



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО «КГЭУ»)

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

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

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент,
Козелков Олег Владимирович

Казань-2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	5
ВВЕДЕНИЕ.....	7
1. ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ И СРЕДСТВ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ. НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ САМОДИАГНОСТИКИ ПИК.....	21
1.1. Краткое описание явления ядерного магнитного резонанса	22
1.2. Параметры надежности аппаратуры	28
1.3. Влияние электромагнитных шумов и помех на качество работы ПИК. Определение исправности работы ПИК диагностикой уровня электромагнитных шумов собственными средствами релаксометра ПМР	30
1.4. Физика отказов и надежность радиоэлектронной аппаратуры	34
1.4.1. Отказы и предвестники отказов РЭА.....	35
1.4.2. Отказы полупроводниковых приборов и влияние помех	37
1.5. Резервирование систем и расчет параметров надежности ПИК	39
1.6. Методы выявления отказов потенциально ненадежных элементов.....	44
1.7. Интенсивность отказов и прогноз надежности в работе ПИК	46
1.8. Выводы по главе 1	48
2. ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МЕТОДОВ САМОДИАГНОСТИКИ И РАСЧЕТОВ НАДЕЖНОСТИ ПРОГРАММНО- ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ПМРА-IV	49
2.1. Расчет параметров надежности элементов релаксометра ПМРА-IV	49
2.2. Программа прогнозного расчета работоспособности программно- измерительного комплекса ПМРА-IV	53
2.3. Алгоритм определения уровня электромагнитных шумов и исправности анализатора через интерфейс релаксометра ПМР	56

2.4. Метод диагностики узлов питания релаксометра по параметрам измерительной последовательности ПМР	59
2.5. Общий алгоритм самодиагностики и повышения надежности работы ПМР-анализатора при измерениях характеристик нефти	60
2.6. Выводы по главе 2.....	64
3. АЛГОРИТМЫ И ПРОГРАММЫ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ НОВОГО МЕТОДА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭКСПРЕСС-КОНТРОЛЯ СЕРОСОДЕРЖАНИЯ И ХАРАКТЕРИСТИК НЕФТИ ПО ПАРАМЕТРАМ ПМР РЕЛАКСАЦИИ.....	65
3.1. Программно-алгоритмическое обеспечение автоматизированной обработки данных ПМР-анализатора.....	65
3.2. Корреляции концентрации содержания серы с ФХС нефти и нефтепродуктов	74
3.3. Методики экспресс-контроля концентрации содержания серы по прецизионным данным ПМР-релаксации, полученным в результате мер по повышению достоверности и надежности работы ПИК.....	79
3.4. Выводы по Главе 3	85
4. ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ СТЕНД ПМРА-IVпр ДЛЯ ОТРАБОТКИ НОВЫХ МЕТОДОВ АВТОМАТИЗАЦИИ ИЗМЕРЕНИЙ, ДИАГНОСТИКИ УЗЛОВ И СРЕДСТВ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ПМР-АНАЛИЗАТОРА НЕФТИ.....	86
4.1. Конструкция и принцип работы стенда ПМРА-IVпр	87
4.2. Повышение надежности работы блоков ПИК ПМРА-IV	95
4.2.1. Повышение надежности электронных блоков ПИК за счет использования цифровых схем с высокой степенью интеграции элементов .	96
4.2.2. Зависимость поля магнита от температуры окружающей среды	100
4.2.3. Датчик протонного магнитного резонанса.....	101
4.2.4. Влияние динамических нагрузок от потока жидкости на точность отбора проб	102
4.3. Меры по снижению неопределенности и погрешностей измерений	105

4.4. Алгоритм процесса измерения серосодержания и свойств нефти по параметрам ПМР-релаксации	107
4.5. Резервирование блоков программно-измерительного комплекса	110
4.5.1. Резервирование радиоэлементов плат релаксометра ПМР	111
4.5.2. Расчет надежности и резервирование источника питания ПИК.....	113
4.6. Выводы по главе 4.....	115
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	116
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	118
Приложение А	129
Приложение Б	131
Приложение В.....	170
Приложение Г	172
Приложение Д.....	174
Приложение Е	177

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

В настоящем диссертационном исследовании использованы следующие сокращения:

АЦП – аналого-цифровой преобразователь;

ВНИИР – Всероссийский научно-исследовательский институт расходомерии;

ДТ – дизельное топливо;

ДТЛ – диодно-транзисторная логика;

ИМС – интегральная микросхема;

ИП – источник питания;

КЗ – короткое замыкание;

КИП – контрольно-измерительные приборы;

КМОП – комплементарная структура металл — оксид — полупроводник;

Метод КПМГ – метод Карра-Парселла-Мейбум-Гилла;

НГДУ – нефтегазодобывающее управление;

НДС – нефтяная дисперсная система;

НЧ – низкая частота;

НЧШ – низкочастотный шум;

ПАО – публичное акционерное общество;

ПК – персональный компьютер;

ПИК – программно-измерительный комплекс;

ПЛИС – программируемые логические интегральные схемы;

ПМР – протонный магнитный резонанс;

ПМРА – протонный магнитно-резонансный анализатор;

ПМРР – протонная магнитно-резонансная релаксометрия;

ПО – программное обеспечение;

РЭА – радиоэлектронная аппаратура;

РЧ – радиочастотный;

СЕ – структурная единица;

СКЖ – скважинная жидкость;

СКЗ – среднеквадратическое значение;

СКО – среднеквадратическое отклонение;

ССИ – спад свободной индукции;

СЭ – спин-эхо;

Стенд ПМРА-IVпр – стенд протонного магнитно-резонансного анализатора четвертого поколения, программируемый;

ТТЛ – транзистор-транзисторная логика;

ФХС – физико-химические свойства;

ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь;

ЭВМ – электронная вычислительная машина;

ЯМР – ядерный магнитный резонанс.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности

Программа «Цифровая экономика РФ» ставит актуальные задачи по обеспечению многопараметрического экспресс-контроля параметров добываемой нефти и диагностике оборудования, предназначенного для управления нефтедобычей и нефтеподготовкой, в рамках создания цифровых месторождений нефти. Цифровая автоматизация нефтепромыслов позволяет перейти к новой стадии эксплуатации старых месторождений [1-3], рост количества которых наблюдается в последние десятилетия. Решение данных задач можно осуществить на базе программно-измерительного комплекса (ПИК), совмещающего в одном приборе возможности самодиагностики и измерения множества параметров нефти. Таковым является анализатор протонного (ядерного) магнитного резонанса (ПМР), работа которого основана на принципах квантовой радиофизики.

Метод ПМР является косвенным, не прямым методом измерения физико-химических характеристик нефтяных дисперсных систем (НДС). Уникальные возможности ПМР связаны с тем, что квантово-магнитные свойства ядер (протонов) не зависят от состояния исследуемого образца: прозрачности, степени перемешанности, инверсии фаз, непротонных примесей. В то же время параметры релаксации протонов коррелируют со многими физико-химическими свойствами (ФХС) нефти. Для расчета числовых значений характеристик нефти данным методом необходимо иметь математические модели, связывающие параметры ПМР с ФХС нефти, которые устанавливаются на основе измерений параметров релаксации реальных, калиброванных по составу и физическим свойствам образцов. В данном методе исследуемые образцы в ответ на импульсную программу ЯМР дают релаксационные кривые зависимости 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. Таким образом, этот метод прекрасно подходит для неразрушающего экспресс-контроля НДС [4].

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 [5-16]. Однако, из-за отсутствия серийного выпуска отечественных ЯМР-анализаторов нефти на российском рынке используются зарубежные, либо самодельные варианты данных приборов. В то же время за рубежом импульсный метод ЯМР уже стал основным для многих видов измерений. Так, например, для определения расхода, водосодержания и газонасыщенности скважинной жидкости на западе используются многофазные проточные анализаторы на подобии *MRMF-5000 (Krohne)* [17], основанные на описываемом принципе работы.

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 аспирантов, данная тематика развита в части разработки аппаратуры и экспресс-методик контроля в проточном анализаторе нефти третьего поколения ПМРА-III (протонный магнитно-резонансный анализатор 3 поколения) [18-35]. Однако за рамками тем их диссертаций 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 повысит качество отечественного анализатора нефти, чтобы составить конкуренцию западным аналогам на рынке.

Перспективным направлением для решения задач диагностики анализатора ПМР является анализ электромагнитных шумов электронных узлов комплекса средствами релаксометра ПМР-анализатора. Метод диагностики по уровню электромагнитного излучения известен при исследовании дефектов компонентов в электронике, электротехнике и узлах радиоэлектронной аппаратуры. Также возможности для диагностики узлов анализатора дают зависимости, связывающие потребляемую ими 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 главных задач диссертации. В этой области можно выделить труды ученых, работы которых внесли значимый вклад в основы применения флуктуационно-шумовых методов исследования процессов деградации компонентов и элементов электронных блоков ПИК: Денисов Е.С., Якубович Б.И., Якимов А.В., Савченко М.П. [36,37].

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 поставленной 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.

Положения, выносимые на защиту

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. Пункт научной новизны, пункт результатов и выводов диссертации соответствуют пункту 1 паспорта специальности «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. Пункт научной новизны, пункты результатов и выводов диссертации соответствуют пункту 2 паспорта специальности «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. Пункт научной новизны, пункт результатов и выводов соответствуют пункту 3 паспорта специальности «Разработка, внедрение, испытания методов и приборов контроля, диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды, способствующих повышению надёжности изделий и экологической безопасности окружающей среды».

4. Пункт научной новизны, пункт основных результатов и выводов диссертации соответствуют пункту 6 паспорта специальности «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, потребляемой передатчиком 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 РИД, писал научные статьи по результатам исследований и учувствовал с докладами на конференциях.

Достоверность и обоснование 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, а также отсутствием противоречий с опубликованными 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 г.

- Национальные научно-практические конференции «Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве». Казань, КГЭУ, 2023–2024 г.

- «International Russian Smart Industry Conference, Smart Industry Con 2024» Сочи, 24-30 марта 2024 г.

- Национальная научно-практическая конференция «Цифровые системы и модели: теория и практика проектирования, разработки и применения». Казань, КГЭУ, 10–11 апреля 2024 г.

- Международная молодежная научная конференция «Тинчуринские чтения 2024», Казань, КГЭУ, 24–26 апреля 2024 г.

- Всероссийская научно-техническая конференция «Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике». Чебоксары, 6-8 июня 2024 г.

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.

Благодарности

Автор выражает глубокую благодарность своему руководителю д.т.н., доценту Козелкову О. В. за постановку задач и руководство работой. Работа над созданием программно-измерительного комплекса и стенда была бы невозможной вне рамок научной школы д.т.н., профессора Кашаева Р. С., которому автор благодарен за помощь в процессе работы над диссертацией. Автор выражает благодарность секретарю кафедры «Приборостроение и мехатроника» КГЭУ Цветковой О. В. за помощь в оформлении данной работы.

Основные публикации по теме диссертации

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

1. 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 по специальности диссертации:

2. 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. doi:10.30724/1998-9903-2025-27-1-3-15 (категория K2).

3. 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 K2).

Свидетельства о регистрации РИД:

4. 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.; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет».

5. 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., Нгуен Д.А., Галиев А.Б.; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет».

Публикации в материалах докладов международных и всероссийских научных конференций:

6. Козелкова В.О., Кашаев Р.С., Арсланов А.Д. Установка и алгоритм управления удаления воды из нефти под управлением анализатора ядерного магнитного резонанса (ЯМР) // Исследовательская инициатива - 2023: Сборник статей Международного научно-исследовательского конкурса, Петрозаводск, 25 октября 2023 года. – Петрозаводск: Международный центр научного партнерства «Новая Наука» (ИП Ивановская И.И.), 2023. – С. 304-310.

7. Арсланов А.Д., Кашаев Р.С. Разработка системы контроля проточного ПМР-анализатора // XXVII Всероссийский аспирантско-магистерский научный семинар, посвященный Дню энергетика и 55-летию КГЭУ: материалы докладов, Казань, 05–06 декабря 2023 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2023. – С. 514-517.

8. Арсланов А.Д., Козелков О.В., Кашаев Р.С. Разработка системы управления и контроля проточного ПМР-анализатора // Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве: материалы IX Национальной научно-

практической конференции, посвященной 55-летию КГЭУ, Казань, 07–08 декабря 2023 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2024. – С. 9-11.

9. Арсланов А.Д., Нгуен Дык Ань. Методика измерения серы в нефтях с использованием автоматизированного устройства ПМР-анализатора // XXVIII Всероссийский аспирантско-магистерский научный семинар: материалы докладов в 3 томах, Казань, 2024 год. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2024. – Т. 3. С. 718-721.

10. Нгуен Дык Ань, Арсланов А.Д. Устройство стабилизации и контроля температуры образцов для ПМР-анализаторов // XXVIII Всероссийский аспирантско-магистерский научный семинар: материалы докладов в 3 томах, Казань, 2024 год. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2024. – Т. 3. С. 747–751.

11. Арсланов А.Д., Козелков О.В., Кашаев Р.С. Программа управления и диагностики для ПМР-анализатора нефти // Цифровые системы и модели: теория и практика проектирования, разработки и применения: Материалы национальной (с международным участием) научно-практической конференции, Казань, 10–11 апреля 2024 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2024. – С. 21-24.

12. Арсланов А.Д., Нгуен Д.А., Галиев А.Б. Система управления проточного ПМР-анализатора для экспресс-контроля характеристик нефти по параметрам протонного магнитного резонанса // Тинчуринские чтения - 2024 «Энергетика и цифровая трансформация»: Материалы Международной молодежной научной конференции, Казань, 24–26 апреля 2024 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2024. – С. 163-167.

13. Нгуен Д.А., Арсланов А.Д., Галиев А.Б. Разработка усовершенствованного управляемого напряжением усилителя для приемника релаксометра ПМР-анализатора // Тинчуринские чтения - 2024 «Энергетика и цифровая трансформация»: Материалы Международной молодежной научной

конференции, Казань, 24–26 апреля 2024 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2024. – С. 205-208.

14. Галиев А.Б., Арсланов А.Д., Нгуен Д.А. Исследование физико-химических характеристик нефти в пластовых и стандартных условиях для разработки проточного ПМР-анализатора // Тинчуринские чтения - 2024 «Энергетика и цифровая трансформация» : Материалы Международной молодежной научной конференции, Казань, 24–26 апреля 2024 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2024. – С. 183-185.

15. Арсланов А.Д., Кашаев Р.С., Козелков О.В. Контроль характеристик нефти в системе управления проточного ПМР-анализатора // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: Материалы XIV Всероссийской научно-технической конференции, Чебоксары, 06–08 июня 2024 года. – Чебоксары: Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, 2024. – С. 30-31.

16. Кашаев Р.С., Нгуен Д.А., Арсланов А.Д. Исследование причин и методы устранения искажений сигнала в передатчике ПМР релаксометра // Цифровые системы и модели: теория и практика проектирования, разработки и применения : Материалы национальной (с международным участием) научно-практической конференции, Казань, 10–11 апреля 2024 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2024. – С. 225-228.

17. Галиев А.Б., Арсланов А.Д., Козелков О.В., Кашаев Р.С. Методика и условия отбора глубинных и поверхностных проб // Инновационное развитие современной науки: новые подходы и актуальные исследования: сборник материалов Международной научно-практической конференции, Москва, 31 января 2024 года. – Москва: Автономная некоммерческая организация дополнительного профессионального образования «Центр развития образования и науки», 2024. – С. 60-64.

18. Арсланов А. Д., Овсеенко Г.А., Кашаев Р.С. Влияние шумов на измерения параметров протонной магнитной релаксации // Высшая школа: научные исследования: материалы Межвузовского международного конгресса, Москва, 13 октября 2023 года. – Москва: Инфинити, 2023. – С. 144-148.

1. ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ И СРЕДСТВ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ. НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ САМОДИАГНОСТИКИ ПИК

Материалы главы 1 опубликованы в работах автора [38-40]

Метод протонной магнитно-резонансной релаксометрии имеет большие, еще не раскрытые до конца возможности. В работах О. В. Козелкова, Р. С. Кашаева и его аспирантов [18-35] это было широко продемонстрировано на примере изучения свойств нефтяных дисперсных систем (НДС) – скважинной жидкости, нефтей, водонефтяных эмульсий, нефтепродуктов, сточных и поверхностных вод, загрязненных примесями (нефтью и солями металлов). Ими были разработаны методики проточного экспресс контроля большинства характеристик НДС лабораторными и портативными релаксометрами ПМР, а также программно-измерительными комплексами, в качестве которых использовались проточные ПМР-анализаторы, разработанные и описанные в диссертациях Козелкова О.В. и аспирантов профессора Кашаева Р.С.

К сожалению, в настоящий момент эти устройства не отвечают всем требованиям к надежности функционирования и достоверности измерений при автоматизированном экспресс-контроле характеристик НДС, предъявляемым для внедрения в работу на цифровых месторождениях нефти. Для решения данной проблемы становятся актуальными задачи реализации цифровой самодиагностики блоков и узлов ПИК перед измерениями параметров ПМР-релаксации, повышения надежности прибора, автоматизации обработки данных, дополнения существующего математического аппарата с зависимостями свойств нефти от ПМР параметров. Работа посвящена решению данных задач. Данные решения выводят отечественный анализатор на качественно новый уровень, что позволяет составить конкуренцию зарубежным аналогам и продвинуть развитие данного направления отечественного приборостроения.

1.1. Краткое описание явления ядерного магнитного резонанса

Возможности ПМР связаны с дипольным магнитным моментом ядер водорода (протонов) μ в молекулах нефти и воды (формулы (1.1) и (1.2)):

$$\mu = \gamma \hbar I \quad (1.1)$$

$$\gamma = \frac{\mu}{p} \quad (1.2)$$

где $\gamma/2\pi$ – гиромагнитное отношение ($\gamma/2\pi = 4254$ Гц/Гс для протонов);

p – механический момент ядра;

$\hbar$ – постоянная Планка; I – спин ядра.

Сумма всех магнитных моментов в образце образуют вектор макроскопической намагниченности M . При помещении образца в постоянное магнитное поле B_0 намагниченность M стремится ориентироваться вдоль B_0 , а при воздействии на магнитные моменты протонов переменным магнитным полем B_1 на частоте магнитного резонанса (обычно в диапазоне $\nu_0 \sim 3 \div 20$ МГц), намагниченность осуществляет эволюцию в суммарном поле, в результате которой поглощается электромагнитная энергия по формуле (1.3):

$$\nu_0(\text{Гц}) = \frac{\gamma B_0}{2\pi} = \frac{\omega_0}{2\pi} \quad (1.3)$$

где ω_0 – прецессионная (Ларморовская) частота [Гц].

Это и представляет собой явление ЯМР (ПМР). Параметры ЯМР коррелируют с характеристиками СКЖ и её компонентов. Результаты измерений не зависят от того, в каком состоянии находится образец: в расслоенном или однородном, непрозрачном, с механическими примесями (не содержащими протонов) или с газом. Для метода ЯМР не требуются реактивы и подготовки пробы, а требуемый для измерений объем обычно не превышает 15 мл.

Процесс установления равновесного значения вектора макроскопической намагниченности M вдоль поля называют продольной магнитной спин-решеточной релаксацией с временами спин-решеточной T_{1i} и спин-спиновой релаксации T_{2i} в

спиновой системе. Сама эволюция намагниченности описывается обобщенным уравнением Блоха (1.4):

$$\frac{dM}{dt} = \gamma[M, B] - \frac{e_x M_x}{T_2} - \frac{e_y M_y}{T_2} - \frac{e_z (M_z - M_0)}{T_1} \quad (1.4)$$

$$M_0 = \frac{(I + 1)N_0\mu^2 B_0}{I \cdot 3kT} \quad (1.5)$$

где N_0 – число Авогадро;

k – постоянная Больцмана;

M_0 – результирующее значение намагниченности для составляющих M_i по осям x, y, z .

При импульсном воздействии на образец радиочастотного поля B_1 в течение времени действия импульса t_i вектор макроскопической намагниченности M повернется на угол $\theta = \gamma B_1 t_i$, и во вращающейся системе координат будет прецессировать вокруг данного поля. Можно теоретически показать, что оптимальной величиной радиочастотного поля B_1 является (1.6):

$$B_1 = \left(|\gamma| \sqrt{(T_1 T_2^*)} \right)^{-1}, \quad (1.6)$$

где T_1 – время спин-решеточной релаксации;

T_2^* – эффективное время спин-спиновой релаксации, которое характеризует неоднородность поля B_0 используемого постоянного магнита и определяется из выражения (1.7):

$$(T_2^*)^{-1} = (T_2)^{-1} + \frac{\gamma \Delta B_0}{2}, \quad (1.7)$$

Величина неоднородности постоянного магнитного поля ΔB_0 ведет к «распределению» частот $\Delta\omega = \gamma \Delta B_0$, и вносит погрешность в измерения и фиксацию резонансных условий.

Также в ходе исследования было выявлено, что в амплитуду сигнала ЯМР войдет M_0 и, следовательно, квадрат величины B_0 и резонансной частоты ν_0 . Следовательно, увеличение частоты приводит к увеличению полезного сигнала и отношения Сигнал/Шум, для которого справедливо уравнение:

$$C/\Pi = 10,47 \cdot 10^4 s n \omega_0 M_0 Q \eta / (\sqrt{(Z_0 \cdot \Delta \nu \cdot F)}) \quad (1.8)$$

где $\omega_0 = 2\pi\nu_0$ - прецессионная частота;

$M_0 = (I+1)N_0\mu^2B_0/3IkT$ - суммарная намагниченность, в которой N_0 – стационарная намагниченность и число спинов I в единице объема;

s - сечение катушки датчика;

n – число витков катушки;

k – постоянная Больцмана;

T – температура [K];

$\Delta\nu$ – полоса пропускания;

Z_0 – сопротивление контура на резонансной частоте ν_0 ;

F – шум-фактор приемника.

