школа: научные исследования», Москва, 2023; «Всероссийский Аспирантско-магистерский научный семинар», Казань, КГЭУ, 2023-2024; Национальные научно-практические конференции «Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве», Казань, КГЭУ, 2023-2024; «International Russian Smart Industry Conference, Smart Industry Con 2024», Сочи, 2024; Национальная научно-практическая конференция «Цифровые системы и модели: теория и практика проектирования, разработки и применения», Казань, КГЭУ, 2024; Международная молодежная научная конференция «Тинчуринские чтения 2024», Казань, КГЭУ, 2024; Всероссийская научно-техническая конференция «Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике», Чебоксары, 2024.

Реализация и внедрение результатов работы

Алгоритм и программы автоматизации обработки результатов измерений релаксометра ПМР в составе ПМРА-IV внедрены в образовательный процесс на кафедре «Приборостроение и мехатроника» Казанского государственного энергетического университета. Способы диагностики и повышения надежности электронного оборудования внедрены на предприятии ООО «Интеграл Плюс», производящем РЭА. Внедрения подтверждены актами.

Объем и структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемых сокращений, списка использованной литературы из 90 наименований, приложений с программами управления и автоматизации ПМР-анализатора, актами внедрений результатов работы. Диссертация содержит 180 страниц машинописного текста, 4 таблицы, 34 рисунка и 6 приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В Главе 1 выполнен обзор существующих методов и средств диагностики блоков ПИК. Дано краткое описание явления ПМР. Проведен анализ влияния электромагнитных шумов на работу ПИК ПМРА-IV, в состав которого входят: источник питания, лабораторный релаксометр ПМР с персональным компьютером и программами управления, а также система пробоотбора и слива проанализированных образцов в нефтепровод. Исследован метод диагностики оборудования путем детектирования избыточного уровня шумов компонентов радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) [2]. Приведено научное обоснование возможности и целесообразности реализации самодиагностики ПМР-анализатора данным методом. Также были рассмотрены: физика отказов оборудования, вопросы надежности оборудования, прогнозный расчет надежности ПИК. Приведены методики расчета времени работы элементов комплекса до отказа и рекомендации по повышению уровня полезного сигнала при измерениях методом ПМР.

Глава 2 посвящена разработке программно-технического обеспечения методов диагностики элементов релаксометра ПИК по уровням электромагнитных шумов и по параметрам измерительной последовательности ПМР, а также созданию программ расчета параметров надежности ПМР-анализатора. Для первого применена схема, приведенная на рис. 1.

Данный способ подразумевает обнаружение дефектов узлов релаксометра ПИК средствами самого ПМР-анализатора. Это происходит путем определения избыточной интенсивности излучаемых ими электромагнитных шумов (рис. 2). Для определения значений шума в интерфейсе программы управления релаксометра предусмотрена опция с информацией об амплитудах сигналов спин-эхо (Асэ) для серии измерительных импульсов в методе ПМР. При установлении предельного числа измерительных импульсов замеры Асэ будут указывать на значение уровня шума. Для контроля отдельных узлов релаксометра в схеме предусмотрено применение мультиплексора с отдельным детектором электромагнитного шума.

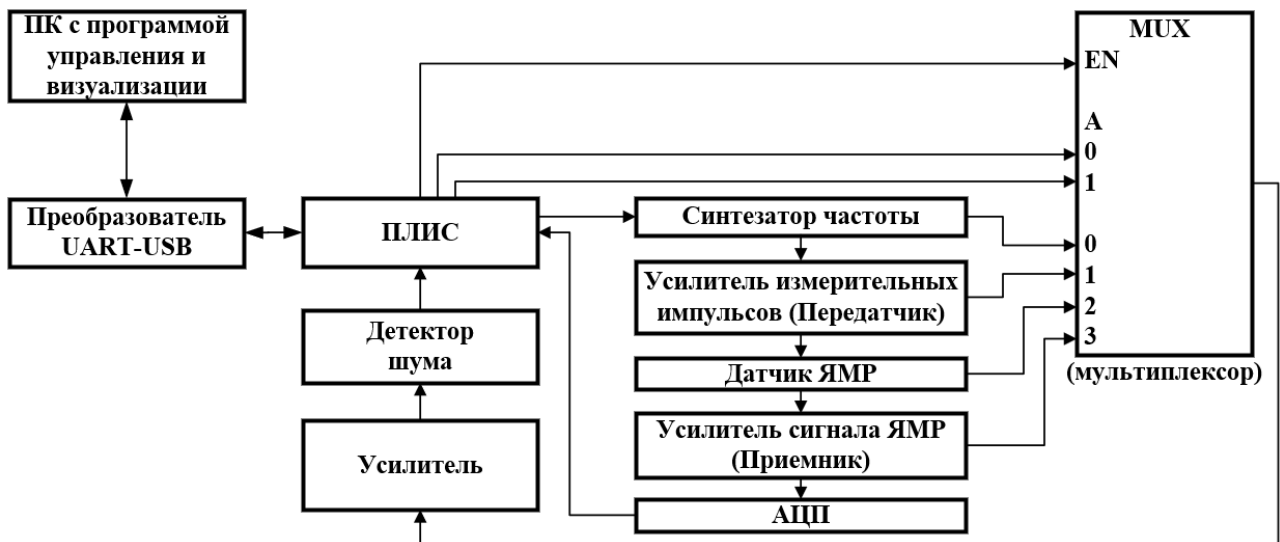


Рис. 1. Блок-схема диагностики узлов релаксометра в составе ПИК

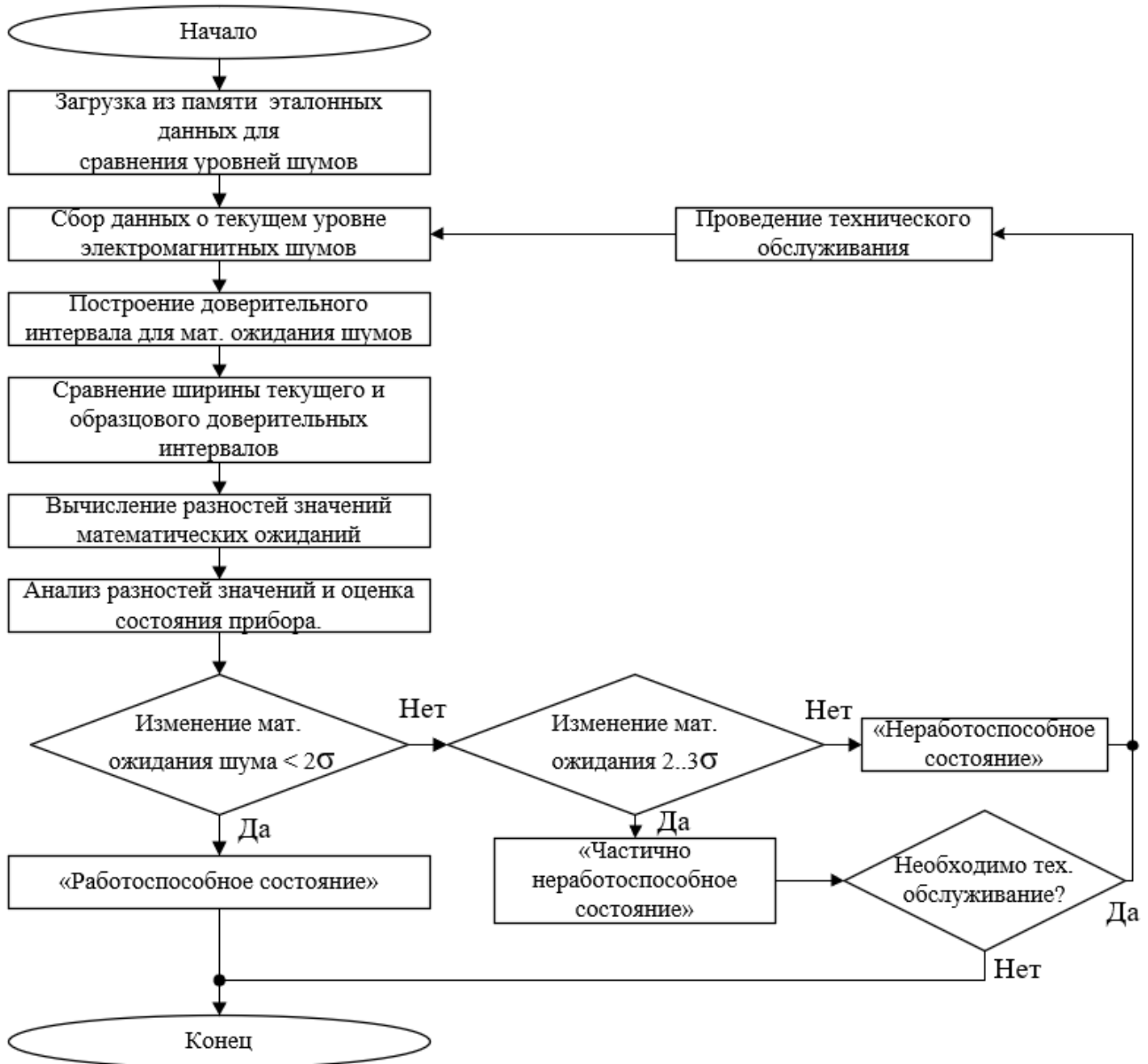


Рис. 2. Алгоритм диагностики ПМР-анализатора по электромагнитному шуму (σ – среднеквадратическое отклонение значения шумов)

Разработан метод определения исправности узла питания релаксометра по корреляции мощности $P(D)$ его передатчика с коэффициентом заполнения D в измерительной импульсной последовательности ПМР Карра-Парселла-Мейбум-Гилла (КПМГ). При исправной работе платы питания зависимость должна иметь линейный характер. При некорректной работе наблюдается отклонение от линейной зависимости, пропорциональное степени ее неисправности (рис. 3).