Отсюда, для максимального значения С/Ш надо при облучении образца радиочастотными импульсами иметь максимальные: частоту резонанса, объем образца, добротность и коэффициент заполнения [13].

Для исследования ФХС в НДС установлено, что оптимальным способом ЯМР-анализа проб является методика, включающая в себя подачу измерительной последовательности Карра-Парселла-Мейбум-Гилла (КПМГ) на анализируемые образцы. Последовательность КПМГ состоит из серии РЧ-импульсов, поворачивающих намагниченность спинов на 90 и 180 градусов, чтобы затем получить серию сигналов спин-эхо пробы. Как показано на рисунке 1.1, в данном методе на катушку индуктивности в датчике ЯМР для этого сначала подается 90-градусный нутационный импульс, а затем идет последовательность 180-градусных [15, 16, 41]. Нутационный импульс вызывает прецессию вектора намагниченности вокруг оси действующего магнитного поля и изменяет ориентацию намагниченности вектора спинов, что позволяет устранять ошибку неточности установки длительности импульса и устранить влияние самодиффузии. Период сигнала и время подачи импульсов последовательности КПМГ обозначаются на рисунке, соответственно, как τ_1 и τ_2 .

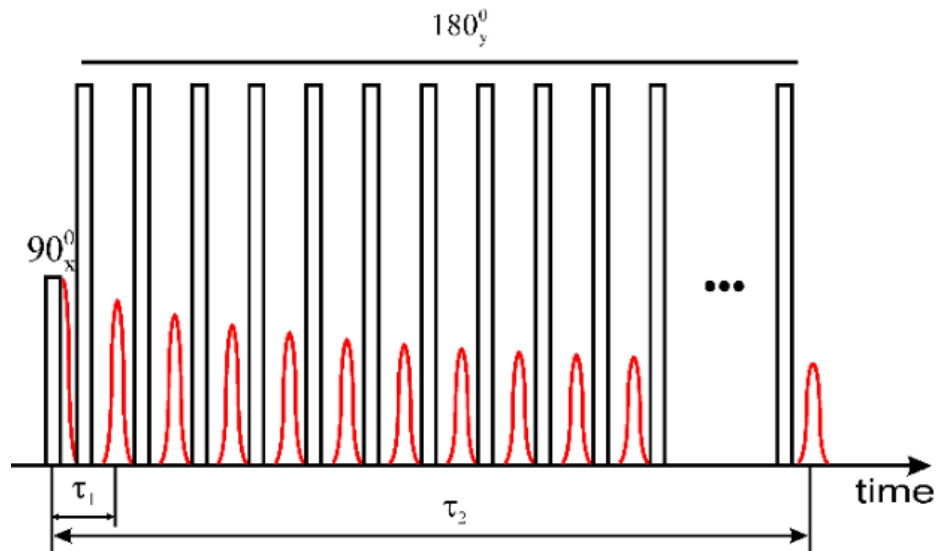


Рисунок 1.1 - Последовательность $\pi/2$ и π -импульсов КПМГ после амплитудного детектирования

На рисунке 1.2 представлено графоаналитическое разложение огибающей сигналов спин-эхо, полученное с применением методики КПМГ в стандартном лабораторном образце, где амплитуды приведены в логарифмическом масштабе.

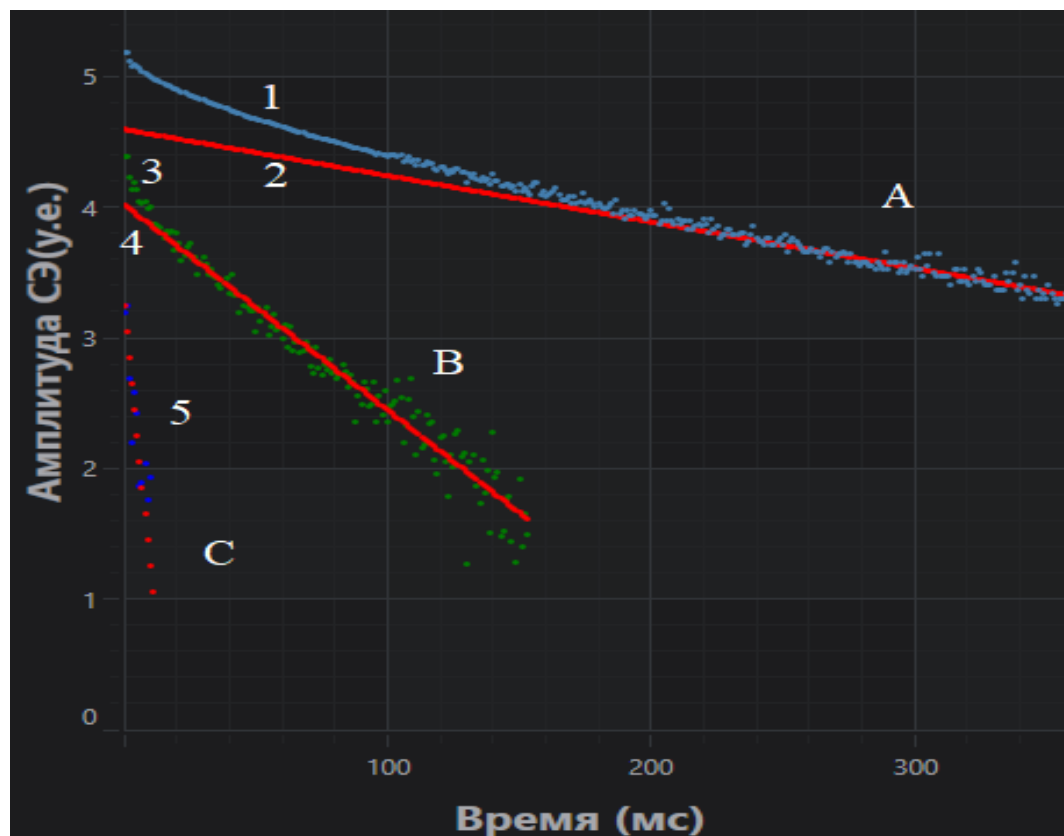


Рисунок 1.2 - Разложение огибающей сигналов спин-эхо стандартного образца

Между π -импульсами образуется сигнал спин-эхо (СЭ), и если спиновая система состоит из ядер одного сорта, но с отличающимися временами релаксации T_{2i} протонных фаз A , B и C , то огибающая амплитуд СЭ определяется суперпозицией i экспонент, описываемой уравнением (1.9):

$$A_e = \sum A_{0i} e^{\frac{-t}{T_{2i}}} \quad (1.9)$$

где A_e - амплитуда сигналов спин-эхо;

A_{0i} - в относительных единицах соответствует относительному числу протонов фаз разной степени упорядоченности;

T_{2i} -времена спин-спиновой релаксации.

Индекс i относится к протонным фазам, обозначенным как A , B , C и имеющим свои амплитуды A_i и времена релаксации T_{2i} , убывающие от A до C . После детектирования, разложение огибающей сигналов спин-эхо в нефти на рисунке 1.2: Кривая 1 – экспериментальные точки амплитуд сигналов СЭ; 2 – их аппроксимация линейной зависимостью, соответствующая наиболее длинным временам релаксации фазы A ; 3 – Фаза B , полученная как результат вычитания прямой 2 из экспериментальной кривой 1; 4 – аппроксимированная кривая для фазы B ; 5 - результат вычитания прямой 4 из кривой 3 (Фаза C). Хотя спин-система характеризуется также временами спин-решеточной релаксации T_{1i} (продольной вдоль B_0), мы используем T_{2i} , так как время его измерения в десятки раз меньше времени измерения T_{1i} . Кроме того, T_{2i} более чувствительно к медленным молекулярным движениям в ассоциатах – структурных единицах (СЕ), всегда присутствующих в нефти, что позволяет исследовать их по поведению параметров наиболее коротковременной протонной фазы C . Используемый термин «структурная единица» (СЕ) широко признан и принят в научной литературе [42].

В методе ПМР-релаксометрии пробоподготовка практически отсутствует, методические ошибки минимизируются градуировкой по лабораторным и стандартным образцам (из ВНИИР им. Д.И. Менделеева), что позволяет проведение быстрых измерений (время измерения максимум 5 минут при количестве измерений $n = 10$ для воды с $T_1 = 2.2$ сек) с обработкой данных аппроксимацией кривых при

высоких коэффициентах корреляций R^2 и минимальных среднеквадратических отклонениях (СКО).

Исследования температурных зависимостей практически всех образцов: бензина, тяжелых нефтей НГДУ «Джалильнефть», Зузеевских нефти, мазута и битума, а также тяжелой смолы пиролиза - показали, что во всех них обнаруживается полиэкспоненциальность огибающей сигналов СЭ с тремя (а для легких топлив - двумя) временами релаксации T_{1A} , T_{1B} , T_{1C} и T_{2A} , T_{2B} , T_{2C} , соответствующими группам протонов с разной молекулярной подвижностью. Даже для депарафинированного дизельного топлива (ДТ) наблюдается два времени T_{2A} и T_{2B} , хотя его принято рассматривать как молекулярный раствор. Во всем температурном диапазоне выполняется соотношение $T_{2A,B,C}$ меньше T_1 .

Населенность протонов P_C наименее молекулярно-подвижной фазы C пропорциональна концентрации асфальтенов с максимальным содержанием серы S . Асфальтены же в свою очередь формируют ядро структурных единиц (СЕ) – молекулярных ассоциатов, определяющих вязкость, плотность, молекулярную массу и другие физико-химические свойства НДС. В соответствии с этими положениями, вводятся понятия протонных фаз A , B и C , условно относимых:

A - к дисперсионной среде легких алканов и нафтенос с наибольшей молекулярной подвижностью CH_3 - и CH_2 -цепочек, которые могут входить в состав соединений серы, например, меркаптанов $R-SH$ (протонная фаза A);

B - к среде сольватной оболочки СЕ, состоящей в основном из смол, имеющих в своей структуре гетероатомы серы S ;

C - к фазе протонов на поверхности асфальтенового ядра СЕ, в которую входят полиароматические сернистые соединения.

Эти деления довольно условны, поскольку, например, протоны высокоподвижных фрагментов молекул сольватной оболочки и поверхности ядра СЕ, относящиеся к смолам и асфальтенам, могут давать небольшой вклад в протонные фазы A и B .

Параметры T_{2C} и A_{0C} относятся к наименее подвижным полиароматическим углеводородам, связанным серой. Поскольку сера S – наиболее агрессивный

компонент нефти, приводящий к коррозии оборудования для управления процессами подготовки, переработки и контроля нефти, очень важно иметь информацию об уровне её концентрации в НДС. В связи с этим необходимо разработать методики проточного экспресс-контроля содержания серы для принятия мер по её удалению и нейтрализации, что обеспечит высокий уровень надежности соответствующего оборудования.

1.2. Параметры надежности аппаратуры

Параметры, относящиеся к понятию надежности, нормируются стандартом Российской Федерации «Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности» ГОСТ 27.003–2016. Терминология определяется ГОСТ Р 27.102–2021 «Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения».

Надежность объекта - комплексное свойство, отображающее в общем случае безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость технического объекта.

Ремонтпригодность - свойство объекта, заключающееся в его приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособности объекта путем технического обслуживания и ремонта.

Отказом называется событие, заключающееся в нарушении работоспособности состояния объекта.

Наработкой называется продолжительность или объём работы объекта. Различают *наработку до отказа* (от начала эксплуатации до первого отказа) и *наработку между отказами* (от восстановления после предыдущего отказа до следующего отказа).

Техническое диагностирование — это процесс определения технического состояния объекта. Основными задачами технического диагностирования являются: контроль технического состояния; поиск места и определение причин отказа (неисправности); прогнозирование технического состояния.

Надежность контрольно-измерительных приборов (КИП), в нашем случае, программно-измерительного комплекса (ПИК) ПМРА-IV, 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, обеспечивается:

- а) защитой схемотехники от перегрузок и коротких замыканий;
- б) возможностью отключения части оборудования для диагностики/ремонта;
- в) резервированием наиболее ответственных элементов ПИК.

Резервирование – способ обеспечения надежности объекта за счет использования дополнительных средств сверх минимально необходимых. Резервирование может быть *общим*, когда резервируется система в целом, и *раздельным* (поэлементным) для отдельных элементов системы. Резервирование производится резервными элементами, которые могут выполнять функции основных элементов при их отказе.

Резервирование замещением осуществляется введением в структуру аппаратуры дополнительных элементов, выполняющих функции основных при их отказе. Основным параметром является кратность резерва — отношение числа резервных и основных элементов.

Функциональное резервирование осуществляется использованием свойств системы, обеспечивающих безотказное функционирование при отказах элементов за счёт перераспределения функций и более интенсивной работы элементов.

Временное резервирование даёт системе возможность израсходовать резервное время для восстановления технических характеристик. Резерв времени создаётся за счёт увеличения: времени на выполнение задания; запаса производительности отдельных устройств; увеличения быстродействия элементов.

Нагрузочное резервирование, которое заключается в создании запасов способности элементов выдерживать дополнительные нагрузки или введении дополнительных защитных и разгружающих элементов.

Надежность работы данного электрооборудования и его схмотехники также определяется исправностью контактных элементов, которые работают в широком диапазоне нагрузок, помех и шумов. ПИК на базе ПМР-анализатора из-за наличия высоких импульсных напряжений также требует использования искробезопасных цепей. Помимо вышеописанных средств обеспечения надежности оборудования в ПИК так же предлагается ввести средства самодиагностики электронных узлов комплекса. О них будет сказано в главе 2.

Роль диагностики и самодиагностики в обеспечении надежности аппаратуры ПИК. К важнейшим методам повышения надежности приборов относят диагностику и самодиагностику, целью которых является определение работоспособности измерительного комплекса в целом, выявление дефектов отдельных его узлов и компонентов, а также прогнозирование их развития. На основании диагностики делается вывод о соответствии ПИК техническим условиям, а также определяются меры по его восстановлению и прогнозируется изменение технического состояния элемента системы. Целью прогнозирования является своевременное обнаружение неблагоприятного состояния оборудования, принятие мер по ремонту и повышению надежности при накоплении повреждений, старении и изнашивании.

1.3. Влияние электромагнитных шумов и помех на качество работы ПИК.

Определение исправности работы ПИК диагностикой уровня электромагнитных шумов собственными средствами релаксометра ПМР

Анализ современной научно-технической литературы показал, что одним из наиболее перспективных направлений в диагностике эксплуатационного ресурса электронного оборудования является исследование на базе определения характера низкочастотных $1/f$ (фликкерных) шумов, которые имеют влияние при диагностике блоков релаксометра ПМРА-IV. Причиной их возникновения являются дефекты радиоэлементов. Сравнивая уровень $1/f$ -шума однотипных компонентов, можно оценить их относительную надежность [43, 44].

В области низких частот плотность шума возрастает с уменьшением частоты. $S(f)$ — спектральная плотность $1/f$ -шума определяется уравнением (1.10):

$$S(f) = \frac{S_1}{f^\alpha} \text{ [Вт/Гц]} \quad (1.10)$$

где S_1 спектральная плотность на частоте 1 Гц;

α — является коэффициентом уравнения, который варьируется в диапазоне от 0,8 до 1,4.

Соответственно мощность $P_{1/f}$ шума в Ваттах между частотами f_1 и f_2 , которая выделяется на сопротивлении 1 Ом, можно вычислить по формуле:

$$P_{\frac{1}{f}} = S_1 \int_{f_1}^{f_2} \frac{df}{f^\alpha} \quad (1.11)$$

Часто полагают, что $\alpha = 1$, тогда выражение (1.11) получит вид (1.12):

$$P_{\frac{1}{f}} = S_1 \int_{f_1}^{f_2} \frac{df}{f} = S_1 \ln \left(\frac{S_2}{S_1} \right) \quad (1.12)$$

Любая частотная декада $1/f$ -шума имеет равную мощность. Например, мощности $1/f$ -шума в диапазоне 0,01–0,1 Гц и 1–10 Гц равны.

В отличие от традиционных способов контроля электронных элементов, диагностика по фликкерным шумам позволяет значительно сократить затраты, а также деструктивное воздействие на испытываемые образцы во время тестирования изделий из-за отсутствия необходимости подвергать электронику длительным критическим воздействиям. Сигнал, соответствующий $1/f$ шуму, также содержит нестационарную во времени компоненту. Во многих случаях именно эта компонента наиболее информативна для диагностики потенциальной надежности и внутренних дефектов. Поэтому для анализа $1/f$ -шума целесообразно использовать частотно-временное представление сигнала.

Одной из форм шумов, влияющих на точность и надежность работы аппаратуры, является наличие паразитных наводок по цепям питания и заземления. Наводка от сети 50 Гц имеет спектр в виде пика (или ряда пиков), а шум грозовых разрядов имеет широкий спектр и всплески амплитуд. Другим источником помех

являются радио- и телепередающие станции, окружающие ПИК и работающие на частотах, близких к мегагерцовому диапазону. От них защищаются экранированием.

Снижение уровня среднеквадратического значения (СКЗ) шума производят путем временного усреднения, поскольку основные виды шумов в электронике имеют нормальное распределение и нулевое математическое ожидание. Временное усреднение осуществляется ограничением полосы пропускания канала усиления сигнала. Уменьшение полосы пропускания, например, в 4 раза снижает СКЗ шума в 2 раза, как это показано в формуле (1.8).

Диагностические свойства низкочастотных шумов. Диагностика электрических флуктуаций является одним из эффективных методов неразрушающего контроля многих видов оборудования электронной техники и автоматики [43]. НЧ-шум (НЧШ $f < 10^6$ Гц) возникает в структуре или контактах электронных компонентов в процессе их работы. Спектральная плотность шума здесь имеет прямую зависимость от протекающего тока и обратна частоте, что дает возможность косвенного определения внутренних дефектов элементов. Проводимость резистивного слоя и НЧ шумы зависят от флуктуаций проводимости, которые, можно рассмотреть с применением уравнений Максвелла:

$$\operatorname{div}(\sigma \mathbf{E}) = 0, \mathbf{E} = -\operatorname{grad} \varphi \quad (1.13)$$

где σ - удельная проводимость образца;

E - напряженность электрического поля;

φ - потенциал электрического поля.

Удельная проводимость образца σ зависит от пространственной неоднородности и температуры, средней по образцу удельной статической проводимости σ_0 , прямой омической проводимости $\xi(\mathbf{r})$ и относительной флуктуационной составляющей проводимости $\zeta(\mathbf{r}, t)$ по формуле (1.14):

$$\sigma(\mathbf{r}, t) = \sigma_0 [1 + \xi(\mathbf{r}) + \zeta(\mathbf{r}, t)] \quad (1.14)$$

Можно представить $\xi(\mathbf{r})$ и $\zeta(\mathbf{r}, t)$ согласно формулам (1.15) и (1.16):

$$\xi(\mathbf{r}) = \frac{\sigma(\mathbf{r})}{\sigma_0} - 1, \quad (1.15)$$

$$\zeta(\mathbf{r}, t) = \frac{[\sigma(\mathbf{r}, t) - \sigma(\mathbf{r}, t)]}{\sigma_0}. \quad (1.16)$$

Общих методов решений этих уравнений нет, но из-за небольшого значения параметров можно их решать методом малых возмущений.

Диагностика работы оборудования по шумам. Общая схема, по которой проводится диагностика релаксометра в составе ПИК методом определения интенсивности излучения электромагнитных шумов представлена на рисунке 1.3.

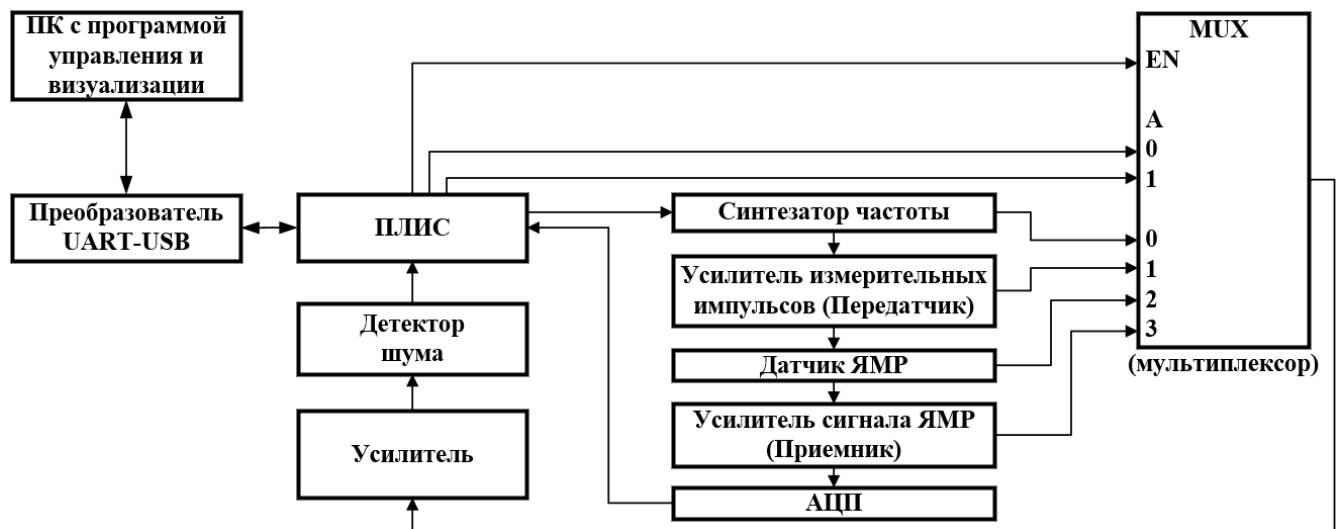


Рисунок 1.3 - Общая схема для самодиагностики релаксометра ПИК методом определения избыточного уровня электромагнитных шумов его компонентов

При проведении диагностики данным методом возможно определение исправности всей основной цепи релаксометра, содержащей в себе узлы, необходимые для формирования ПЛИС измерительных последовательностей импульсов методики ПМР и элементы измерительного канала. При определённом режиме работы, в интерфейсе программы управления релаксометром элемент программы, отображающий уровни сигналов спин-эхо ПМР, будет показывать значение шумов в условных единицах, которое должно быть сверено с эталонными данными. При возникновении большой разницы между этими значениями следует говорить о наличии неисправности в основной рабочей цепи релаксометра. Простейшим способом определения мультипликативных шумов в методе ЯМР

является применение нескольких измерений сигнала спада свободной индукции (ССИ) после одного РЧ-импульса в образце с большим сигналом спин-эхо (СЭ) [45].