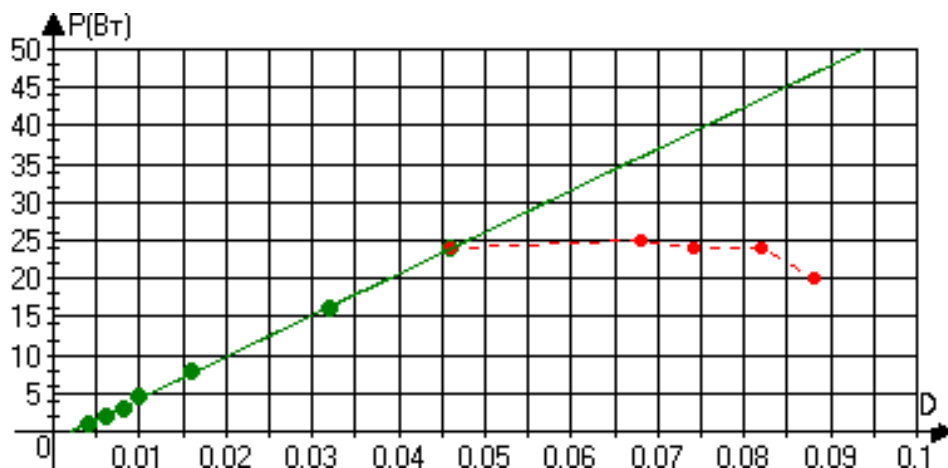


Рис. 3. Зависимость мощности P платы передатчика релаксометра от коэффициента заполнения импульсов D в последовательности КПМГ

В результате расчетов и моделирования получены параметры надежности работы релаксометра в составе ПИК ПМРА-IV при различных температурах:

- интенсивность отказов работы релаксометра в составе ПИК:

$$\lambda_{-25^{\circ}\text{C}} = 5,8 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1}; \lambda_{0^{\circ}\text{C}} = 5,5 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1}; \lambda_{25^{\circ}\text{C}} = 5,3 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1}; \lambda_{50^{\circ}\text{C}} = 5,7 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1};$$

- время наработки на отказ для релаксометра в составе ПИК:

$$T_{-25^{\circ}\text{C}} = 1700 \text{ ч}; T_{0^{\circ}\text{C}} = 1800 \text{ ч}; T_{25^{\circ}\text{C}} = 1890 \text{ ч}; T_{50^{\circ}\text{C}} = 1750 \text{ ч};$$

- надежность работы релаксометра в составе ПИК без резервирования основных элементов: $P_{-25^{\circ}\text{C}} = 0,415$; $P_{0^{\circ}\text{C}} = 0,45$; $P_{25^{\circ}\text{C}} = 0,47$; $P_{50^{\circ}\text{C}} = 0,43$.

В среде *MatLab* проведены расчеты вероятности безотказной работы всего программно-измерительного комплекса ПМРА-IV (рис. 4), состоящего из источника питания, лабораторного релаксометра ПМР с персональным компьютером и программами управления, а также системы пробоотбора и слива проанализированных образцов обратно в магистральную трубу нефтепровода.

В Главе 3 описаны разработанные метод и программно-техническое обеспечение для автоматизации экспресс-контроля характеристик нефти и её серосодержания по достоверным данным ПМР-релаксации, полученным в результате мер по повышению достоверности измерений ПИК.

На рис. 5 приведен интерфейс программы управления релаксометром [A5], которой задаются параметры режимов измерения, выполняется сообщение релаксометра с модулем ПЛИС (программируемая логическая интегральная схема), а затем, после замера и получения данных от ПЛИС, при нажатии кнопки «Авто» пофазно производится расчёт параметров ПМР-релаксации. Из полученных ПМР-параметров программа рассчитывает по известным формулам основные характеристики нефти [3].

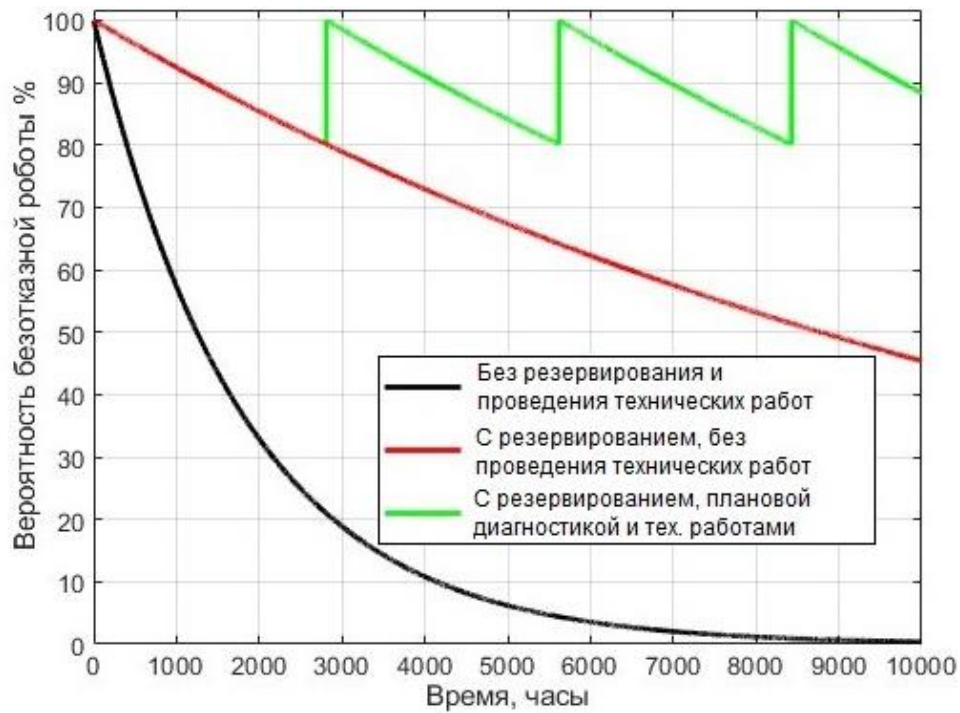


Рис. 4. Вероятность безотказной работы ПИК во времени

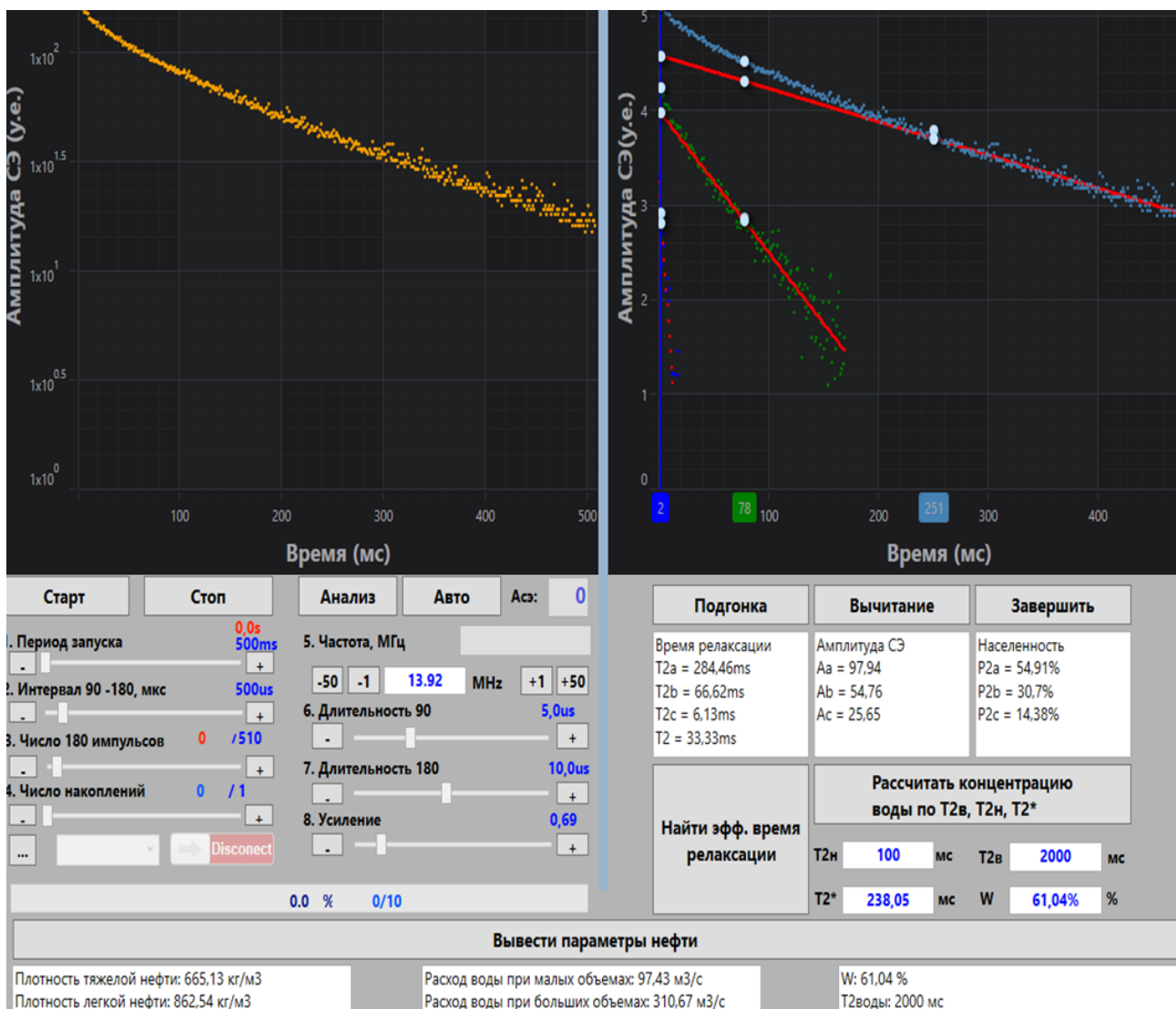


Рис. 5. Интерфейс программы управления релаксметром ПМР

Алгоритм авторасчета следующий: для фазы A рассчитывается среднеквадратическое отклонение (СКО); удаляются выбросы ≥ 3 СКО; выполняется аппроксимация кривой для минимизации влияния помех на расчеты; вычисляются значения ПМР-параметров для фазы A (время спин-спиновой релаксации, населенность протонов, $As\epsilon$); выбирается точка излома для проведения касательной; производится вычитание касательной (теор. кривой) из экспериментальной кривой для получения данных фазы B ; повторяется алгоритм для всех фаз; производится расчет характеристик нефти по формулам, описывающим корреляции между её ФХС и параметрами ПМР.