Помимо этого, имеется возможность поэлементного анализа состояния релаксометра, которое обеспечивается отдельным детектором шума и усилителем. Здесь смена исследуемого компонента обеспечивается применением в схеме мультиплексора.

1.4. Физика отказов и надежность радиоэлектронной аппаратуры

Предметом исследований физики отказов является установление причинно-следственных связей, определяющих причины и существо процессов, приводящих к отказам радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). При работе РЭА происходят изменения и колебания нагрузок, электрических параметров, температур, степени загрязнения поверхностей и др. Так же сами элементы РЭА могут быть выполнены с различными допусками на технологические параметры (точность, однородность материала и др.). Целью данного направления является выработка мер по выявлению и подавлению причин, вызывающих отказы при разных режимах и условиях.

Отказы в работе электроустановок и РЭА как случайные события подчиняются разным законам распределения во времени t . Основные из этих законов: экспоненциальный, нормальный, логарифмический и закон распределения Вейбулла.

Наиболее типичному, экспоненциальному закону распределения подчиняются отказы элементов РЭА малой мощности: диоды, транзисторы, конденсаторы, интегральные микросхемы. Экспоненциальный закон является однопараметрическим, с постоянной интенсивностью отказов $\lambda = \text{const}$. Распределение вероятности безотказной работы во времени $P(t)$ и средняя наработка до отказа $T_{\text{ср}}$ в этом случае описываются выражениями (1.17) и (1.18):

$$P(t) = e^{(-\lambda t)}, \quad (1.17)$$

$$T_{\text{CP}} = \frac{1}{\lambda} \quad (1.18)$$

Распределение Вейбулла используется для оценки надежности мехатронных узлов и элементов РЭА. Это двухпараметрическое распределение, включающее параметр λ_o , определяющее масштаб и параметр асимметрии k . При $k = 1$ распределение имеет экспоненциальный характер, при $k > 1$ интенсивность отказов растет, при $k < 1$ интенсивность отказов падает по закону, близкому к гиперболическому.

Надежность электронных элементов постоянно растет. Сейчас средняя надежность различных типов резисторов и конденсаторов составляет порядка 10^{-8} ч^{-1} . Параметр минимальной надежности для реле равен $5 \cdot 10^{-7} \text{ ч}^{-1}$, а для коммутаторов - $3 \cdot 10^{-9} \text{ час}^{-1}$, для различных интегральных логических схем - $1..3 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$ [46].

1.4.1. Отказы и предвестники отказов РЭА

Типичные отказы выявляются диагностическими моделями, которыми устанавливается априорное распределение вероятностей отказов по видам дефектов P_j . Здесь необходимо определить дисперсии их ошибки D_n . *Случайные отказы* – отказы, возникающие в случайный момент времени, которые являются результатом одного или нескольких возможных механизмов ухудшения характеристик в аппаратных средствах [47]. Тут достоверность установления причин отказов крайне низка. Поэтому используют все пути повышения достоверности. Наряду со *случайными* отказами имеются и *закономерные*, поэтому к категории надежности надо, кроме *безотказности*, характеризующей надежность на этапе эксплуатации, причислять *долговечность* и *сохраняемость*, отражающие заложенные физические возможности аппаратуры, а также *ремонтпригодность*. К отказам надо относить не только потерю работоспособности РЭА, но и уход параметров за пределы, установленные техническими условиями, т. е. *параметрический отказ*.

Предвестниками отказов являются процессы, создающие сигналы, по которым можно говорить о появлении в электронном элементе деградиационных процессов или неисправностей. К числу таких относят экзоэмиссионные эффекты, изменения спектров излучения, появление интенсивных электромагнитных шумов и др. Знание предвестников отказов позволяет обеспечивать высокую надежность использованием неразрушающих методов анализа, включением резервных элементов и проведением профилактических работ.

Если начальное распределение запаса прочности $f(\Delta x)$ и скорость изменения запаса прочности $d\Delta x/dt$ определены для каждого n -го критического элемента РЭА, то вероятность безотказной работы платы и аппаратуры РЭА P в целом будет вычисляться по формуле (1.19):

$$P_{\Sigma(t)} = \prod_{i=1}^n \int f_i(\Delta x_i) \left(\frac{d\Delta x}{dt} \right) dt \quad (1.19)$$

где $f_i(\Delta x_i)$ - плотность распределения запаса прочности;

Δx_i - i -я составляющая запаса прочности.

Произведение $\prod_i$ ведется по числу составляющих $i = 1 \div n$, интегрирование – от момента времени t до ∞ .

Для выявления отказов рекомендуются испытания на старение при повышенных температурах, при повышенной токовой нагрузке и в динамическом режиме при повышенной частоте переключений.

Физико-математическая модель отказа ИМС позволяет описать её как совокупность элементов структуры, имеющих свой механизм отказа. Знание видов отказов ИМС и её структуры позволяет соотнести определенный механизм отказа со структурой. По исследованиям механизмов отказа и режимов работы ИМС можно определить скорости отказов каждого i -того элемента ИМС по формулам (1.20) и (1.21):

$$\frac{dQ_i}{dt} = \left(\frac{dQ_i}{\Delta dx_i} \right) \left(\frac{d\Delta x_i}{dt} \right), \quad (1.20)$$

$$\lambda_i = \frac{[(dQ_i/\Delta dx_i)(d\Delta x_i/dt)]}{\int [(dQ_i/\Delta dx_i)(d\Delta x_i/dt)] dt} \quad (1.21)$$

где $dQ_i/\Delta dx_i = f(\Delta x_i)$ – плотность распределения запаса прочности по данному механизму;

$d\Delta x_i/dt$ – скорость деградации, зависящая от кинетики реакции, внешних факторов и режима работы ИМС;

λ – интенсивность отказов.

Интенсивность отказов общая определяется как сумма интенсивностей отказов отдельных элементов (1.22):

$$\lambda \Sigma(t) = \Sigma \lambda_i(t) \quad (1.22)$$

где $i = 1 \div n$.

На основе модели рассчитываются надежность и предельные показатели надежности ИМС в зависимости от заданного режима работы, условий и распределения отказов по видам, а также условий приемо-сдаточных испытаний.

1.4.2. Отказы полупроводниковых приборов и влияние помех

Отказы полупроводниковых приборов (п/п) по внешним проявлениям делятся на короткие замыкания, обрывы и изменения параметров п/п. Основным механизмом короткого замыкания является термоэлектрический пробой, который можно предотвратить использованием радиаторов. Процессы концентрации тепловой мощности в структуре и развития отказа определяются термоэлектрической обратной связью, которая в структурах с электронно-дырочными переходами обусловлена эффектом Пельтье. Обрывы возникают при электрохимической коррозии контактов, когда имеется достаточное количество осевшей влаги. Поэтому испытания п/п рекомендуется проводить при повышенной температуре и влажности. Разрушение контактов разнородных металлов происходит также при образовании интерметаллических соединений или фазовых переходов в зоне контактов, при повышенных температурах.

Помимо отказов, на правильную работу оборудования также влияет устойчивость устройства к помехам. Уменьшение габаритов, увеличение плотности ИМС и монтажа привело к усилению влияния паразитных емкостей и

индуктивностей между контурами цепей питания и линиями передач сигналов. Сами п/п и ИМС являются источниками помех. Так, при переключении цифровых ДТЛ или ТТЛ-схем с распределенной индуктивностью 1 мкГн возникает импульсная помеха с амплитудой 5 В и длительностью 4–5 нс, которая может искажать сигналы в цифровых элементах. На промышленных предприятиях наблюдается высокий уровень помех от оборудования и переходных процессов. В сетях питания переменного тока возникают импульсные помехи со средней вольт-секундной площадью $20 \cdot 10^{-6}$ В·с. Вероятность сбоя $P_{сб}$ РЭА описывается как:

$$P_{сб} = \int \alpha(t) \int \gamma(U) dU dt \quad (1.23)$$

где $\alpha(t)$ и $\gamma(U)$ – распределения длительностей и амплитуд импульсов помех.

Интенсивность сбоев $P_{сб}$ дискретных устройств не должна превышать 10^{-5} ч⁻¹. Требуемое значение $P_{сб}$ можно обеспечить за счет подавляющего воздействия на амплитудные или временные характеристики помех.

Меры по обеспечению помехозащищенности ПИК. Для подавления помех от переключений реле, переходных процессов при пуске электродвигателя, электрических разрядов в аппаратуре или вблизи нее, а также высокочастотных полей необходима тщательная проработка цепей заземления, экранирования, топологии и питания печатных плат с учетом характеристик ИМС. Интегральные микросхемы имеют высокое входное и малое выходное сопротивления. Электромагнитные помехи могут просачиваться в них по шинам питания. Для уменьшения восприимчивости аппаратуры необходимо:

1. Максимально применять развязку по цепи питания, подключая ферритовые трансформаторы развязки между каскадами усиления и отдельными группами микросхем;
2. Выбирать достаточную ширину проводников шин питания на плате;
3. Шина «земля» не должна использоваться для передачи мощности. Шины «земля» и «общий» необходимо соединять в одной точке. Иначе образуется замкнутый контур, излучающий помехи в схему.

4. Питать цепи с высоким энергопотреблением от отдельного источника. В этом случае переменные составляющие их тока питания не будут воздействовать на маломощные логические схемы.

5. Применять резисторы и конденсаторы с допуском параметров не более $\pm 1\%$. Исключение могут составлять резисторы утечки и конденсаторы блокирующих цепей. По окончании разработки следует изучить влияние изменения параметров компонентов на работу схемы.

Если указанные меры не дают желаемого эффекта, можно применить фильтрацию сетевого напряжения и экранирование. Корпуса из металла или с проводящим покрытием в значительной степени ослабляют внешние помехи. Окна, образуемые индикаторами, шкалами или измерительными приборами, можно закрыть медными экранами. Фильтры сетевого напряжения необходимо согласовать с аппаратурой.

Надежность и достоверность работы микроконтроллеров существенно определяется их помехозащищенностью по отношению к внешним и внутренним, случайным и регулярным помехам. От правильного решения задач обеспечения помехоустойчивости микроконтроллеров зависят как сроки разработки программного обеспечения, изготовления и наладки, так и нормальное их функционирование в процессе эксплуатации.

1.5. Резервирование систем и расчет параметров надежности ПИК

Структурной надежностью системы называется результирующая надежность всех входящих в нее блоков или элементов. Структурные схемы надежности систем бывают следующих типов:

С последовательным *соединением элементов*, когда отказ одного элемента вызывает отказ другого, а затем третьего и отказ всей системы.

Схемы с параллельным соединением, чаще всего применяемые на практике. Они построены так, что отказ системы возможен лишь в случае, когда отказывают все ее элементы, т. е. система исправна, если исправен хотя бы один ее элемент.

Такое соединение называют *резервированием*, которое в большинстве случаев оправдывает себя, несмотря на увеличение стоимости оборудования. Наиболее выгодным является резервирование критических элементов, влияющих на работу.

Если надежность отдельных x_i узлов $p_1(x_1), p_2(x_2), \dots, \dots, p_n(x_n)$, то надежность системы P при *последовательном* соединении узлов по формуле (1.24) будет равна:

$$P(X) = p_1(x_1) \cdot p_2(x_2) \cdot \dots \cdot p_n(x_n) = \prod_{i=1}^n p_i(x_i) \quad (1.24)$$

При *параллельном* соединении элементов в m параллельных ветвях результирующая вероятность отказа системы Q будет равна сумме вероятностей отказов отдельных элементов q_i (1.25):

$$Q(X) = q_1(x_1) \cdot q_2(x_2) \cdot \dots \cdot q_n(x_n) = \prod_{j=1}^m q_i(x_i) \quad (1.25)$$

Результирующая вероятность безотказной работы будет равна формуле (1.26):

$$P(X) = 1 - \prod_{j=1}^m q_i(x_i) = \prod_{j=1}^m (1 - p_i) \quad (1.26)$$

Рассмотренный тип параллельного резервирования называется *резервированием с полной кратностью*. Если надежность всех блоков одинакова и равна p , то надежность параллельной группы из m цепей будет равна:

$$P_{\Gamma} = 1 - q^m \quad (1.27)$$

Для всей группы n последовательно-параллельного соединения системы надежность P_c будет равна (1.28):

$$P_c = (1 - q^m)^n \quad (1.28)$$

Численное значение суммарного показателя надежности $R(x_1, \dots, x_n)$ зависит от числа резервных элементов $R(x_i)$, в данной i -й подсистеме $R_i(x_i)$, то есть формула (1.29):

$$R(x_1, \dots, x_n) = R\{R_1(x_i), \dots, R_n(x_n)\} \quad (1.29)$$

Набор чисел $x_1, \dots, x_n$ называют вектором состава резервной системы и обозначают $X(x_1, \dots, x_n)$. В дальнейшем будем рассматривать $R(x_1, \dots, x_n)$ через

показатели надежности подсистем и узлов по выражению (1.30):

$$R(X) = R_1(x_1) \cdot R_2(x_2) \cdot \dots \cdot R_n(x_n) = \prod_{i=1}^n R_i(x_i) \quad (1.30)$$

Вычисление времени безотказной работы элемента ПИК. Пусть время работы τ невосстанавливаемого элемента (например, интегральной микросхемы) - случайная величина, и в момент времени $t = 0$ элемент начинает работать, а в момент $t = \tau$ происходит его отказ. В качестве основного показателя надежности элемента можно назвать функцию распределения надежности, которая описывается формулой (1.31):

$$F(t) = P(\tau, t) \quad (1.31)$$

Графически функция надежности - монотонно убывающая кривая.

Вероятность безотказной работы испытываемых элементов ПИК определяется по формуле (1.32):

$$P(t) = \frac{N - n}{N} = \frac{n_0}{N} \quad (1.32)$$

где n - число отказавших элементов за время t ,

n_0 - число исправных элементов в момент времени t ;

N - начальное число элементов, поставленных на испытания.

Величина $P(t)$ и вероятность появления отказа $F(t)$ в момент времени t связаны соотношением (1.33):

$$P(t) + F(t) = 1 \quad (1.33)$$

Откуда $F(t) = 1 - P(t)$ или по (1.34):

$$F(t) = 1 - \frac{n_0}{N} \quad (1.34)$$

Производная функции по времени может быть вычислена как:

$$\frac{dP(t)}{dt} = - \frac{\left(\frac{1}{N}\right) dn}{dt} \quad (1.35)$$

При $dt \rightarrow 0$, это выражение является мгновенным значением плотности распределения времени безотказной работы $f(t)$, т. е. $(1/N)dn/dt \rightarrow f(t)$ или:

$$\frac{dP(t)}{dt} = - f(t) \quad (1.36)$$

Учитывая, что $P(t) = n_0/N$, выражение (1.35) можно записать в виде:

$$\frac{dn(t)}{dt} = -\frac{NdP}{dt} = \frac{dn_0(t)}{dt} \quad (1.37)$$

Разделив обе части ур. (1.37) на $n_0(t)$, получим для интенсивности отказов $\lambda(t)$:

$$\frac{\left[\frac{1}{n_0(t)}\right] dn(t)}{dt} = -\frac{\left[\frac{N}{n_0(t)}\right] dP(t)}{dt} = \lambda(t), \quad (1.38)$$

Подставляя уравнение (1.36) в уравнение (1.38), получаем выражение для мгновенного значения интенсивности отказов [48]:

$$\lambda(t) = -\frac{\left[\frac{1}{P(t)}\right] dP(t)}{dt} \quad (1.39)$$

Вероятность безотказной работы из уравнения (1.39) можно представить как:

$$-\frac{dP(t)}{R(t)} = \lambda(t)dt \quad (1.40)$$

Интегрируя обе части уравнения по времени в интервале $[0, t]$, получаем:

$$R(t) \int \lambda(t)dt = -\int \left[\frac{1}{P(t)}\right] dP(t) \quad (1.41)$$

При известных начальных условиях $t = 0$, когда $P(t) = 1$, это интегральное уравнение принимает вид:

$$-\int \lambda(t)dt = \ln P(t) \quad (1.42)$$

Согласно уравнению (1.42), получаем выражение для вероятности безотказной работы:

$$P(t) = e^{-\int \lambda(t)dt} \quad (1.43)$$

С его помощью можно рассчитать вероятность безотказной работы элемента системы *при любом известном распределении времени наработки на отказ*.

Отказы оборудования, в основном, связаны с деградационными процессами. Они возникают вследствие электромиграции, химических реакций, эрозии и т. д. Константы скорости данных процессов k описываются уравнением Аррениуса:

$$k = Ae^{\left(-\frac{E_A}{RT_{\text{абс}}}\right)} \quad (1.44)$$

где A – константа;

E_A – энергия активации процесса;

R – универсальная газовая постоянная;

$T_{абс}$ – абсолютная температура [К].

Используя уравнение (1.44), можно рассчитать оставшееся время до отказа элемента по формуле (1.45):

$$t_{cp} = C e^{\left(\frac{E_A}{RT_{абс}}\right)} \quad (1.45)$$

где C – средний запас прочности.

Для определения констант *были проведены испытания* по нижеследующему алгоритму:

1. Измерялись времена отказа t_{01} и t_{02} при двух значениях температуры $T_{абс1}$ и $T_{абс2}$;

2. Рассчитывалась энергия активации E_A и константа C по формулам:

$$E_A = R(T_{абс1}^{-1} - T_{абс2}^{-1}) \ln \left(\frac{t_{01}}{t_{02}} \right), \quad (1.46)$$

$$C = t_{01} e^{\left(-\frac{E_A}{RT_{абс1}}\right)} \quad (1.47)$$

Реально оценить эти параметры можно для $2 \text{ эВ} > E_A > 0,5 \text{ эВ}$ (или $192,8 > E_A > 48,2 \text{ кДж/моль}$). Для больших значений E_A отказов будет очень мало, для меньших – оценки будут неточны. Результаты испытаний приводятся в главе 2.

Важнейшим показателем *невосстанавливаемого* элемента является *среднее время безотказной работы* (T_0), которое определяют как математическое ожидание случайной величины. После преобразования получим формулу (1.48):

$$T_0 = \int t f(t) dt = \int P(t) dt \quad (1.48)$$

где $f(t)dt$ – плотность распределения наработки до отказа.

Среднее время безотказной работы и среднюю наработку до отказа можно получить, подвергнув испытаниям N элементов с временами их жизни $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_N$. Статистическую дисперсию находят из выражения:

$$N_s^2 = \frac{1}{(N-1)} \sum (\tau_i - \tau)^2 \quad (1.49)$$

где $\tau = (1/N) \sum \tau_i$.

На практике для оценки надежности чаще используют среднее квадратическое отклонение СКО (σ), которое определяют как:

$$\sigma[\tau] = \sqrt{D[\tau]} \quad (1.50)$$

где D — дисперсия, т. е. второй центральный момент случайной величины.

1.6. Методы выявления отказов потенциально ненадежных элементов

На этапе анализа определяется, к какой группе можно отнести отказ: к случайным (дефектам из-за нарушений процессов, неправильной эксплуатации) или неслучайным отказам, т. е. присущим данному материалу или технологии.

Отказы первого вида позволяют оценивать *безотказность*, второго вида — *долговечность*. Так как зарождение и развитие отказа происходит в некоторой ограниченной области, можно выделить её, изучить структуру и механизм отказа. Рассмотрим методы на примере интегральных микросхем (ИМС).

Вероятность отказа Q выражается уравнением [49]:

$$Q = \int_{-\infty}^0 \int f(\Delta x) d\Delta x = \Phi \left[\frac{x - y}{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2)^{\frac{1}{2}}} \right] \quad (1.51)$$

где $f(\Delta x)$ — начальное распределение запаса прочности;

$\Delta x = (x - y)$ — запас прочности, как разность между прочностью и нагрузкой;

$\Delta x \leq 0$ — условие отказа;

Φ — функция вероятности Лапласа;

σ_x^2 — СКО распределений прочности;

σ_y^2 — СКО распределений нагрузки.

В результате процессов деградации элементов электронных блоков ПИК при внешнем воздействии запас прочности x от времени меняется в соответствии с уравнением (1.52):

$$\frac{dQ}{dt} = \left(\frac{dQ}{d\Delta x} \right) \left(\frac{d\Delta x}{dt} \right) = \frac{f(\Delta x) d\Delta x}{dt} \quad (1.52)$$

где $d\Delta x/dt$ — скорость изменения запаса прочности.

Большинство сложных мехатронных технических систем типа ПИК являются восстанавливаемыми, т. е. возникающие при эксплуатации отказы устраняются ремонтом. Технически исправное состояние систем поддерживают профилактическими и восстановительными работами. Однако, для осуществления работ требуются значительные затраты труда, материальных средств и времени. Эти работы подразделяют на техническое обслуживание и ремонт. Последнее подразделяют на профилактические работы, осуществляемые в плановом порядке, и аварийные, проводимые при отказах или авариях.