Также, при разработке данного метода и программного обеспечения, были проведены работы, дополняющие имеющуюся модель анализа нефти путем выведения зависимостей серы от ПМР-параметров. Далее представлены экспериментально полученные зависимости времен релаксации T_{2i} (где $i = A, B, C$ и обозначает фазу вещества) от концентрации серы в нефти (рис. 6, кривые 1, 2, 3), мазуте (рис. 7, кривые 1, 2, 4) и битуме по T_{2A} (рис. 7, кривая 3).

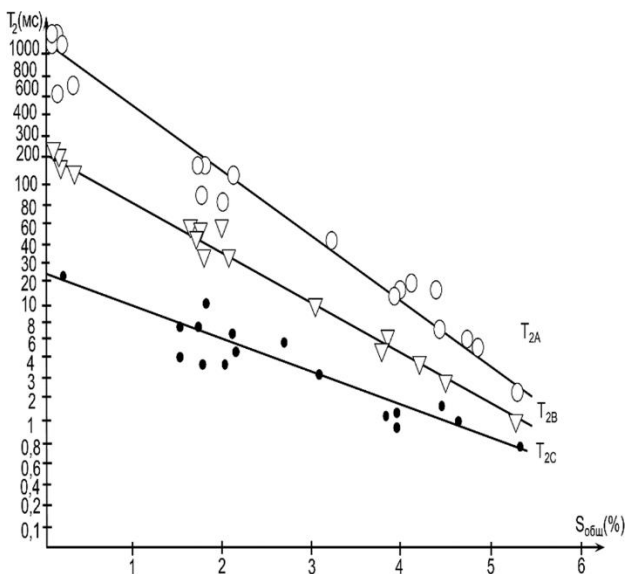


Рис. 6. Зависимости T_{2i} фаз A, B, C от концентрации серы в нефти

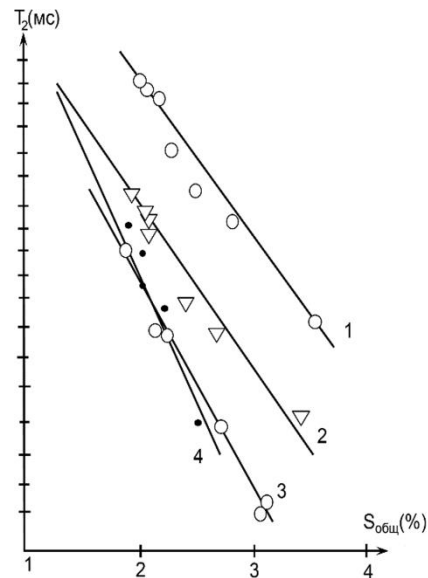


Рис. 7. Зависимости T_{2i} фаз A, B, C от серы в мазуте и битуме

Все они описываются по аналогии с фазой A уравнениями вида:

$$T_{2A} = K_1 \exp(-K_2 S), \quad (1)$$

$$S = K_3 - K_4 \ln(K_5 T_{2A}). \quad (2)$$

где K_{1-5} – экспериментальные поправочные коэффициенты, S – концентрация серы.

В работе [4] приводятся результаты независимого исследования о причинах ошибок измерений в химических соединениях. По статистике, приведенной в данной работе, можно сказать, что наиболее частыми причинами возникновения ошибок в измерениях свойств химических соединений являются: ошибки приготовления образцов (16%), человеческий фактор (13%), сбой оборудования (13%), проблемы калибровки (10%). С последними тремя позволяют справляться предложенные меры автоматизации и диагностики, тем самым повышая надежность и достоверность работы ПИК.

В Главе 4 приведено описание разработанного испытательного стенда ПМРА-IVпр («пр» – программируемый), с помощью которого были отработаны предложенные методы диагностики узлов ПИК и автоматизации измерений по параметрам ПМР-релаксации (рис. 8). Стенд, соответственно, был разработан на базе ПИК ПМРА-IV.

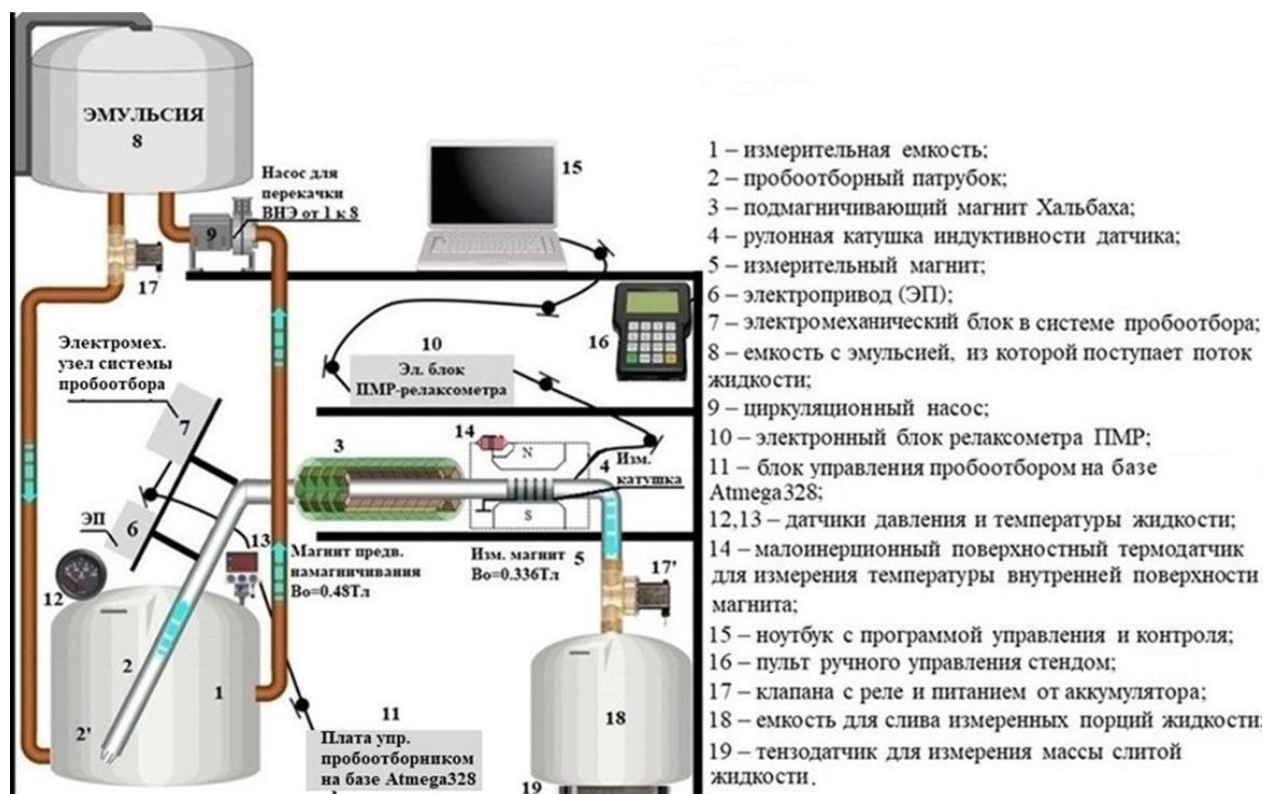


Рис. 8. Структурно-функциональная схема стенда ПМРА-IVпр

Параметры релаксометра ПМР в составе этого стенда следующие:

- 1) диапазон настройки несущей частоты в $\nu_0 = 10 \div 25$ МГц;
- 2) точность подстройки частоты 0,1 МГц;
- 3) длительности импульсов: $90^\circ - 5$ мкс, $180^\circ - 10$ мкс;
- 4) минимальный интервал между 90° и 180° импульсами 100 мкс, между 180° импульсами $\tau = 200$ мкс, максимальный интервал 5 мс;
- 5) число 180° – импульсов от 1 до 10 000;
- 6) число накоплений – до 100.

На стенде может проводиться анализ НДС и жидкого топлива. Температуры, при которых возможны измерения $-60 \dots +50$ °С, давление в измерительной емкости (1) до 1 МПа, допустимый перепад давления для пробоотборника 0,25 – 0,5 МПа, плотность исследуемого вещества 400 – 1100 кг/м³; диаметр трубы в пробоотборнике и зазоре магнита 30 мм.

В отличие от старой модификации, испытательный стенд ПМРА-IVпр имеет следующие особенности: предусмотрен автоматический сбор измеренных образцов в емкость 18 для последующей верификации данных традиционными методами; установлен ручной пульт управления стендом 16; введен насос 9 для циклической подачи потока эмульсии из накопительной

емкости 8 в измерительную 1; стандартная катушка индуктивности в датчике ЯМР заменена на рулонную для повышения однородности радиочастотного поля; была внедрена надежная система фиксации положения патрубка с помощью электромагнитной катушки; проведены улучшения и перенос программы управления системой пробоотбора, чтобы перейти на более компактную плату с контроллером *Atmega328* для повышения её вибрационной устойчивости, улучшения теплоотвода и реализации более точного забора проб подвижным патрубком, поскольку ранее он фиксировался только в крайних положениях.

Также в стенде имеется составной магнит Хальбаха (3) для осуществления предварительного намагничивания отобранной порции жидкости перед её анализом (рис. 9). При длине магнита подмагничивания $l_{\text{пм}}$, втроекратно превышающей длину измерительного магнита $l_{\text{изм}}$, величина индукции магнитного поля порции образца (B_{oil} – для нефти, B_{water} – для воды) в зазоре датчика релаксометра увеличивается в 1,5 раза, что позволяет пропорционально увеличить уровень полезного сигнала. Измерительный и подмагничивающий (только на левом графике) магниты на рис. 9 обозначены синим цветом под основанием графика, где ось абсцисс обозначает длину участка магнита, по которой протекает анализируемая жидкость, а ось ординат показывает значение индукции магнитного поля.