Ремонтопригодность ПИК влияет на материальные затраты и длительность простоев в процессе эксплуатации. Ремонтопригодность тесно связана с безотказностью и долговечностью изделий. Для изделий с высоким уровнем безотказности характерны низкие затраты труда и средств на обслуживание. Показатели безотказности и ремонтопригодности изделий являются составными частями комплексных показателей, таких как коэффициент технического обслуживания K_m и коэффициент готовности K_g (вероятность работоспособности изделия в произвольный момент времени).

К показателям надежности, присущим только восстанавливаемым элементам, следует отнести *среднюю наработку на отказ, наработку между отказами, среднее время восстановления*.

Другой важной характеристикой ремонтопригодности является коэффициент технического использования $K_{и}$, который представляет собой отношение наработки изделия за некоторый период эксплуатации к сумме этой наработки и времени всех простоев, обусловленных устранением отказов, техническим обслуживанием и ремонтами за данный период. $K_{и}$ - вероятность того, что изделие будет работать в надлежащем режиме за заданное время. Период эксплуатации, для которого определяется $K_{и}$, должен содержать все виды технического обслуживания и ремонтов. Коэффициент учитывает затраты времени на плановые и внеплановые ремонты и регламенты, и определяется как:

$$K_{и} = \frac{t_n}{t_n + t_b + t_p + t_0} \quad (1.53)$$

где t_n — суммарная наработка изделия в рассматриваемый промежуток времени;

t_b , t_p , t_o — соответственно, суммарное время на восстановление, ремонт и техническое обслуживание изделия за тот же период времени.

1.7. Интенсивность отказов и прогноз надежности в работе ПИК

Интенсивность отказа $\lambda(t)$ определяется по формуле (1.39). Тогда вероятность безотказной работы в интервале времени (t_1, t_2) выражается формулой (1.54):

$$P(t) = \exp \left\{ - \int_{t_1}^{t_2} \lambda(t) dt \right\} \quad (1.54)$$

Функция $\lambda(t)$ может быть определена по результатам испытаний.

Алгоритм определения интенсивности отказов. Пусть испытаниям подвергают N элементов и $n(t)$ — число элементов, не отказавших к моменту t . Тогда при малом Δt и большом N получим:

$$\lambda(t) = \frac{\Delta n}{[\Delta t n(t)]} \quad (1.55)$$

где Δn — число отказов на интервале времени Δt .

Так как период нормальной работы является основным, то в расчетах надежности принимается $\lambda(t) = \lambda = const$. В этом случае, при экспоненциальном законе распределения, функция надежности имеет вид:

$$P(t) = e^{(-\lambda t)} \quad (1.56)$$

Среднее время жизни от 0 до ∞ , соответственно, равно:

$$T_0 = \int_0^{\infty} e^{(-\lambda t)} dt = \frac{1}{\lambda} \quad (1.57)$$

Поэтому функцию надежности можно записать и так:

$$P(t) = e^{\left(-\frac{t}{T_0}\right)} \quad (1.58)$$

Если время работы элемента мало по сравнению с T_0 , то можно использовать приближенную формулу (1.59):

$$P(t) \approx 1 - \frac{t}{T_0} \quad (1.59)$$

Чтобы построить распределение отказов по видам дефектов, надо для отказавших изделий определить объем исследований оценкой неизвестной вероятности отказа по частоте его возникновения p^* в m независимых опытах. Число появления отказов в m опытах распределено по биномиальному закону [50]. Для определения требуемого числа исследований m используют уравнение (1.60):

$$m = \frac{t_\gamma^2 p^* (1 - p^*)}{(p - p^*)^2} \quad (1.60)$$

где t_γ - квантиль нормального распределения уровня доверительной вероятности γ ;
 $(p - p^*) = \Delta$ - абсолютная погрешность.

При прогнозировании надежности ПИК наиболее перспективны методы статистического моделирования, к которым относятся математическое и *физическое моделирование на стенде*. Чаще всего они применяются для схем автоматики по отказам, возникающим из-за постепенного расходования ресурса оборудования. Одной из задач при использовании физического моделирования является разработка математических моделей, аппроксимирующих случайный процесс изменения параметров элементов во времени [51].

Под физической моделью понимается действующий испытательный стенд ПМРА-IVпр, описанный в Главе 4, в котором можно изменять значения параметров элементов. Такая модель позволяет получать необходимые статистические данные во времени, по которым определяются показатели надежности.

1.8. Выводы по главе 1

По результатам обзора можно сделать вывод о необходимости:

1. Разработки нового метода и программно-технического обеспечения автоматизированного измерения характеристик нефти и нефтяных дисперсных систем (НДС) по параметрам ПМР-релаксации программно-измерительным комплексом ПМРА-IV. Также необходима отработка автоматизированной системы контроля характеристик нефти с использованием стенда ПМРА-IVпр.

2. Разработки недостающей автоматизированной методики измерения концентрации содержания серы в нефти.

3. Внедрения средств повышения надежности ПМРА-IV и реализации методов его самодиагностики по параметрам измерительной последовательности ПМР и определению интенсивности электромагнитных шумов его компонентов.

4. Внедрения средств резервирования отдельных узлов ПМР-анализатора для обеспечения высокой надежности и долговечности работы ПИК.

2. ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МЕТОДОВ САМОДИАГНОСТИКИ И РАСЧЕТОВ НАДЕЖНОСТИ ПРОГРАММНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ПМРА-IV

Материалы главы 2 опубликованы в работах автора [52-55].

2.1. Расчет параметров надежности элементов релаксометра ПМРА-IV

На рисунке 2.1 представлена функциональная схема основного измерительного блока релаксометра ПМРА-IV на базе ПЛИС EP2C5T144C8 [56]. Чтобы составить программу прогнозного расчёта его работоспособности, необходимо иметь числовые параметры надежности его основных элементов. Для расчёта параметров надежности релаксометра ПИК были использованы данные полученные по [57-62], представленные в таблице 2.1.

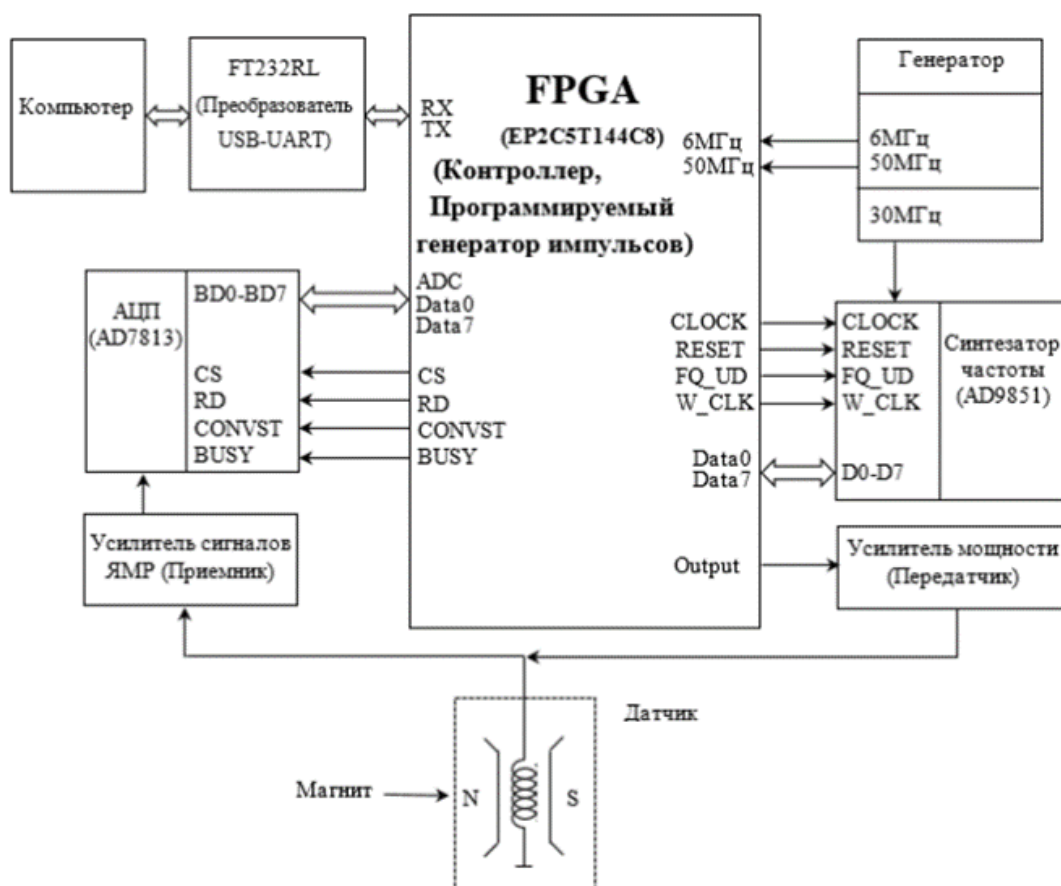


Рисунок 2.1 - Функциональная схема блока релаксометра ПМРА-IV

Таблица 2.1 – Данные для расчета параметров надежности релаксометра.

№	Наименование элемента	Наработка до отказа t_i , ч	Время восстановления (с учетом заказа, доставки, монтажа) t_{ei} , ч	Интенсивность отказов λ_i , ч ⁻¹
1	FT232RL	25000	72	$4 \cdot 10^{-5}$
2	AD7813	8000	216	$1,25 \cdot 10^{-4}$
3	AD9851	10000	216	$1,0 \cdot 10^{-4}$
4	EP2C5T144C8	5700	216	$1,75 \cdot 10^{-4}$
5	Приемник	1330	72	$7,52 \cdot 10^{-4}$
6	Передатчик	1330	72	$7,52 \cdot 10^{-4}$

Средняя наработка на отказ для релаксометра ПИК определяется как:

$$T_o = \left(\frac{1}{m}\right) \sum_{i=1}^m t_i \text{ [ч]} \quad (2.1)$$

где t_i — наработка элемента до i -го отказа;

m — число отказов в интервале суммарной наработки.

Среднее время восстановления после одного отказа в рассматриваемом интервале суммарной наработки:

$$T_B = \left(\frac{1}{m}\right) \sum_{i=1}^m t_{Bi} \quad (2.2)$$

где t_{Bi} — время восстановления i -го отказа.

Значения для компонентов релаксометра указаны в таблице 2.1.

Коэффициент готовности K_r является комплексным, так как он количественно характеризует одновременно безотказность и ремонтпригодность. В стационарном (установившемся) режиме эксплуатации K_r определяют по формуле (2.3):

$$K_r = \frac{T_o}{T_o + T_B} \quad (2.3)$$

В нашем случае $K_{r1}=0,989$, $K_{r2}=0,969$, $K_{r3}=0,9571$; $K_{r4}=0,9812$, $K_{r5}=0,9486$; $K_{r6}=0,9486$.

Расчет интенсивности отказов релаксометра ПИК. Предположим, что испытаниям подвергают N элементов и пусть $n(t)$ — число элементов, не отказавших к моменту t . Тогда при достаточно малом Δt и достаточно большом N используется формула:

$$\lambda(t) = \frac{\Delta n}{[\Delta t n(t)]} \quad (2.4)$$

где Δn — число отказов на интервале времени Δt .

В нашем случае: $\lambda_1 = 4 \cdot 10^{-5} \text{ ч}^{-1}$; $\lambda_2 = 1,25 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$; $\lambda_3 = 1,00 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$; $\lambda_4 = 1,75 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$; $\lambda_5 = 7,52 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$; $\lambda_6 = 7,52 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$.

Так как период нормальной работы ПИК является основным, то в расчетах надежности интенсивность отказа принимается $\lambda(t) = \lambda = \text{const}$. В этом случае, при экспоненциальном законе распределения, временная функция вероятности безотказной работы P зависит от самого уязвимого элемента и имеет вид:

$$P(t) = e^{(-\lambda t)} \quad (2.5)$$

Среднее время жизни от 0 до ∞ , соответственно, равно:

$$T_0 = \int_0^{\infty} e^{(-\lambda t)} dt = \frac{1}{\lambda} \quad (2.6)$$

Поэтому функцию надежности можно записать и так:

$$P(t) = e^{\left(-\frac{t}{T_0}\right)} \quad (2.7)$$

В нашем случае $P = e^{\left(-\frac{1000}{1333}\right)} \approx 0,47$.

Если время работы элемента t мало по сравнению с T_0 , то можно использовать приближенную формулу (2.8):

$$P(t) \approx 1 - \frac{t}{T_0} \quad (2.8)$$

Для определения требуемого числа исследований m отказавших изделий можно использовать уравнение (2.9):

$$m = \frac{t_{\gamma}^2 p^* (1 - p^*)}{(p - p^*)^2} \quad (2.9)$$

где t_{γ} - квантиль нормального распределения уровня доверительной вероятности γ ;

$(p - p^*) = \Delta$ – абсолютная погрешность;

p^* - частота возникновения отказов.

В нашем случае значение m оказалось равным 5.

Далее необходимо провести анализ количества отказов d_j однотипных изделий n_1 и определить частоту встречи в них дефектов j по формуле $p_{1j} = d_j/n_1$. Далее - найти требуемое число отказавших изделий n_{1T} , которые необходимо исследовать для достижения заданной достоверности γ и погрешности повторяющихся отказов Δ . В нашем случае получаем: $p_{1j} = d_j/n_1 = 2/10 = 0,2$, где за 1000 часов работы устройства успели выйти из строя микросхема *FT232RL* и транзистор *2ON06L* в составе передатчика релаксометра.

В результате проведения моделирования и нескольких испытаний при разных температурах получены значения вероятности безотказной работы P релаксометра ПИК для $t = 1000$ ч. Полученные данные отображены на рисунке 2.2.

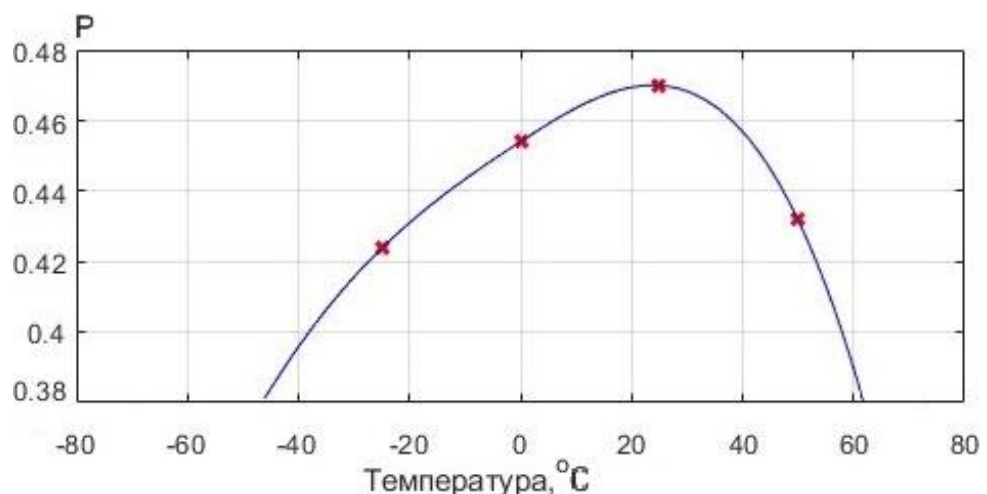


Рисунок 2.2 - Показатели надежности релаксометра ПИК при различных температурах для 1000 часов работы

По результатам исследования алгоритмов диагностики РЭА и электронных компонентов, можно сформулировать следующий общий алгоритм определения работоспособности комплекса:

- Проводятся испытания электронных компонентов для нескольких значений температуры окружающей среды. По результатам испытаний определяются

коэффициенты уравнения Аррениуса, которое позволяет найти средние значения времен до отказа испытуемых элементов. Для релаксометра ПИК при нормальных климатических условиях $T_{0,ср}$ будет равным 1890 ч.

- В процессе испытаний и расчетов для выборки приборов находится средняя наработка до отказа:

- 1) при -25°C среднее время до первого отказа $T_0 = 1000/(1-0,415) \approx 1700$ ч;
- 2) при 0°C среднее время до первого отказа $T_0 = 1000/(1-0,45) \approx 1800$ ч;
- 3) при 25°C среднее время до первого отказа $T_0 = 1000/(1-0,47) \approx 1890$ ч;
- 4) при 50°C среднее время до первого отказа $T_0 = 1000/(1-0,43) \approx 1750$ ч.

- По известным формулам (1.18, 1.22) получаем интенсивность и время отказов для выбранного значения вероятности.

Для релаксометра ПИК интенсивность отказов:

- 1) при -25°C будет равна $\lambda = 1/1700 \approx 5,8 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$;
- 2) при 0°C будет равна $\lambda = 1/1800 \approx 5,5 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$;
- 3) при 25°C будет равна $\lambda = 1/1890 \approx 5,3 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$;
- 4) при 50°C будет равна $\lambda = 1/1750 \approx 5,7 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$.

- Находится статистическая интенсивность отказов, которая для релаксометра ПИК оказалась равной 0,2.

2.2. Программа прогнозного расчета работоспособности программно-измерительного комплекса ПМРА-IV

Программа, написанная в среде *MatLab*, отображающая работоспособность программно-измерительного комплекса, в состав которого входят: источник питания, лабораторный релаксометр ПМР с персональным компьютером и программами управления, а также система пробоотбора и слива проанализированных образцов обратно в магистральную трубу нефтепровода – приводится ниже. Полученные в программе зависимости вероятности безотказной работы комплекса для различных его конфигураций приводятся на рисунке 2.3.

```

clc
clear all
close all
hold off

%Вероятности безотказной работы элементов
P1=0.47; %релаксометр без резервирования элементов;
P2=0.2;  %источник питания;
P3=0.95; %Электродвигатель, электромагн. катушка (упр.клапаном
P4=0.95; %слива), и пробоотборник для управления потоками жидкости.
P5=0.95;
Q1=1-P1;
Q2=1-P2;
Q3=1-P3;
Q4=1-P4;
Q5=1-P5;

%Общая P для схемы
P_i=2*P1*P2*P3*P4*P5-P2*P3*P4*P5-P1*P3*P4*P5-P1*P2*P4*P5-
P1*P2*P3*P5-P1*P2*P3*P4+P2*P3*P5+P1*P4*P5+P1*P3+P2*P4;
disp(P_i)
t=1000; %Время для которого справедливы данные P и Q
Lt= (log((P_i)))/t
t=[1:10000];
for i=[1:10000]
Pss(i)=exp(Lt*i);
Qss=1-Pss;
End

%Расчет с резервированием
P1=0.954;
P2=0.36;
P3=0.95;
P4=0.95;
P5=0.95;

```

```

Q1=1-P1;
Q2=1-P2;
Q3=1-P3;
Q4=1-P4;
Q5=1-P5;
plot(t,Pss*100,Color='Black',LineWidth=2)
xlabel('Время, часы')
ylabel('Вероятность безотказной работы %')
grid on
hold on
P_i1=2*P1*P2*P3*P4*P5-P2*P3*P4*P5-P1*P3*P4*P5-P1*P2*P4*P5-
P1*P2*P3*P5-P1*P2*P3*P4+P2*P3*P5+P1*P4*P5+P1*P3+P2*P4;
disp(P_i1)
t=1000;
Lt= (log((P_i1)))/t
t =[1:10000];
for i=[1:10000]
Pss1(i)=exp(Lt*i);
Qss1=1-Pss1;
end
j=1;
for i=[1:10000]
Pd(i)=Pss1(j);
j=j+1;
if (j==2810)
j=1;
end
end

ylim([0,105])
plot(t,Pd*100,Color='g',LineWidth=2)
plot(t,Pss1*100, Color='Red',LineWidth=2)
legend ('Без резервирования','С диаг. и резервом','С
резервированием',Location='best')

```

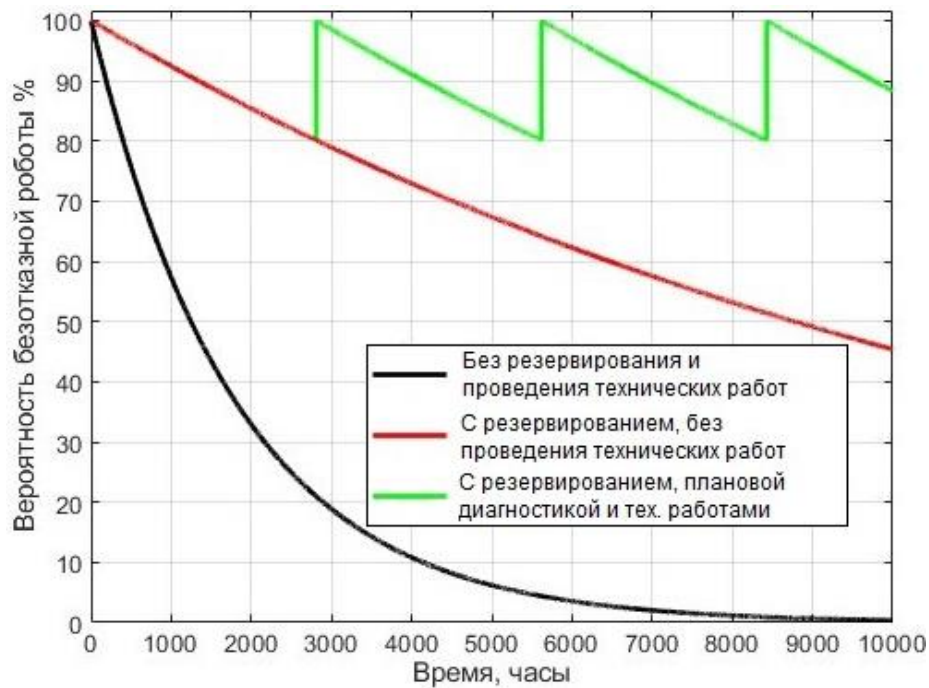


Рисунок 2.3 - Вероятность безотказной работы ПИК в различных конфигурациях системы

На основе полученных данных предлагается рекомендация о резервировании отдельных элементов системы для повышения её надежности, а также проведение периодической диагностики исправности релаксометра ПИК по методу определения уровня электромагнитных шумов его компонентов каждые 2800 часов, когда $P \leq 0,8$. На основании диагностики может быть принято решение о проведении технических работ, после которых вероятность безотказной работы снова становится $P \approx 1$, как показано зеленым цветом на графике (рис. 2.3).

2.3. Алгоритм определения уровня электромагнитных шумов и исправности анализатора через интерфейс релаксометра ПМР

Как было показано в Главе 1, диагностику электронного оборудования можно проводить выявлением компонентов, которые при нормальных условиях работы начинают излучать электромагнитные шумы сверх допустимого уровня. В данной работе предлагается использовать собственные средства анализатора для фиксирования неисправностей таким способом.

Для определения числовых значений шума через интерфейс программно-измерительного комплекса, в составе ПМРА-IV, предусмотрена опция, несущая информацию об амплитуде сигнала ПМР (рисунок 2.4). Начальная и конечная амплитуды огибающей сигналов спин-эхо высвечены на интерфейсе программы в виде цифр в нижней части окна программы в строчке «AMPLITUDE». Так, цифра 245.3 соответствует максимальной амплитуде сигналов спин-эхо (СЭ), а цифра 115.3 – соответствует минимальной амплитуде огибающей СЭ при числе 180° -х импульсов $N = 400$. При отсутствии импульсов или при установлении их числа $N = 5\,000$ обе цифры будут указывать на значение шума, которое можно использовать для заключения: «неработоспособное состояние» или «частично неработоспособное состояние» при избыточном уровне шума. Шум можно также определять по спаду свободной индукции (ССИ) после одиночного 90° -го импульса. Параметры измерений задаются в левой верхней части экрана программы. Алгоритм определения исправности релаксометра ПИК представлен на рисунке 2.5

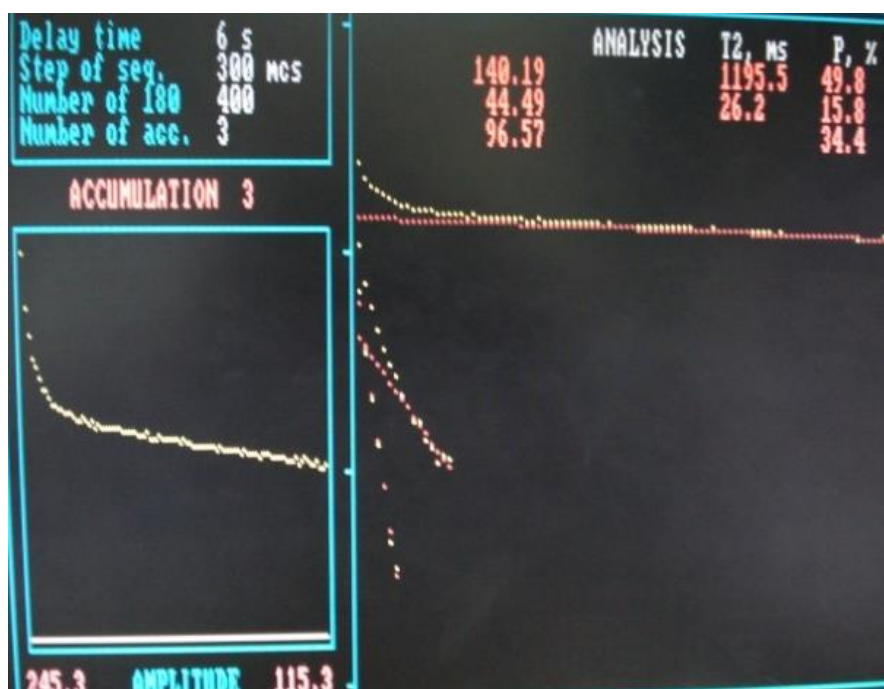


Рисунок 2.4 - Огибающая спин-эхо (слева) и её разложение на компоненты (справа) при измерениях времен спин-спиновой релаксации T_{2i} и населенностей протонов фаз P_i .

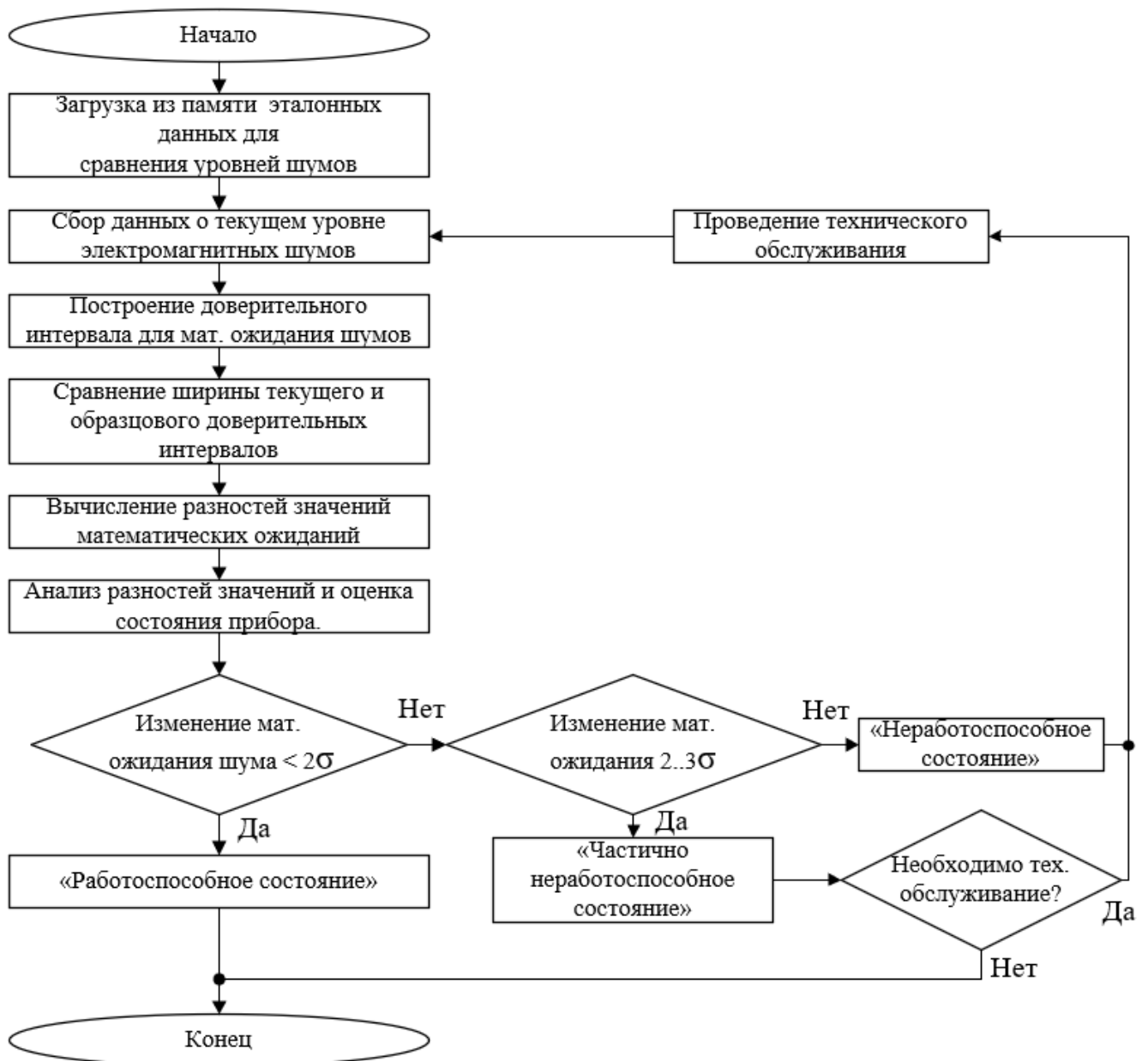


Рисунок 2.5 - Алгоритм определения технического состояния релаксометра ПМР

Алгоритм заключается в следующих шагах:

- а) из памяти устройства происходит загрузка эталонных данных измерений уровня электромагнитных шумов для релаксометра в исправном состоянии;
- б) происходит сбор данных о текущем уровне электромагнитных шумов элементов плат релаксометра;
- в) происходит математическая обработка данных и сравнение уровней шумов, полученных в результате последнего измерения с эталонными данными;

г) проверяется изменение математического ожидания значения шума; при неисправности его величина должна увеличиваться на $2..3 \sigma$ (СКО) или более;

д) определяется разность $([N]_{\sigma} - [N]_o)$ значений математических ожиданий для эталонных значений $[N]_o$ и результатов последнего измерения $[N]_{\sigma}$, выявляется соответствие значений этих разностей со степенью развития неисправностей.

е) в соответствии с терминологией по ГОСТ Р 27.102 - 2021 делается заключение о состоянии прибора: «Работоспособное состояние» при $([N]_{\sigma} - [N]_o) \approx \sigma_N$, «Частично неработоспособное состояние» при $([N]_{\sigma} - [N]_o) = 2..3\sigma_N$, «Неработоспособное состояние» при $([N]_{\sigma} - [N]_o) \geq 3\sigma_N$, и по необходимости проводится техническое обслуживание, после которого необходимо снова проверить работоспособность релаксометра по данной методике.

При частично неработоспособном состоянии допускается проведение измерений, однако, имеется риск погрешностей, для которых придется вводить корректирующие поправки или дополнительные проверки. В неработоспособном состоянии неисправность является критической, из чего следует, что проведение корректных измерений невозможно; полученные данные считаются недостоверными, и эксплуатация оборудования в измерительном режиме должна быть прекращена.

2.4. Метод диагностики узлов питания релаксометра по параметрам измерительной последовательности ПМР

Другой мерой определения исправности работы электронных блоков ПИК, является новый метод на основе исследования зависимости потребляемой мощности $P(D)$ от коэффициента заполнения измерительных импульсов D в методике ПМР КПМГ. Для оценки потребляемой мощности формирователя импульсов (передатчика) в составе ПМР-анализатора получена формула, связывающая потребляемую мощность $P_{\text{п}}(D)$ с коэффициентом заполнения

$D = \tau_{180}/\tau$, где τ – интервал между 180°-ми импульсами импульсной последовательности КПМГ:

$$P_{\pi} \approx 544 \cdot D = \frac{544}{S} \text{ [Вт]} \quad (2.10)$$

При исправной работе и малых значениях коэффициента заполнения с большими интервалами между импульсами, зависимость $P(D)$ имеет линейный характер по уравнению (2.10). При неисправности же источника питания (ИП) наблюдается отклонение от линейной зависимости. По значениям отклонения можно судить о степени неисправности узла питания. Так, к примеру, на рисунке 2.6 линейность сохраняется до $D=0,045$ (скважности $S = 22$), где первая отклонившаяся точка демонстрирует дефицит мощности $\Delta P(D) = -11$ Вт. Это является сигналом для проверки исправности регулируемого стабилизатора напряжения *LM317AEMP* в плате передатчика.

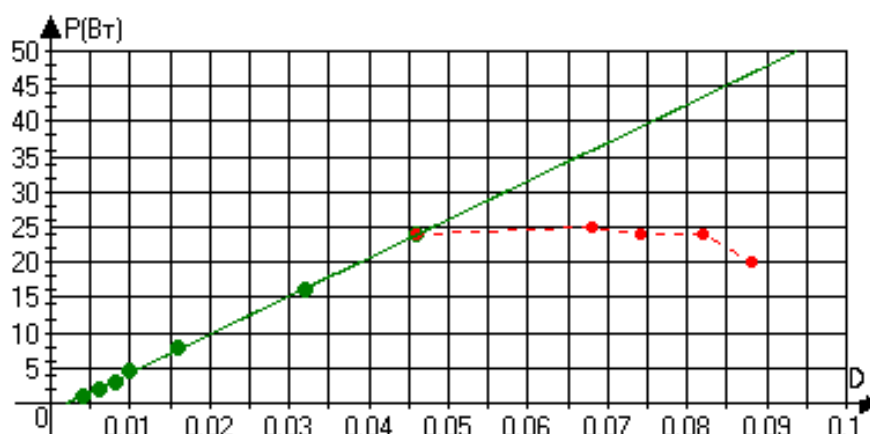


Рисунок 2.6 – Зависимость мощности P платы передатчика релаксометра от коэффициента заполнения импульсов D в последовательности КПМГ

2.5. Общий алгоритм самодиагностики и повышения надежности работы ПМР-анализатора при измерениях характеристик нефти

Как известно, надежность оборудования является первостепенной характеристикой прибора, которая определяет возможность его работы. Говорить о надежности ПИК можно в двух плоскостях. Первым аспектом является

непрерывная работоспособность прибора, а вторым - достоверность результатов его измерений. Контроль нефти, окружающей среды и состояния работы ПИК должен производиться путем сравнения измеряемых параметров ПМР-релаксации $T_{i\varnothing}$ с теоретически идеальными T_{iT} значениями параметров, например времен спин-спиновой релаксации T_{iT} из спектра времен релаксации, получаемых обратным преобразованием Лапласа L^{-1} [63-66]. Также контроль достоверности измерений можно определять по методу 3 СКО (среднеквадратическое отклонение). В случаях, когда величина относительного отклонения параметров α_N не противоречит уравнению 2.11, следует говорить о возможности измерений релаксометром ПМР:

$$|\alpha_N| \leq 3\sigma \quad (2.11)$$

где σ - среднеквадратическое отклонение [20].

При иных условиях проводить измерения нельзя и необходимо осуществить диагностику блоков ПИК с последующим ремонтом.

В вопросе достоверности измерений также важно учесть, что на неоднородном постоянном поле магнита, вследствие попадания образца в зону неоднородности магнитного поля величиной $\delta_M \leq 5 \cdot 10^{-4}$ Гс, возможен недоворот вектора макроскопической намагниченности на углы $\theta = 90^\circ$ и $\theta = 180^\circ$, в соответствии с формулой:

$$\theta = \gamma B_1 t_i \quad (2.12)$$

где $\gamma = 4258$ Гц/Гс – гиромагнитное отношение;

B_1 - величина радиочастотного импульса в Гс (Гауссах);

t_i – длительность импульса в методиках измерения времен спин-спиновой релаксации T_2 .

Для устранения данной погрешности используется метод КПМГ, в котором на катушку индуктивности в датчике ЯМР подается сначала нутационный 90° импульс, а затем - серия 180° импульсов [15,16].

Для определения же работоспособности прибора следует проводить сравнение результатов самодиагностики по уровню электромагнитных шумов

элементов релаксометра с эталонными параметрами, полученными на заведомо исправном приборе. Таким образом, общий алгоритм самодиагностики ПИК и повышения достоверности результатов измерений можно представить в виде блок-схемы на рис.2.7, который также позволяет повысить точность работы устройства.

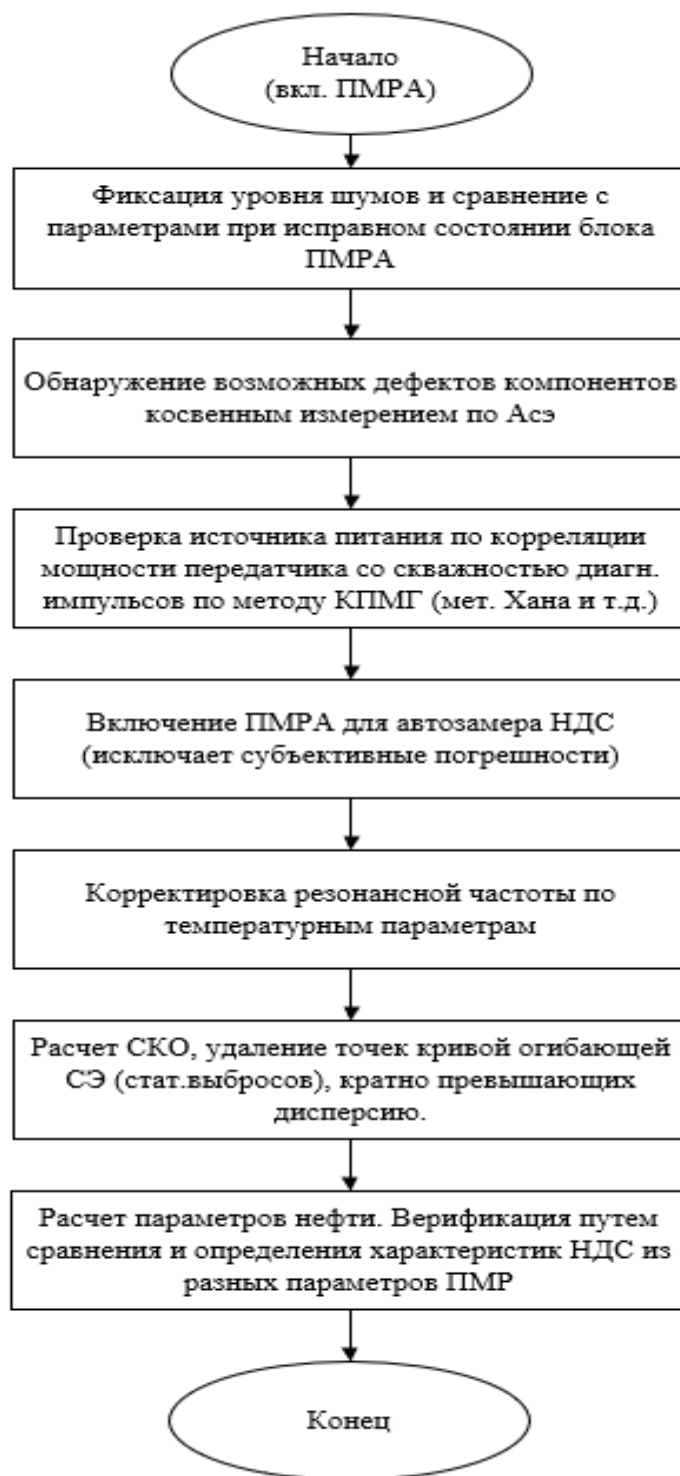


Рисунок 2.7 - Алгоритм определения состояния устройства и повышения достоверности измерений при исследованиях НДС с использованием ПМРА-IV

В соответствии с алгоритмом, в начале работы при включении блока измерений проводится замер шума при количестве диагностирующих импульсов $N > 5000$. При таком количестве импульсов устройство будет показывать уровень шума как текущую $A_{сэ}$. Затем необходимо сравнить полученное значение с эталонным, записанным ранее на образцовом блоке, что позволит подтвердить работоспособность устройства. По избыточному уровню шума также можно судить, какие из ключевых элементов схемы подвержены деградации, а именно, после проверки измерительного канала проводится исследование мощности, потребляемой передатчиком, и её зависимость от использованной последовательности диагностических импульсов. Таким образом изучается наличие возможных проблем в передатчике и цепях питания.

После исследования вероятных аппаратных неисправностей проводятся автоматизированные исследования НДС, включая учет температурной корректировки частоты, и расчеты характеристик нефти с использованием математической модели, позволяющей повысить достоверность данных и верифицировать получаемую информацию.

В работе [67] 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% от общего числа ошибок), человеческий фактор (13%), сбой оборудования (13%), проблемы калибровки (10%). С последними тремя факторами позволяют справиться предложенные в работе меры автоматизации и диагностики, повышающие надежность и достоверность работы ПИК, игнорируя большой объем от общего количества ошибок.

2.6. Выводы по главе 2

Разработан метод определения исправности узла питания релаксометра ПИК по корреляции мощности потребляемой его передатчиком с параметрами измерительной последовательности КПМГ методики ПМР. Разработано программно-техническое обеспечение для оперативного контроля релаксометра ПИК ПМРА-IV путем определения интенсивности электромагнитных шумов его компонентов. Приведены методики расчета показателей надежности прибора, времени до отказа его электронных элементов, интенсивности отказов. Рассмотрены методы повышения надежности комплекса — резервирование элементов и выявление потенциально ненадежных компонентов. Также представлена программа прогнозирования вероятности отказа работы программно-измерительного комплекса и соответствующие графики.

Получены следующие параметры надежности ПИК:

- интенсивность отказов работы релаксометра ПИК при различных температурах: $\lambda_{-25^{\circ}\text{C}} = 5,8 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$; $\lambda_{0^{\circ}\text{C}} = 5,5 \cdot 10^{-4}$; $\lambda_{25^{\circ}\text{C}} = 5,3 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$; $\lambda_{50^{\circ}\text{C}} = 5,7 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$;
- времена наработки на отказ: $T_{-25^{\circ}\text{C}} = 1700 \text{ ч}$; $T_{0^{\circ}\text{C}} = 1800 \text{ ч}$; $T_{25^{\circ}\text{C}} = 1890 \text{ ч}$; $T_{50^{\circ}\text{C}} = 1750 \text{ ч}$;
- вероятность безотказной работы релаксометра при разных температурах $P_{-25^{\circ}\text{C}} = 0,415$; $P_{0^{\circ}\text{C}} = 0,45$; $P_{25^{\circ}\text{C}} = 0,47$; $P_{50^{\circ}\text{C}} = 0,43$;
- статистическая интенсивность отказов релаксометра равная 0,2;
- график надежности программно-измерительного комплекса ПМРА-IV, представленный на рисунке 2.3.

3. АЛГОРИТМЫ И ПРОГРАММЫ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ НОВОГО МЕТОДА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭКСПРЕСС-КОНТРОЛЯ СЕРОСОДЕРЖАНИЯ И ХАРАКТЕРИСТИК НЕФТИ ПО ПАРАМЕТРАМ ПМР РЕЛАКСАЦИИ

Материалы главы 3 опубликованы в работах автора [52-55, 68-69].