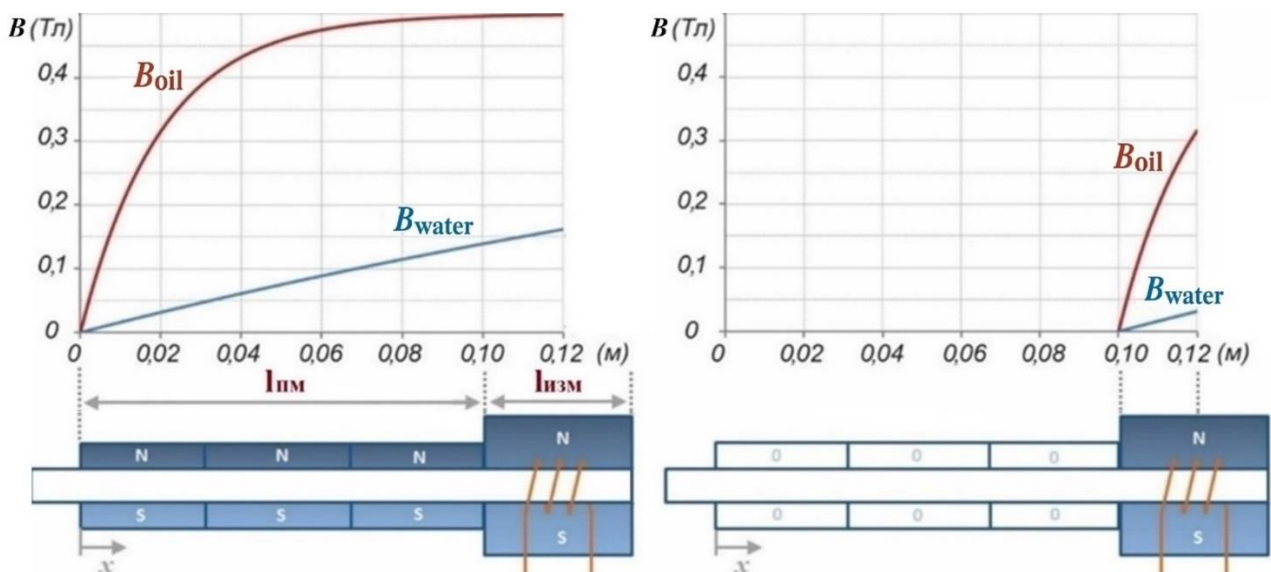


Рис. 9. Иллюстрация метода повышения уровня полезного сигнала использованием магнита подмагничивания

Поскольку расчет параметров надежности релаксометра ПИК показал низкие показатели вероятности безотказной работы, было решено увеличить его надежность внедрением резервных элементов. В нашем случае мы выделили 5 наиболее ответственных радиокомпонентов: транзистор 2ON06L в плате передатчика, синтезатор частоты AD9851, АЦП AD7813, транзистор BF998 и диод 1D507A (в составе приемника сигнала ПМР). При тройном параллельном резервировании транзисторов 2ON06L и BF998, а также при дублировании остальных компонентов в наиболее нагруженных узлах

достигнута надежность работы релаксометра в составе ПИК $P = 0,954$ (для 1000 ч). В совокупности с дублированием источника питания, данные меры привели к повышению вероятности безотказной работы всего комплекса ПМРА-IV с 59 до 92% (для 1000 часов эксплуатации), что показано на рис. 4.

В процессе отработки новых методик и программно-технического обеспечения были установлены факторы, влияющие на точность и достоверность измерений ПИК: изменение поля и температуры магнита, форма катушки датчика ПМР, неточность установки длительности измерительных 90° импульсов, зависимость времен релаксации от температур образцов, недостатки системы пробоотбора и нагрузки от потока жидкости. В диссертации также предложены и описаны способы снижения их влияния.

Также были рассмотрены вопросы неопределенности измерений ПИК. В случае ПИК её можно выразить параметром основной инструментальной погрешности комплекса, определяющей его точность, которая складывается из погрешности нестабильности радиочастотного поля, стабильности длительностей импульсов микросхем, стабильности температуры магнита в датчике релаксометра. По расчетам, приведенным в работе, инструментальная погрешность составила: $\gamma_0 \approx \pm 1,39\%$, что в сумме с погрешностью измерений времен спин-спиновой релаксации в $\pm 2,5\%$ дает основную приведенную погрешность измерений, равную $\pm 3,89\%$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертационной работы:

1. Проведены исследования, в результате которых был разработан новый метод определения исправности узла питания ПМР-релаксометра ПИК по зависимости мощности его передатчика от коэффициента заполнения импульсов в измерительной последовательности КПМГ.

2. Разработано программно-техническое обеспечение для реализации метода диагностики состояния релаксометра ПИК ПМРА-IV путем определения уровня электромагнитных шумов его электронных компонентов собственными средствами релаксометра.