В Главе 3 описан новый метод автоматизированного экспресс-контроля *основных характеристик нефти* по достоверным данным ПМР-релаксации, полученным в результате мер по повышению надежности ПИК. Приведены его алгоритмическое и программное обеспечение.

3.1. Программно-алгоритмическое обеспечение автоматизированной обработки данных ПМР-анализатора

Для контроля работы ПМР-анализатора нефти и автоматизированного анализа данных, получаемых с помощью данного комплекса, было разработано собственное программное обеспечение (представленное в приложении Б).

В программе решаются следующие задачи:

- а) создание интерфейса пользователя для управления ПМР-анализатором и исследования характеристик нефти по вычисляемым ПМР-параметрам;
- б) обеспечение контроля работы анализатора нефти;
- в) управление параметрами измерений ПМР-анализатора;
- г) обеспечение возможности ручного и автоматизированного расчёта ПМР-параметров исследуемого вещества;
- д) автоматизированный расчёт данных о физико-химических свойствах нефти по измеренным ПМР-параметрам;
- е) графическое построение зависимостей характеристик нефти от ПМР-параметров экспресс анализатора нефти;
- ё) обеспечение математического аппарата в программе, который позволяет

проводить расчёты и выводить зависимости на графики.

На рисунке 3.1. показана общая схема работы разработанного ПО.

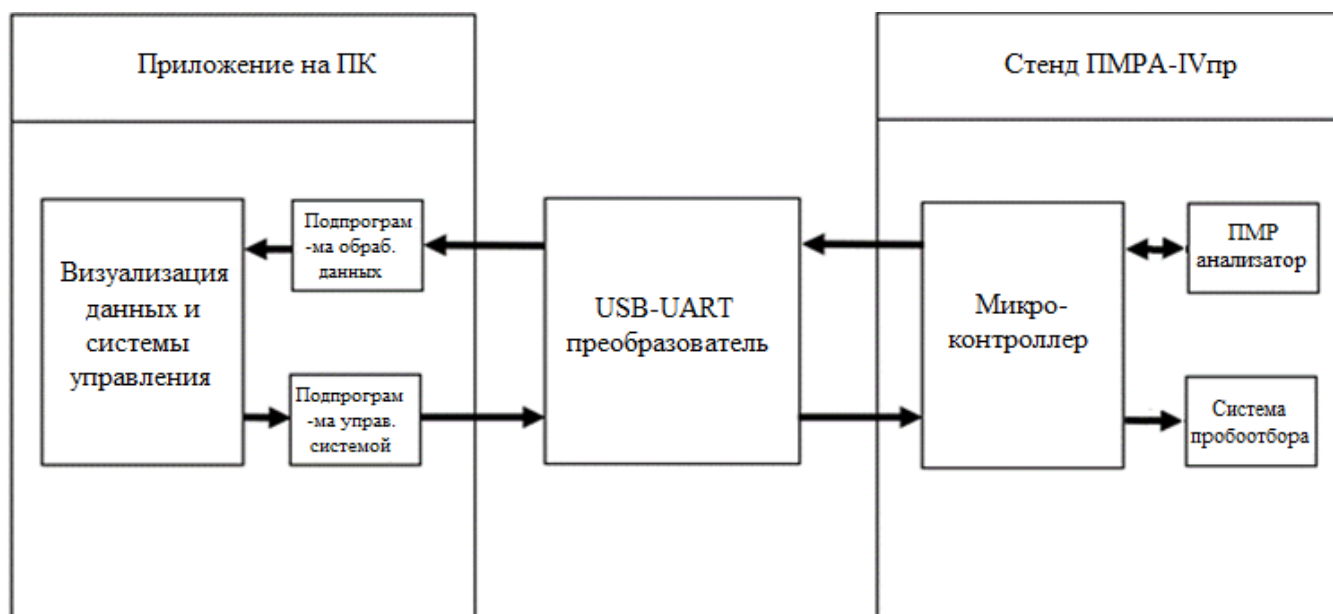


Рисунок 3.1 - Структура работы программного обеспечения автоматической обработки данных ПМР-анализатора

Через интерфейс релаксометра в составе ПИК (рисунок 3.2) программным способом задаются параметры режимов измерения, осуществляется контакт с модулем ПЛИС в системе анализатора, ведется ручной или автоматический расчет ПМР-параметров и величин, описывающих физико-химические свойства исследуемой нефти.

Программа написана на языке программирования C#. Построение визуальной составляющей программы происходит с помощью инструмента WPF для языка программирования C#, встраиваемого в среду программирования Visual Studio. Для отображения графиков применяется библиотека SciChart.

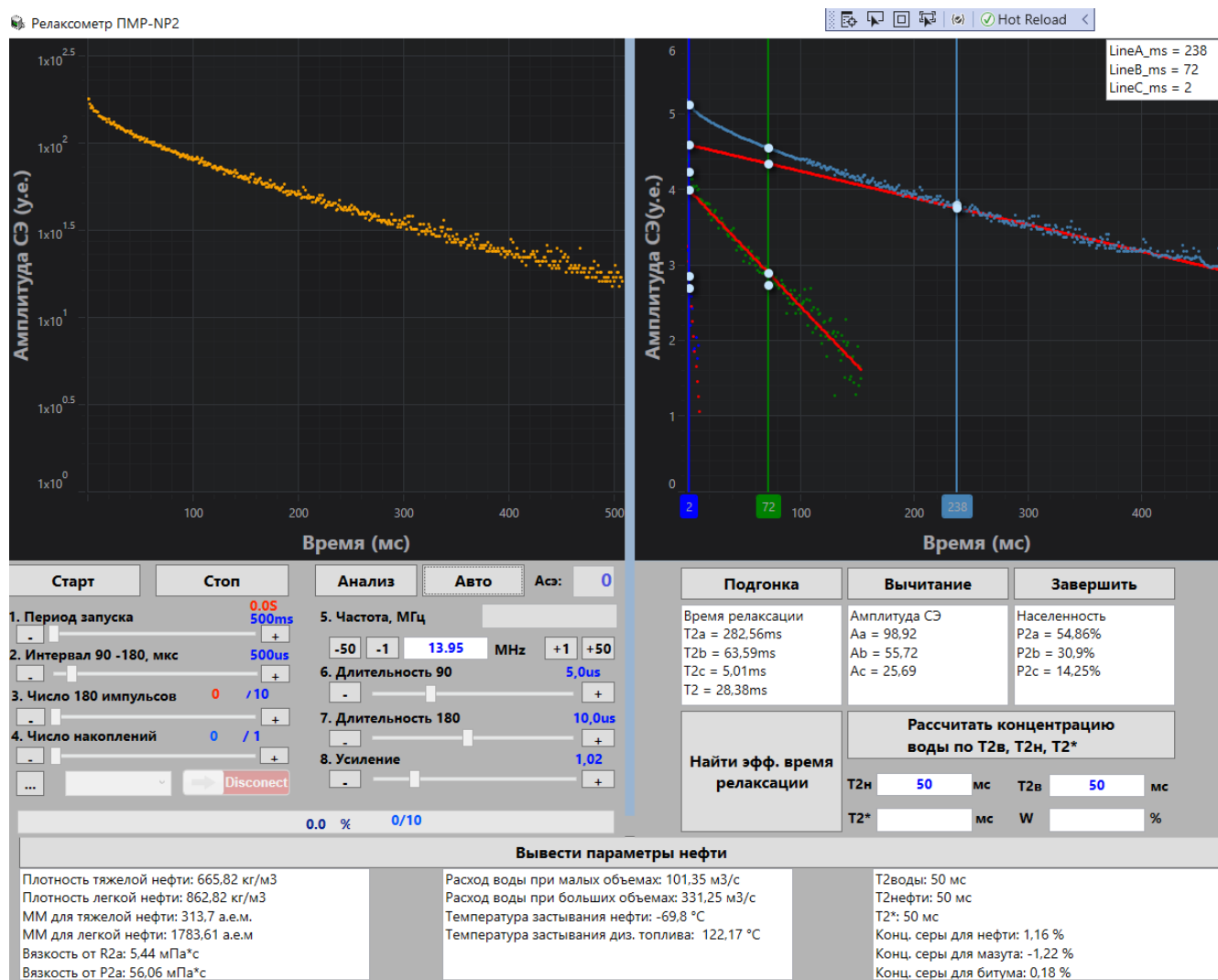


Рисунок 3.2 - Программа управления и диагностики ПМР-анализатора

В левой части окна разработанной программы находится панель для установки параметров измерения, которые затем передаются на ПЛИС через интерфейс *USB*-порта. На рисунке 3.3 приводится функциональная схема блока управления ЯМР-релаксометром. Блок управления состоит из ПЛИС, соединенной через цифровые выходы с синтезатором частоты; синтезатор подключен ко входам формирователя импульсов, выход которого соединен с передатчиком, подающим усиленные импульсы в датчик ЯМР, с которого полезный сигнал поступает на вход приемника. В качестве измерителя амплитудных сигналов используется АЦП с интегратором. Контроллер ПЛИС соединен двухсторонней связью с ноутбуком через *USB*-порт для чтения получаемых команд управления и передачи данных, полученных с датчика ЯМР.

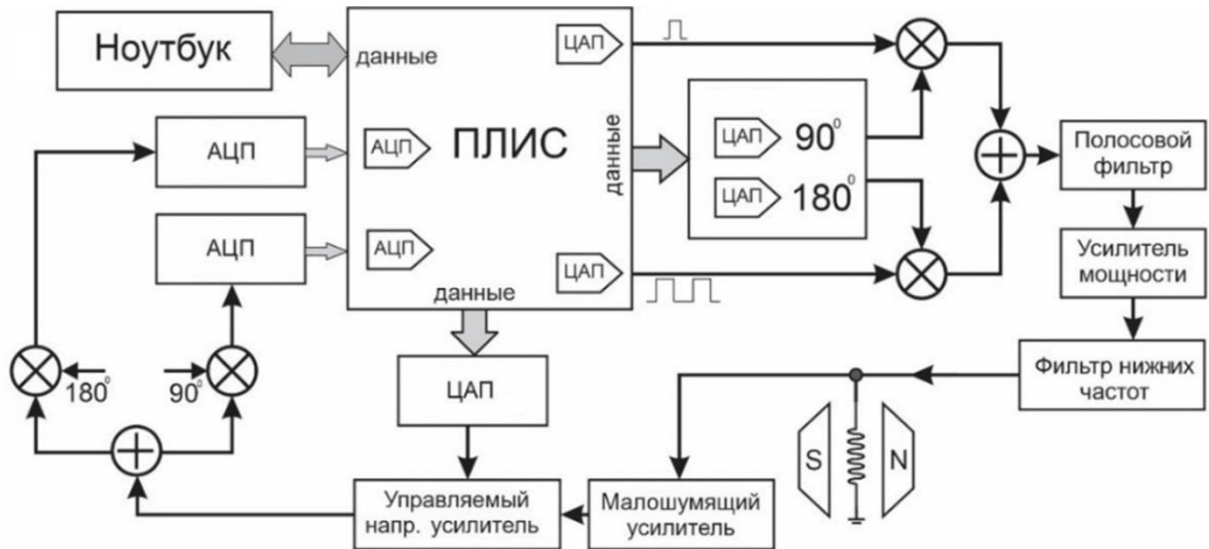


Рисунок 3.3 - Функциональная схема блока управления ЯМР-релаксометра

После того как ПЛИС проведет замер и передаст данные об огибающей сигналов спин-эхо пробы обратно на компьютер, данные визуализируются на левом графике окна программы. Далее при нажатии кнопки «Авто» проводится автоматический расчёт всех оставшихся параметров релаксации и характеристик нефти по ним. В результате разложения логарифмов огибающей СЭ на компоненты получаем параметры времен релаксации, амплитуд СЭ и населенностей протонов.

С помощью метода ПМР-релаксометрии можно получить следующие характеристики нефти из установленных ранее корреляций [68-71]:

1. скорость общего потока V (расход $Q = VS$, где S - площадь сечения трубопровода) скважинной жидкости, сырой нефти и водонефтяных эмульсий;
2. концентрация воды и нефти в скважинной жидкости и сырой нефти;
3. содержание газа в скважинной жидкости;
4. плотность нефти и нефтепродуктов;
5. молекулярная масса нефти;
6. вязкость нефти и нефтепродуктов;
7. температура застывания нефти и нефтепродуктов;
8. концентрация смол асфальтенов;
9. загрязненность воды нефтепродуктами и солями тяжелых металлов.

Например, скорость потока ν для эмульсий на концах диапазона концентраций воды вычисляется с коэффициентами корреляции $R^2 = 0,93\text{--}0,99$ и СКО = 0,01–0,08 по параметрам эффективного времени спин-спиновой релаксации ПМР T_2^* из уравнений (3.1) и (3.2):

$$\nu = \frac{1,77}{T_2^*(c)} - 1,35 \quad (3.1)$$

$$\nu = 6 \cdot e^{(-3,7 \cdot T_2^*(c))} \quad (3.2)$$

Данные о скорости потока можно также получить через расход $Q = \nu S$:

- при малых расходах:

$$T_2^* = 1,81 \cdot e^{(-0,041 \cdot Q)} \quad (3.3)$$

- при больших расходах:

$$T_2^* = 0,38 \cdot e^{(-0,008 \cdot Q)} \quad (3.4)$$

Также по первому значению, полученному при проведении замеров амплитуды СЭ A_0 , корреляция описывается уравнением (3.5):

$$A_0 = 220 \cdot e^{(-0,46 \cdot \nu)} \quad (3.5)$$

Аналогично другие характеристики могут быть вычислены из нескольких измеренных ПМР-параметров. Таким образом, поскольку в методе ПМР возможен вывод одних и тех же характеристик нефти по разным ПМР-параметрам, предоставляется возможность верификации данных по нескольким различным исходным значениям параметров релаксации.

Ниже по тексту приводится код подпрограммы автоматического расчета значения ПМР-параметров и характеристик нефти. В первую очередь, для разложения полученной огибающей амплитуд спин-эхо на экспоненциальные составляющие по трем фазам, необходимо провести удаление статистических выбросов величиной в 3 СКО и регрессию полученной кривой. Проведя регрессию, мы можем найти точку излома, в которой отслеживается разделение составляющих общего сигнала на фазы и отложить в ней касательную, которую вычтем из огибающей амплитуд для получения фазы B . Необходимую точку вычисляем последовательным вычитанием точек регрессированной кривой из хорды, проходящей через начало и конец огибающей. Место, в котором разница между

ними является максимальной, и есть искомая точка излома. Далее, в алгоритме для последующих фаз производятся те же самые действия с новыми полученными кривыми соответствующих фаз. Регрессия в данном алгоритме необходима для унификации процесса измерения для любой исследуемой жидкости и практически не влияет на достоверность конечных результатов, поскольку здесь ключевым является сам характер излома кривой, который сохраняется.

```
private void Bt_auto_Click(object sender, RoutedEventArgs e)
{
    double[] xData = new double[ImpulseCnt];
    double[] yData = new double[ImpulseCnt];

    for (int cnt = 0; cnt < ImpulseCnt; cnt++)
        xData[cnt] = cnt;
    Sensor_Data3.DataSeries.YValues.CopyTo(array: yData, index: 0);

    // Вычисление СКО
    double mean = yData.Average();
    double variance = yData.Select(x => Math.Pow(x - mean,
        2)).Average();
    double stdDev = Math.Sqrt(variance);

    // Определение точек, отклоняющихся более чем на 3*СКО
    double threshold = 1 * stdDev;

    for (int i = 5; i < yData.Length - 5; i++)
    {
        if (Math.Abs(yData[i] - mean) <= threshold)
            continue;

        yData[i] = 0;

        for (int cnt = -5; cnt <= 5; cnt++)
            if (cnt == 0) continue;
            else yData[i] += yData[i+cnt];
        yData[i] /= 10;
    }

    //Вывод полученной кривой
    var tmpLine0 = new XyDataSeries<double, double>();
    for (int counter = 0; counter < ImpulseCnt; counter++)
    {
        tmpLine0.Append(counter, yData[counter]);
    }
    Sensor_Data3.DataSeries = tmpLine0;
    /* - для отображения кривой с удалением превышающих 3*СКО
    точек*/
}
```

```

//Регрессионный анализ
int order = 3;
double[] args = LeastSquares.MultiLine(xData, yData, \
ImpulseCnt, order);
double[] Xs = new double[ImpulseCnt];
double[] Ys = new double[ImpulseCnt];
Xs[0] = xData[0];
Ys[0] = getYvalue(Xs[0], args);
double step = 1;
for (int i = 1; i < ImpulseCnt; i++)
{
    Xs[i] = Xs[i - 1] + step;
    Ys[i] = getYvalue(Xs[i], args);
}
//Вывод полученной кривой
var tmpLine = new XyDataSeries<double, double>();
for (int counter = 0; counter < ImpulseCnt; counter++)
{tmpLine.Append(counter, Ys[counter]);}
var straightLine = new double[ImpulseCnt];
//Найдем точку проведения касательной, чтобы опр. Фазу В.
for (int x = 0; x < ImpulseCnt; x++)
{
    double v = (x) * (Ys[ImpulseCnt - 1] - Ys[0]);
    straightLine[x] = v / (ImpulseCnt) + Ys[0];
}
for (int x = 0; x < ImpulseCnt; x++)
{
    Ys[x] = straightLine[x] - Ys[x];
}
// Инициализируем индекс наибольшего элемента значением -1
int largestIndex = -1;

// Инициализируем максимальное значение наименьшим возможным
значением int
double maxValue = double.MinValue;
// Перебираем массив и обновляем индекс и максимальное
значение по мере необходимости
for (int i = 0; i < Ys.Length; i++)
{
    if (Ys[i] > maxValue)
    {
        maxValue = Ys[i];
        largestIndex = i;
    }
}
Line1_s.X1 = largestIndex;
Bt_line1_Click(Bt_line1, e); //Подгонка
Bt_Line2_Click(Bt_Line2, e); //Вычитание, и вывод фазы В
//Далее по аналогии для Фаз В и С
...
//Расчитаем и выведем все остальные параметры
Show_Line_1n2_Table.Text = "LineA_ms = " + Line1_s.X1 +
"\nLineB_ms = " + Line2_s.X1 + "\nLineC_ms = " + Line3_s.X1;
Bt_show_oil_params_Click(Bt_show_oil_params, e);
}

```

Для определения и вывода отдельных параметров ПМР, используется схожий для различных фаз алгоритм, представленный в функциях с именами *Draw_Line(Num)* из приложения Б. Например, *Draw_line4()* для фазы В.

После определения ПМР-параметров с помощью кода, представленного далее по тексту, производится уже расчет и вывод характеристик нефти.

```
private void Bt_show_oil_params_Clk(object sender, RoutedEventArgs e)
{
    //Найдем T2*
    //Ответ будет в мсек.
    double T2a, T2b, T2c, A2a, A2b, A2c, P2a, P2b, P2c;
    //T2 - время спин-спиновой релаксации, A2 - амплитуда спин-//эхо,
    P2 - населенности протонов.
    //С переводом из мс в сек.
    T2a = RelaxTimeA / 1000;
    T2b = RelaxTimeB / 1000;
    T2c = RelaxTimeC / 1000;
    A2a = AmplSE_A;
    A2b = AmplSE_B;
    A2c = AmplSE_C;
    //Переведем из процентов в доли единицы
    P2a = ProtonPopulationA / 100;
    P2b = ProtonPopulationB / 100;
    P2c = ProtonPopulationC / 100;
    //=====Таблица 1=====//
    double light_oil_density = (-220.133*T2a*T2a)-18.855 * T2a + 885.72;
    double heavy_oil_density = (Math.Log(T2a / 180.3) / (-0.0097));
    double light_oil_molecular_mass = 116 * (1 / T2b) - 40.6;
    double heavy_oil_molecular_mass = 4.75 * (1 / T2b) + 239;
    double viscosity_from_R2a = 1.12 * (Math.Pow((1 / T2a), 1.25));
    double viscosity_from_P2a = 1/(Math.Pow((P2a - 0.41) / 0.31, 5));

    //Здесь возьмем T2a в миллисекундах->T2a*=1000;
    double resin_asphaltene_concentration=-2.2*Math.Log(T2a*1000)+ 14.6;
    tb_oil_params_1.Text = "Плотность тяжелой нефти: " +
    Math.Round(heavy_oil_density, 2) + " кг/м3\n"
    + "Плотн. легкой нефти:" + Math.Round(light_oil_density, 2) + " кг/м3\n"
    + "ММ для тяжелой нефти: " + Math.Round(heavy_oil_molecular_mass, 2)
    + " а.е.м.\n"
    + "ММ для легкой нефти: " + Math.Round(light_oil_molecular_mass, 2)
    + " а.е.м.\n"
    + "Вязкость от R2a: " + Math.Round(viscosity_from_R2a, 2) + "
    мПа*с\n"
    + "Вязкость от P2a: " + Math.Round(viscosity_from_P2a, 2) + "
    мПа*с\n" + "C(a/c): " + Math.Round(resin_asphaltene_concentration, 2)
    + " %\n"; //Аналогично для Таблиц 2 и 3
}
```

Вычисления также могут быть сделаны вручную с помощью панели управления и графика в правой части окна программы. Такая возможность

позволяет проводить калибровку прибора в начале эксплуатации и отлаживать программу при обновлениях системы. В нижней части окна программы приводятся уже рассчитанные из ПМР-параметров характеристики нефти (рисунок 3.2).

Для дополнительной верификации данных, в программу встроено окно, где можно посмотреть все зависимости нефти от параметров протонного магнитного резонанса (рисунок 3.4). Данная подпрограмма [69] приведена в виде кода в приложении Б.