3. Внедрены средства повышения надежности ПИК путем резервирования его элементов, сделан расчет числа резервирующих блоков и радиоэлементов плат релаксометра ПМР. Дублированием источника питания и резервированием элементов плат релаксометра в составе ПИК достигнута вероятность безотказной работы всего комплекса в 92% для 1000 часов эксплуатации.

4. Проведены математические расчёты в среде *MATLAB* и физическое моделирование на стенде, в результате которых были разработаны алгоритмы прогнозирования надежности ПИК и получены соответствующие графики. Полученные зависимости отражают вероятность безотказной работы ПИК во времени для устройства: с резервированием без проведения технических работ, без резервирования и проведения технических работ, а также с учетом проведения рекомендуемой самодиагностики и плановых технических работ резервированной системы каждые 2800 ч.

5. Внедрены средства снижения следующих факторов, негативно влияющих на точность измерений ПИК: изменения поля и температуры магнита, форма катушки датчика ПМР, неточность установки длительности измерительных 90° импульсов, зависимость времен релаксации от температур образцов, динамические нагрузки от потока и недостатки системы пробоотбора предыдущего поколения.

6. Разработаны и апробированы метод автоматизации проточного экспресс-контроля основных характеристик нефти и её серосодержания по параметрам ПМР-релаксации, а также программа управления ПМР-анализатором для его реализации.

7. Разработан испытательный стенд ПМРА-IVпр для отработки средств повышения надежности ПИК ПМРА-IV, а также новых методов его диагностики и автоматизации измерений свойств нефти по параметрам ПМР.

Описанные в работе средства повышения надежности, а также разработанные новые методики диагностики состояния узлов ПМР-анализатора нефти могут быть востребованы при производстве и техническом обслуживании релаксметров ПМР. Разработанный стенд может быть использован в качестве основы при проектировании промышленных установок в нефтяной отрасли.

Для дальнейшего развития проведенных исследований рекомендуется создание алгоритмов и усовершенствование программы управления ПМР-анализатора с целью добавления функции контроля работы сероочистных установок, в которых определение содержания серы предполагается осуществлять по новому методу, изложенному в настоящей работе.

СПИСОК ЦИТИРУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Нгуен Тъи Киен, Кашаев Р.С. Стенд ПМР-анализатора для измерения вязкости и состава многокомпонентных жидкостей методом ПМР-релаксометрии // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22. № 2. С. 108-116.

2. Разуменко Д. Низкочастотные шумы электронных компонентов как инструмент для диагностики внутренних дефектов // Компоненты и технологии. 2008. № 9. С. 168–174.

3. Козелков О.В. Методы и средства экспресс-контроля характеристик скважинной жидкости и нефти на базе протонной магнитной резонансной релаксометрии: дис. на соиск. учен. степ. докт. техн. наук: 2.2.8 / Козелков Олег Владимирович. – Казань, 2021. – 299 с;

4. Ellison S. L. R., Hardcastle W. A. Causes of error in analytical chemistry: results of a web-based survey of proficiency testing participants // Accreditation and Quality Assurance. 2012. P. 353–464.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи автора в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международных базах данных

A1. Amir D. Arslanov, Rustem S. Kashaev, Oleg V. Kozelkov. System of oil express flow control on the basis of proton magnetic resonance relaxometry // International Russian Smart Industry Conference. SmartIndustryConf 2024. 2024. P. 214–218 (МБД SCOPUS).

Статьи в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК

A2. Дык Ань Нгуен, Кашаев Р.С., Козелков О.В., Арсланов А.Д., Чан Ван Тунг. Разработка усовершенствованного программно-аппаратного комплекса управления патрубком анализатора протонного магнитного резонанса ПМРА-IV // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2025. Т. 27. № 1. С. 3-15 (категория К2).

A3. Арсланов А.Д., Дык Ань Нгуен, Чан Ван Тунг, Кашаев Р.С., Козелков О.В. Анализатор нефти ПМРА-IV для автоматизированного контроля характеристик исследуемых образцов // Автоматизация в промышленности. 2025. №1. С. 51–53 (категория К2).

Свидетельства о регистрации РИД

A4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №RU2024615694 Российская Федерация. Программа визуализации зависимостей характеристик нефти от параметров протонной магнитной резонансной релаксометрии для системы контроля проточного ПМР-анализатора: №2024613804, заявл. 27.02.24, опубл. 12.03.24 / Арсланов А. Д., Кашаев Р.С., Козелков О.В., Нгуен Д.А., Галиев А.Б.;

A5. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2024682954 Российская Федерация. Программа автоматизированного контроля и обработки сигналов при исследованиях характеристик нефти методом протонной магнитно-резонансной релаксометрии для системы экспресс контроля проточного ПМР-анализатора: №2024681562, заявл. 19.09.24, опубл. 01.10.24 / Арсланов А.Д., Кашаев Р.С., Козелков О.В. и др.

Подписано в печать 25.06.2025. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 1,25. Тираж 100. Заказ №1906/1.

Отпечатано с готового оригинал-макета

в типографии «Вестфалика» (ИП Колесов В.Н.)

420111, г. Казань, ул. Московская, 22. Тел.: 292-98-92

e-mail: westfalika@inbox.ru