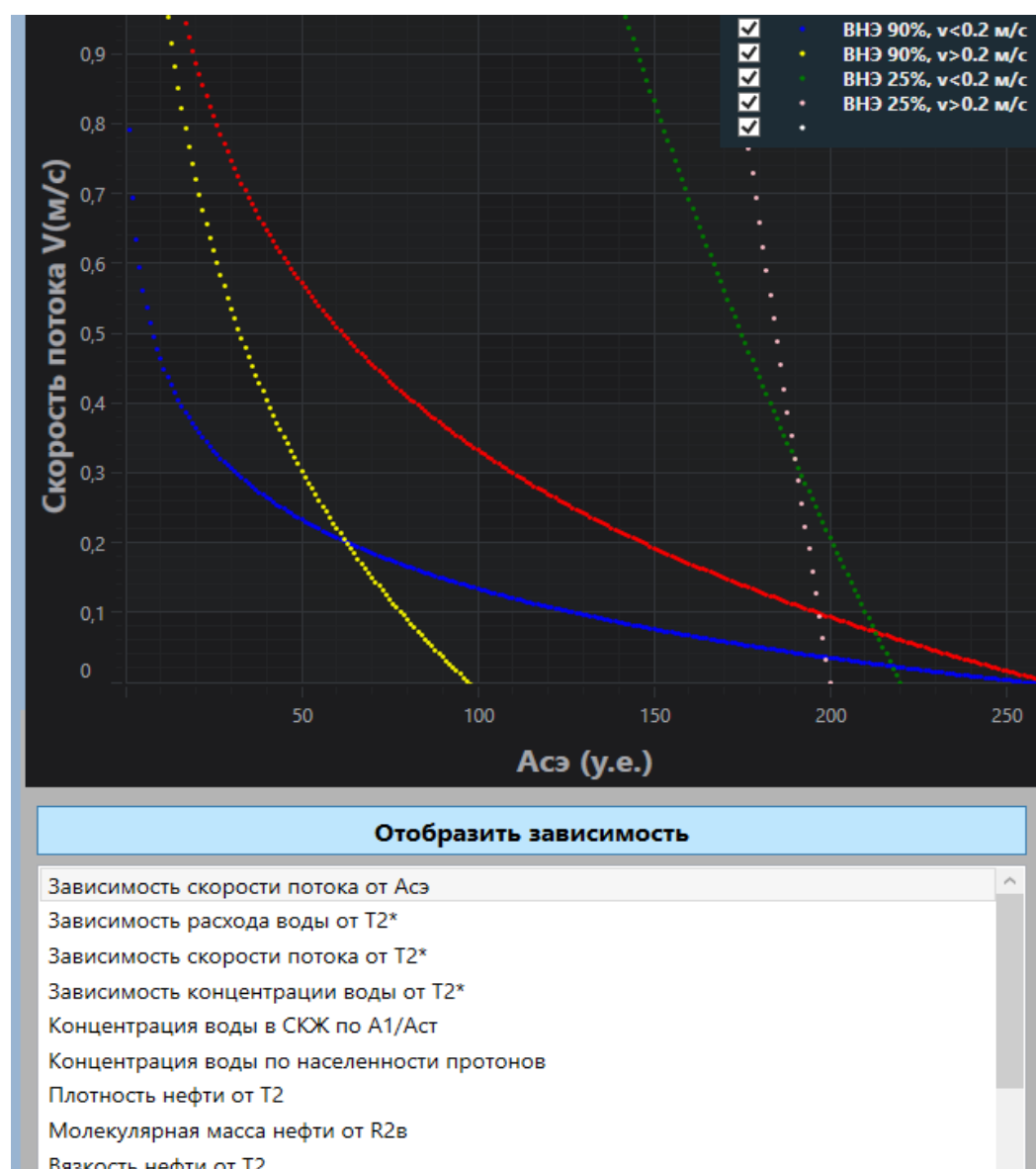


Рисунок 3.4 - Подпрограмма визуализации зависимостей характеристик нефти от ПМР-параметров

Ближайшими похожими работами по данной части исследования являются: «Программный комплекс управления, приёма, обработки и хранения информации ЯМР анализатора» [72] и «Программа обработки данных ЯМР - анализатора при определении содержания парафина, асфальтенов и смол в нефти методом ЯМР» [73].

В первой из двух работ представляется широкий спектр возможностей, однако, она предназначена лишь для исследования масличности и влажности семян, что не имеет отношения к области нефтегазодобычи и переработки. Вторая же программа позволяет получить информацию о различных характеристиках нефти, при этом работает в двух режимах: в первом режиме вычисляет содержание парафинов и асфальтенов, а во втором - вычисляет содержание смол. Однако, главным преимуществом нашей разработки является существенно большее количество одновременно измеряемых характеристик нефти. Таким образом, патентный поиск в этой области показывает важность проделанной работы, представленной в данном разделе.

3.2. Корреляции концентрации содержания серы с ФХС нефти и нефтепродуктов

Выше в данной главе описано программно-алгоритмическое обеспечение методов экспресс-контроля большинства характеристик нефти по достоверным данным ПМР-релаксации, полученным в результате мер по повышению надежности ПИК. Используемые в программах зависимости описаны в работе [71]. Но единственной, практически важной для нефтепереработки характеристикой, которая не была там освещена, остается концентрация содержания серы S в нефти и нефтепродуктах, а также в трансформаторном масле, термостабильность и качество которого резко снижается при наличии в нем сернистых соединений [74]. Своевременный контроль и удаление избытков серы позволяет предотвратить ранний отказ оборудования, возникающий из-за агрессивного воздействия данного вещества на конструкцию систем.

По результатам экспериментов изучены корреляции между концентрацией содержания серы и характеристиками нефти, такими как:

- плотность нефти, мазутов и природных битумов (рисунок 3.5);
- их молекулярная масса;
- логарифмы динамических вязкостей $\ln \eta$ от температуры для образцов с различным содержанием серы (рисунок 3.6);
- теплота сгорания нефтепродуктов от концентрации серы (рисунок 3.7).

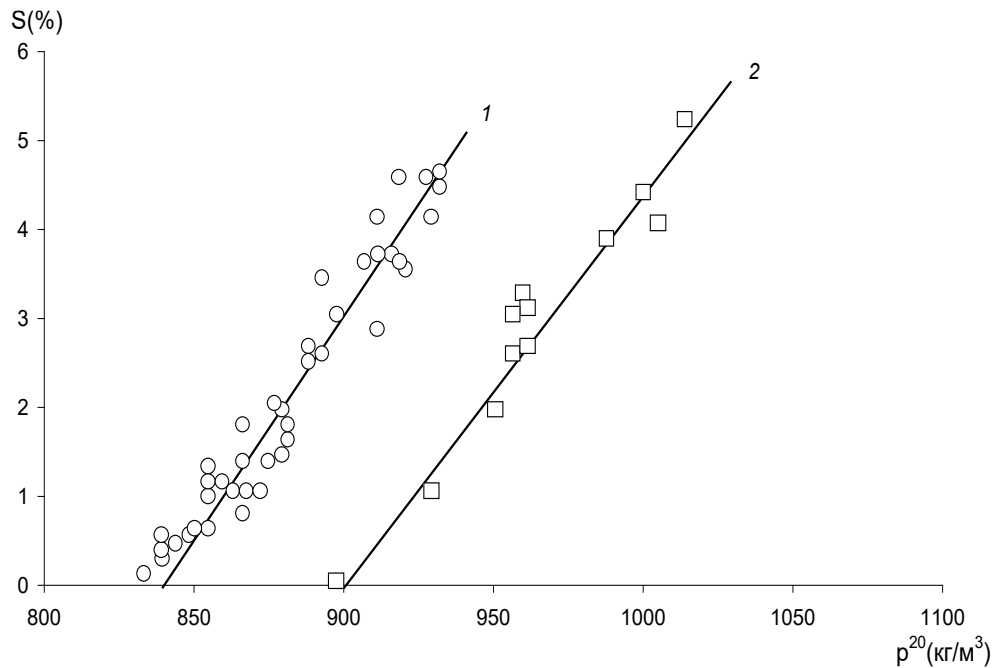


Рисунок 3.5 - Зависимости $S(\rho)$ для нефти (1), битумов и мазутов(2), полученные при температуре $20 \pm 1^\circ\text{C}$

Зависимости содержания серы S с коэффициентом регрессии $R^2 = 0,95$ описываются соотношениями для нефти по уравнению (3.6):

$$S(\%) = - (39,52 \pm 2,37\%) + \left(0,048 \pm 0,003 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}} \right) \rho \quad (3.6)$$

Для мазутов и битумов - описывается уравнением (3.7):

$$S(\%) = - (36 \pm 2,2\%) + \left(0,04 \pm 0,003 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}} \right) \rho \quad (3.7)$$

где абсолютные значения являются коэффициентами, полученными из экспериментов.

Получены также уточненные формулы для расчета молекулярной массы, которые для нефти можно записать в виде уравнения (3.8):

$$M(\text{а. е. м.}) = -C_7 + C_8\rho \quad (3.8)$$

При $\rho < 950 \text{ кг/м}^3$ $C_7 = 1095 \pm 66$ (а.е.м.), $C_8 = 1,5 \pm 0,1$ (а.е.м.·м³/кг).

Температурные зависимости вязкости $\ln\eta$, полученные на прецизионном вискозиметре [75] для образцов с разным содержанием S (см. рисунок 3.6), описываются уравнениями:

$$\eta = \eta_0 \cdot e^{\left(\frac{E_A}{RT}\right)} \quad (3.9)$$

$$\ln\eta = \ln\eta_0 + \frac{E_A}{RT} \quad (3.10)$$

Значения энергий активации E_A и предэкспоненциальных множителей η_0 , выведенных из зависимостей на рисунке 3.6 приведены в таблице 3.1. В работе [76] выведена зависимость вязкости η_0 от числа Авогадро N_A , плотности ρ , числа молекул n в СЕ; молекулярной массы M .

$$\eta_0 = \frac{N_A h \rho}{n * M} \quad (3.11)$$

Рост произведения числа молекул на молекулярную массу ($n*M$) должен приводить к уменьшению η_0 . Именно это и наблюдается в полученных зависимостях на рисунке 3.6.

В таблице 3.1 приведены зависимости реологических параметров, изображенных на рисунках 3.7–3.9 от концентрации содержания серы в нефти S .

По полученным данным также построена зависимость различных *теплот сгорания* Q нефтепродуктов от концентрации серы S^r , приведенная на рисунке 3.10.

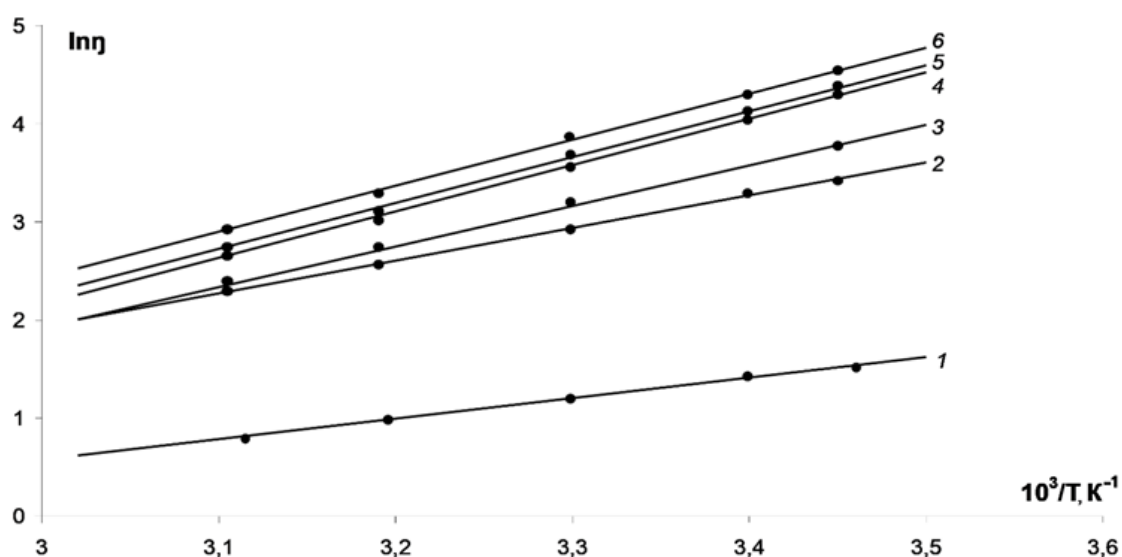


Рисунок 3.6 - Зависимости логарифма вязкости $\ln\eta$ от температуры $10^3/T$ [K⁻¹] для нефти с содержанием серы (кривые: 1 – $S=0,16\%$; 2– $1,62\%$; 3– $1,74\%$; 4 - $1,84\%$; 5 - $1,95\%$; 6 - $3,09\%$)

Таблица 3.1- Зависимости реологических параметров от концентрации S

Номер на графике	Содерж. серы S (%)	E_A (кДж/моль или ккал/моль)	Предэкспоненциальные множители η_0	$n \cdot M \cdot 10^6$ (y.e.)
1	0,16	8,571 или 2,047	0,156	2,05
2	1,62	12,857 или 3,071	0,159	2,14
3	1,72	15,714 или 3,753	0,076	4,54
4	1,84	16,429 или 3,924	0,073	4,81
5	1,95	16,429 или 3,924	0,086	4,38
6	3,09	17,143 или 4,094	0,073	4,87

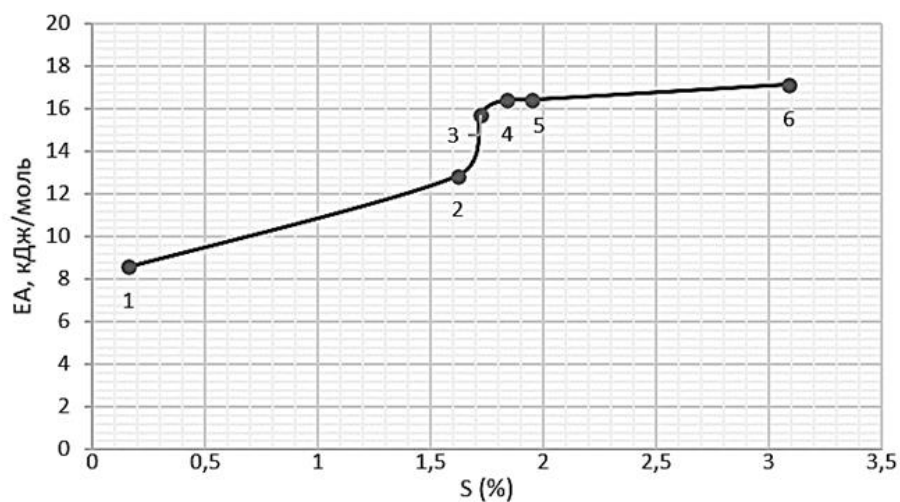


Рисунок 3.7 - Зависимость энергии активации E_A (кДж/моль) от S в нефти

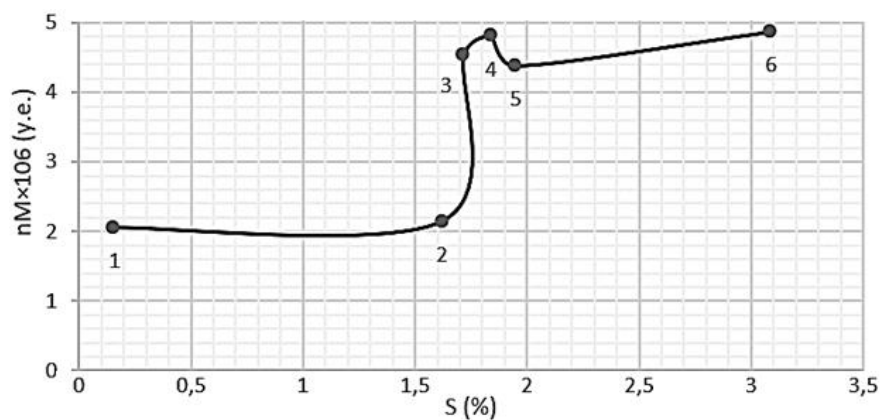


Рисунок 3.8 - Зависимость произведения числа молекул в СЕ и молекулярной массы ($n \cdot M$) от содержания серы в нефти

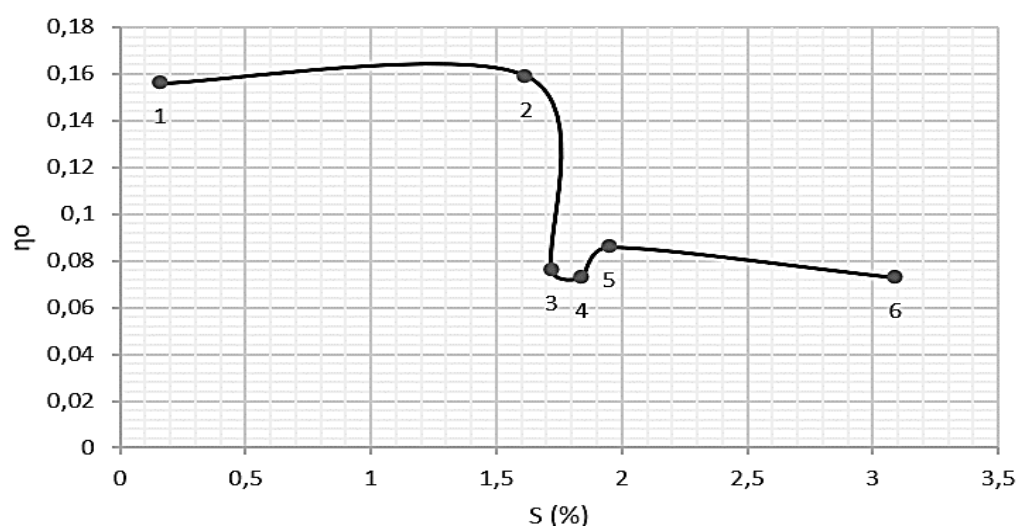


Рисунок 3.9 - Зависимость коэффициента η_0 от содержания серы в нефти

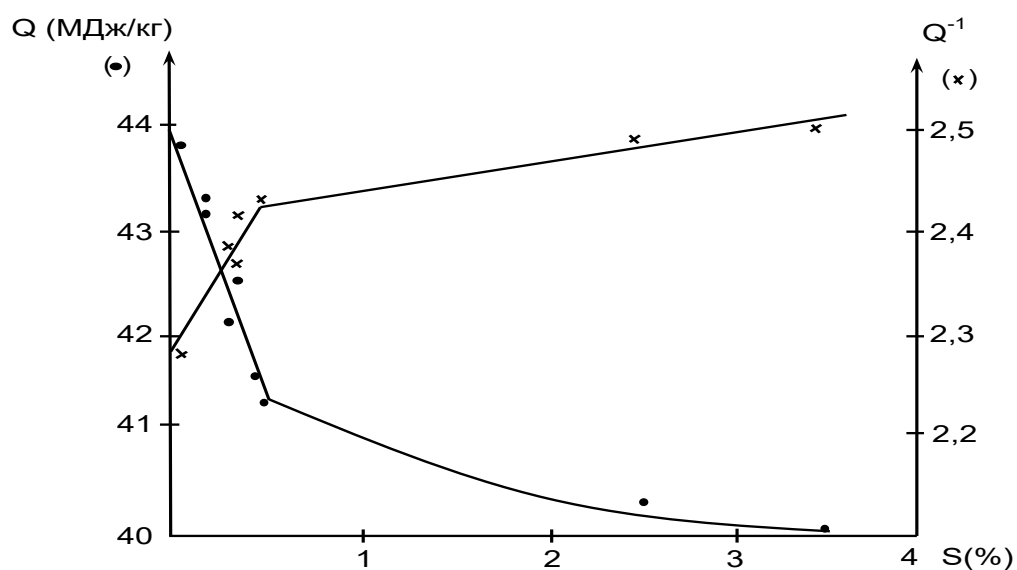


Рисунок 3.10 - Зависимость теплоты сгорания нефтепродуктов от концентрации серы

На рисунке наблюдается снижение теплот сгорания Q с увеличением концентрации содержания серы S^r . Зависимости Q имеют излом при $S^r = 0,5\%$, и в диапазоне от $S^r = 0,02\%$ (бензин) до $3,5\%$ (мазут) с абсолютной погрешностью $\pm 0,1\%$ и $R^2 = 0,97$ аппроксимируются уравнениям (3.12) и (3.13):

$$Q = \frac{43,8 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}}{(1 + 0,123S^r)} \text{ для } S^r \leq 0,5\%, \quad (3.12)$$

$$Q = \frac{41,5 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}}{(1 + 0,011S^r)} \text{ для } S^r > 0,5\% \quad (3.13)$$

Уравнения свидетельствуют об отрицательном влиянии содержания серы на такой параметр, как теплотворная способность жидкого топлива.

Таким образом, такие важные физико-химические и эксплуатационные свойства, как плотность, молекулярная масса и вязкость, теплотворная способность НДС сильно зависят от концентрации серосодержащих соединений, что делает актуальной разработку методики экспресс-контроля серы, которая может быть выполнена методом ПМРР.

3.3. Методики экспресс-контроля концентрации содержания серы по прецизионным данным ПМР-релаксации, полученным в результате мер по повышению достоверности и надежности работы ПИК

Выявленные корреляции между ФХС нефти весьма показательны и важны для разработки методов экспресс-контроля по параметрам ПМР-релаксации. Обычные методы, которыми эти характеристики измеряются, являются разрушающими и довольно длительными. В их результатах наблюдаются сильные погрешности корреляций, поскольку на ФХС неизбежно влияют ассоциаты, которые обычными методами количественно выявляются с большой погрешностью и в образовании которых решающую роль играет сера, которая в силу своей поливалентности ведет себя как скрепляющее звено данных молекулярных структур.

Это также говорит о том, что через эти характеристики ФХС нефтей можно получить зависимости от концентраций серосодержащих соединений. Задача создания систем экспресс-контроля серы и серосодержащих соединений в нефтях осложняется тем, что сернистая нефть является сложной гетерогенной средой с большим количеством воды, газа, солей и примесей. Обычные же контрольно-измерительные приборы рассчитаны на однофазные и однородные среды. В связи с этим, необходимо использовать метод неразрушающего экспресс-контроля - ПМР-релаксометрию, обладающую малой чувствительностью к примесям и газам. Данный способ реализуется использованием ПИК ПМРА-IV. Помимо этого, определение содержания серы в нефти также является важным пунктом в задаче повышения надежности эксплуатируемого оборудования, поскольку повышенная концентрация агрессивных сернистых соединений в нефти ведет к ускоренному износу нефтегазового и измерительного оборудования.

Предлагается способ измерения концентрации серы в НДС, основанный на установленных корреляциях (см. рисунки 3.11 и 3.12) между концентрацией серы $S_{\text{общ}}$ в протонных фазах нефти, мазута, битума и временами спин-спиновой релаксации T_{2A} , T_{2B} , T_{2C} .

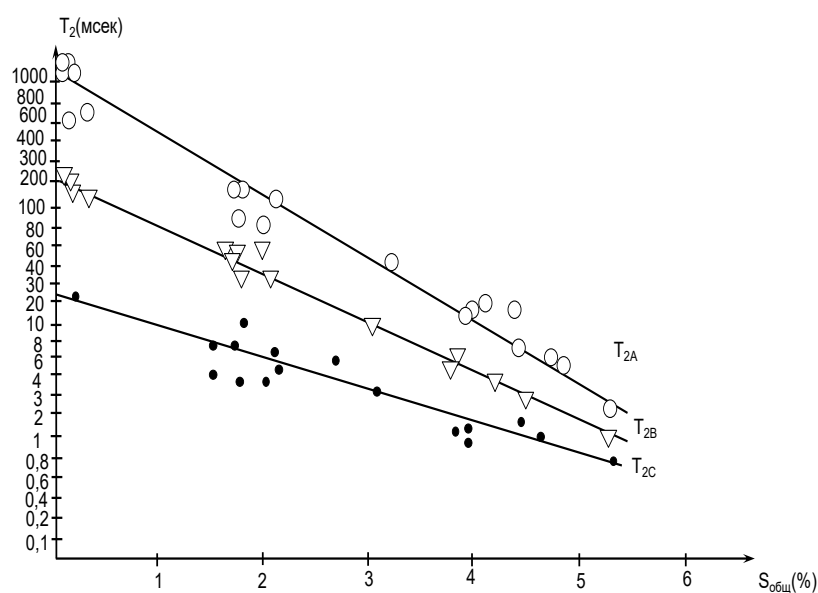


Рисунок 3.11 - Зависимость времен спин-спиновой релаксации трех протонных фаз T_{2i} от концентрации серосодержащих соединений в нефти

Зависимости на рисунке 3.11 с коэффициентом регрессии $R^2 = 0,95$, полученные для нефтей при стандартной температуре $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ [77] описываются для протонной фазы A соотношением (3.14):

$$T_{2AH} = K_1 \cdot e^{(-K_2 S)} \quad (3.14)$$

Откуда концентрацию содержания серы можно определить по уравнению

$$S = K_3 - K_4 \cdot \ln(K_5 \cdot T_{2AH}) \quad (3.15)$$

Аналогично для протонных фаз B и C (рисунок 3.8) имеем:

$$T_{2B} = K_6 e^{(-K_7 S)} \quad (3.16)$$

$$S = K_8 - \ln(K_9 T_{2B}) \quad (3.17)$$

$$T_{2C} = K_{10} e^{(-K_{11} S)} \quad (3.18)$$

$$S = K_{12} - \ln(K_{13} T_{2C}) \quad (3.19)$$

где $K_1 = (1100 \pm 33) \text{с}$;

$$K_2 = (1,2 \pm 0,04) \%^{-1};$$

$$K_3 = (5,84 \pm 0,17) \%;$$

$$K_4 = (0,83 \pm 0,03) \%;$$

$$K_5 = (1 \pm 0,3) (\text{с}^{-1});$$

$$K_6 = (200 \pm 8) (\text{с});$$

$$K_7 = (1 \pm 0,04) (\%)^{-1};$$

$$K_8 = (5,3 \pm 0,17) (\%);$$

$$K_9 = (0,99 \pm 0,03) (\text{с}^{-1});$$

$$K_{10} = (26 \pm 1,3) (\text{с});$$

$$K_{11} = (0,7 \pm 0,04) (\%)^{-1};$$

$$K_{12} = (3,26 \pm 0,17) (\%);$$

$$K_{13} = (1 \pm 0,03) (\text{с}^{-1}).$$

Эти коэффициенты получены экспериментально.

Абсолютная погрешность измерений с использованием формул (3.15, 3.17, 3.19) составляет соответственно: 0,3%, 0,2% и 0,6%. Минимальная погрешность в 0,2% достигается в нефти при использовании зависимости (3.17).

Зависимость для амплитуды наиболее коротко временной протонной фазы C

с коэффициентом регрессии $R^2 = 0,92$ описывается уравнением (3.20):

$$A_{03} = K_{14} + K_{15}S^{2.1} \quad (3.20)$$

где A_{03} - амплитуда наиболее коротко временной тяжелой фазы C ;

$K_{14} = (7,05 \pm 0,3)$; $K_{15} = (1,18 \pm 0,05) (\%)^{-2.1}$.

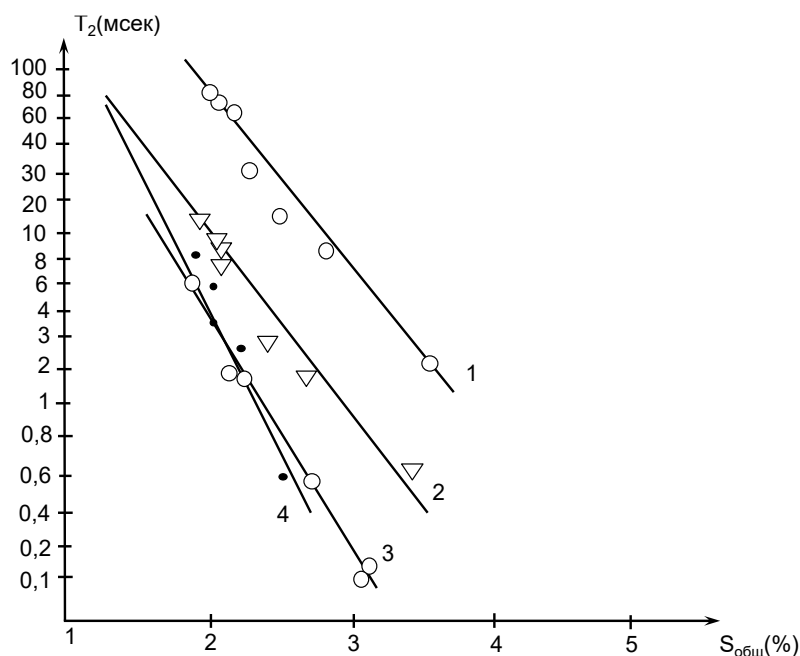


Рисунок 3.12 - Зависимость времен релаксации T_{2i} протонных фаз A , B и C от концентрации серы в мазуте (кривые 1,2,4, соответственно) и в битуме (кривая 3) для T_{2A}

На основании этих фактов концентрация содержания серы может быть определена из уравнения (3.21):

$$S = K_{16} \left[\frac{A_{03} - K_{17}}{1,18} \right]^{\frac{1}{2,1}} \quad (3.21)$$

где $K_{16} = (0,94 \pm 0,05) (\%)$;

$K_{17} = (7,05 \pm 0,3)$.

Для фазы A в мазуте получена зависимость (3.22):

$$T_{2A} = K_{18} e^{(-K_{19}S)} \quad (3.22)$$

Откуда концентрацию содержания серы можно определять, используя соотношение:

$$S = K_{20} - \ln(K_{21}T_{2A}) \quad (3.23)$$

Аналогично, для фаз *B* и *C* имеем:

$$T_{2B} = K_{22}e^{(-K_{23}S)}, \quad (3.24)$$

$$S = K_{24} - \ln(K_{25}T_{2B}), \quad (3.25)$$

$$T_{2C} = K_{26}e^{(-K_{27}S)}, \quad (3.26)$$

$$S = K_{28} - K_{29} \cdot \ln(K_{30}T_{2C}) \quad (3.27)$$

где $K_{18} = (12005 \pm 360)$ (с);

$K_{19} = (2,75 \pm 0,08)$ (%)⁻¹;

$K_{20} = (3,41 \pm 0,16)$ (%);

$K_{21} = (0,364 \pm 0,01)$ (с⁻¹);

$K_{22} = (12005 \pm 390)$ (с⁻¹);

$K_{23} = (3,3 \pm 0,08)$ (%)⁻¹;

$K_{24} = (2,84 \pm 0,14)$ (%)⁻¹;

$K_{25} = (0,3 \pm 0,01)$ (с⁻¹);

$K_{26} = (12005 \pm 390)$ (с);

$K_{27} = (3,8 \pm 0,3)$ (%)⁻¹;

$K_{28} = (2,47 \pm 0,14)$ (%);

$K_{29} = (0,26 \pm 0,02)$ (%);

$K_{30} = (1 \pm 0,03)$ (с⁻¹).

Коэффициенты $K_{18} - K_{30}$ также были получены экспериментально.

Абсолютная погрешность измерений с использованием формул (3.23, 3.25, 3.27), составляет, соответственно, $\pm 0,2\%$, $\pm 0,32\%$ и $\pm 0,35\%$.

Для битума получена зависимость (3.28):

$$T_{2A} = K_{33}e^{(-K_{34}S)} \quad (3.28)$$

Следовательно, концентрацию содержания серы в битуме можно определять с абсолютной погрешностью 0,3% используя соотношение:

$$S = [K_{35} - K_{36} \cdot \ln(K_{37} \cdot T_{2AB})] \quad (3.29)$$

где $K_{33} = (401 \pm 12)$ (с);

$K_{34} = (2,2 \pm 0,1)$ (%)⁻¹;

$K_{35} = (2,72 \pm 0,14)$ (%);

$K_{36} = (0,45 \pm 0,03)$ (%);

$K_{37} = (1 \pm 0,03)$ (с⁻¹).

Представленные здесь зависимости были также использованы при разработке ПО контроля нефтепродуктов (Приложение Б).

Верхний диапазон измеряемых концентраций серы в нефтях и нефтепродуктах не ограничен и определяется нижним пределом измерений времен спин-спиновой релаксации, который достигает значений $T_{2C} \approx 100$ мкс. Экстраполяция к этому значению дает для используемого релаксометра в составе ПИК максимальное измеряемое значение $S \approx 8\%$. При усовершенствовании прибора верхний предел может быть увеличен. Возможность измерений таких концентраций на проточном анализаторе ПМРА-IV не предоставилась из-за отсутствия у нас нефти с соответствующим содержанием серы. Высокое значение верхнего предела диапазона важно для измерений в высокосернистых нефтях Прикаспийской низменности и Казахстана. Концентрация содержания серы в них превышает верхний предел измерений серы в 6% проточными анализаторами *Spectro (Asoma) 682T-HP*, *Spectro 682P-EC* (низкая сера) и *Spectro (Asoma) 682T-HP* для непрерывного контроля серы в потоке высоковязких нефтей под высоким давлением и повышенными температурами (*XRT Spectro* (США, Германия) по стандартам *ISO 20847:2004 (EN 590-04, EN 228-04)* и *ASTMD 4294*.

Амплитуда сигнала спин-эхо не чувствительна к неорганическим примесям и газу. Сигнал от воды обладает наиболее длительным временем релаксации, порядка единиц секунд, и может быть вычтен при компьютерной обработке измерений, либо подавлен путем подачи импульсов с малым периодом запуска.

Из всех полученных корреляций, оптимальной по точности (разбросу точек) и простоте измерения является зависимость (3.12) для времен релаксации $T_{2ВН}$ протонной фазы B нефтепродуктов. Для мазута и битума оптимальными являются корреляции в уравнения (3.17) и (3.19), использующие наиболее длительное время релаксации $T_{2АМ}$ и $T_{2АБ}$.

Полученные числовые коэффициенты в уравнениях верны для использованного нами набора образцов с известными концентрациями содержания серы в нефтях Ромашкинского месторождения, определенными действующим ГОСТ Р 51947–2002. Для других месторождений они могут отличаться.

3.4. Выводы по Главе 3

1. Разработан метод, алгоритм и программно-техническое обеспечение для автоматизированного экспресс-контроля основных характеристик нефти по достоверным данным ПМР-релаксации, полученным в результате мер по повышению надежности и достоверности результатов измерений ПИК.

2. Установлена система математических соотношений, описывающих зависимость между содержанием серы в нефтяных дисперсных системах и параметрами ПМР-релаксации.

3. Предложена, научно обоснована и экспериментально подтверждена методика неразрушающего проточного экспресс-контроля концентраций содержания серы в нефти, мазуте и битуме.

4. Разработаны алгоритм и программа измерений концентрации серы в нефтепродуктах по параметрам времен релаксации T_{2i} протонных фаз *A*, *B* и *C*.

4. ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ СТЕНД ПМРА-IV_{пр} ДЛЯ ОТРАБОТКИ НОВЫХ МЕТОДОВ АВТОМАТИЗАЦИИ ИЗМЕРЕНИЙ, ДИАГНОСТИКИ УЗЛОВ И СРЕДСТВ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ПМР-АНАЛИЗАТОРА НЕФТИ

Материалы главы 4 опубликованы в работах автора [68, 78–80].

В соответствии с государственным стандартом [81], продукция производственно-технического назначения должна подвергаться предварительным, приемочным, приемо-сдаточным, периодическим и типовым испытаниям в зависимости от технических условий объекта. В нашем случае программно-измерительный комплекс должен подвергаться обязательным приемо-сдаточным испытаниям, которые должны давать гарантии надежности оборудования и соответствия комплекса своему назначению – проточному экспресс-контролю характеристик скважинной жидкости, эмульсий и нефти. В данном случае для ПИК следует рассматривать в комплексе конструкционную и эксплуатационную надежность.

Для испытаний ПМРА-IV следует:

- а) составить для ПИК математические и физические модели работы его узлов, блоков и комплекса в целом;
- б) составить расчетные методики определяемых параметров надежности;
- в) составить программу автоматизации процесса измерения максимально возможного количества физико-химических свойств нефти по нескольким ПМР-параметрам;
- г) создать программы для автоматизированной системы управления программно-измерительного комплекса на базе разработанной физической и математической модели.

При составлении математической модели электромагнитных процессов в комплексе учтем, что, хотя уравнения электромагнитного поля были составлены

Максвеллом ещё в XIX веке, их решение даже сегодня можно осуществить лишь приближенными численными методами.

При автоматизации испытаний ПИК вместо точных значений можно ограничиться лишь ответом на вопрос: удовлетворяют ли измеряемые величины соответствующим требованиям или нет? Это может относиться к таким параметрам, как: уровень изоляции, исправность микросхем, межвитковое сопротивление катушки, точность измерений и прочие параметры с обязательным выявлением причин неисправности.

При проведении испытаний должно обеспечиваться единство измерений, т. е. достоверность и сопоставимость результатов измерений одной и той же физической величины с заданной точностью независимо от того, когда, каким методом и какими средствами проводятся измерения. Система измерений электрических величин основывается на эталонах Ампера и производных единицах Ома, Генри, Вольта, Фарадея. Остальные единицы – производны. Ампер и Фарада воспроизводятся абсолютным методом с погрешностью 10^{-5} и $(5 \div 7) \cdot 10^{-7}$.

4.1. Конструкция и принцип работы стенда ПМРА-IVпр

Для проведения отработки методов диагностики узлов ПИК и средств автоматизации его измерений по ПМР-параметрам разработан испытательный стенд, представленный на рисунке 4.1. Отработка происходила с использованием стандартных образцов нефти из ВНИИР им. Д. И. Менделеева, лабораторий НГДУ ПАО «Татнефть» и «Транснефть»

В качестве основы для стенда был взят более ранний проточный ПМР-анализатор ПМРА-III, сконструированный по патенту [82] и схематично представленный на рисунке 4.2.

[illegible]

Рисунок 4.2 - Структурно-функциональная схема проточного анализатора
ПМРА-III

Параметры релаксометра ПМР в составе этих стендов следующие:

1. возможность настройки несущей частоты в диапазоне $\nu_0 = 10 \div 25$ МГц;
2. точность подстройки частоты 0,1 МГц;
3. длительности импульсов: $90^\circ - 5$ мкс, $180^\circ - 10$ мкс; фаза 180° -импульса в зависимости от импульсной последовательности может меняться на $\pm 90^\circ$ и $\pm 180^\circ$;
4. минимальный интервал между $90^\circ -$ м и $180^\circ -$ м импульсами 100 мкс, между $180^\circ -$ ми импульсами $\tau = 200$ мкс, максимальный интервал $\tau = 5$ мс;
5. число $180^\circ -$ импульсов от 1 до 10 000;
6. число накоплений – до 100;
7. усиление сигнала – до 1000.

На стенде может проводиться анализ НДС и жидкого топлива. Температуры при которых возможны измерения $-60..+50$ °С, давление в измерительной емкости (1) до 1 МПа, допускаемый перепад давления для пробоотборника 0,25 – 0,5 МПа, плотность исследуемого вещества 400 – 1100 кг/м³; диаметр трубы в пробоотборнике и зазоре магнита релаксометра 30 мм. В отличие от ПМРА-III испытательный стенд ПМРА-IVпр (рисунок 4.3) имеет следующие особенности:

1. В стенде предусмотрено предварительное намагничивание отобранной порции жидкости перед процессом измерений с помощью составного магнита Хальбаха (3) (рис.4.4). При длине магнита подмагничивания $l_{\text{пм}}$ в три раза 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 для нефти и в 4 раза для воды, что позволяет пропорционально увеличить уровень полезного сигнала. На данный момент это оптимальный полученный показатель усиления, который является достаточным для достоверных измерений, а потому не требует изменения конструкции, которое могло бы повлечь за собой повышение стоимости и массогабаритов данной части комплекса. Измерительный и подмагничивающий (только на левом графике) магниты на рисунке 4.4 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.

2. Стандартная катушка индуктивности в датчике ЯМР заменена на рулонную, выполненную из алюминиевой фольги, для повышения однородности радиочастотного поля B_1 и максимального устранения вибраций катушки от действия мощных РЧ-импульсов в методике КПМГ.

3. Предусмотрен автоматический сбор измеренных порций образца в емкость с контролем массы для последующей верификации характеристик жидкости в лабораторных условиях традиционными методами.

4. Предусмотрен ручной пульт для отладки программ управления и добавлена возможность установки положения патрубка в системе пробоотбора по всей его оси для увеличения точности забора, а не только в крайних положениях, как в ПМРА-III. Алгоритм ручного управления представлен на рисунке 4.5.

5. Имеется насос для циклической подачи потока водонефтяной смеси из накопительной емкости 8 в измерительную емкость 1.

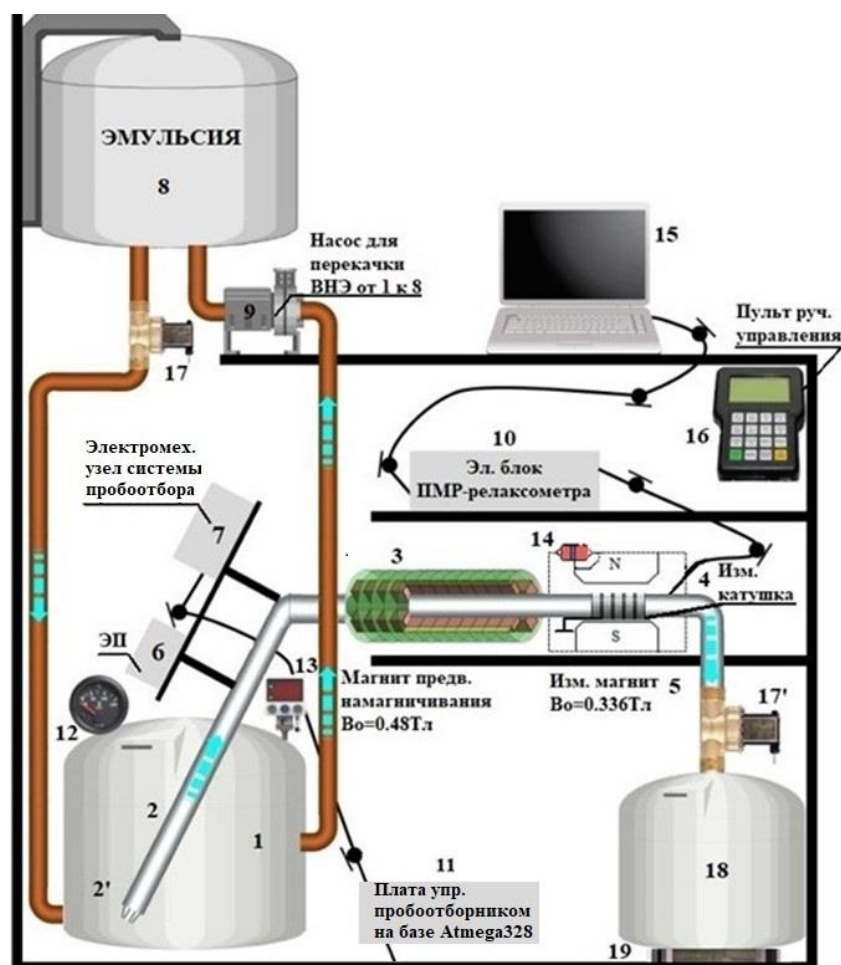


Рисунок 4.3 - Структурно-функциональная схема стенда ПМРА-IVпр

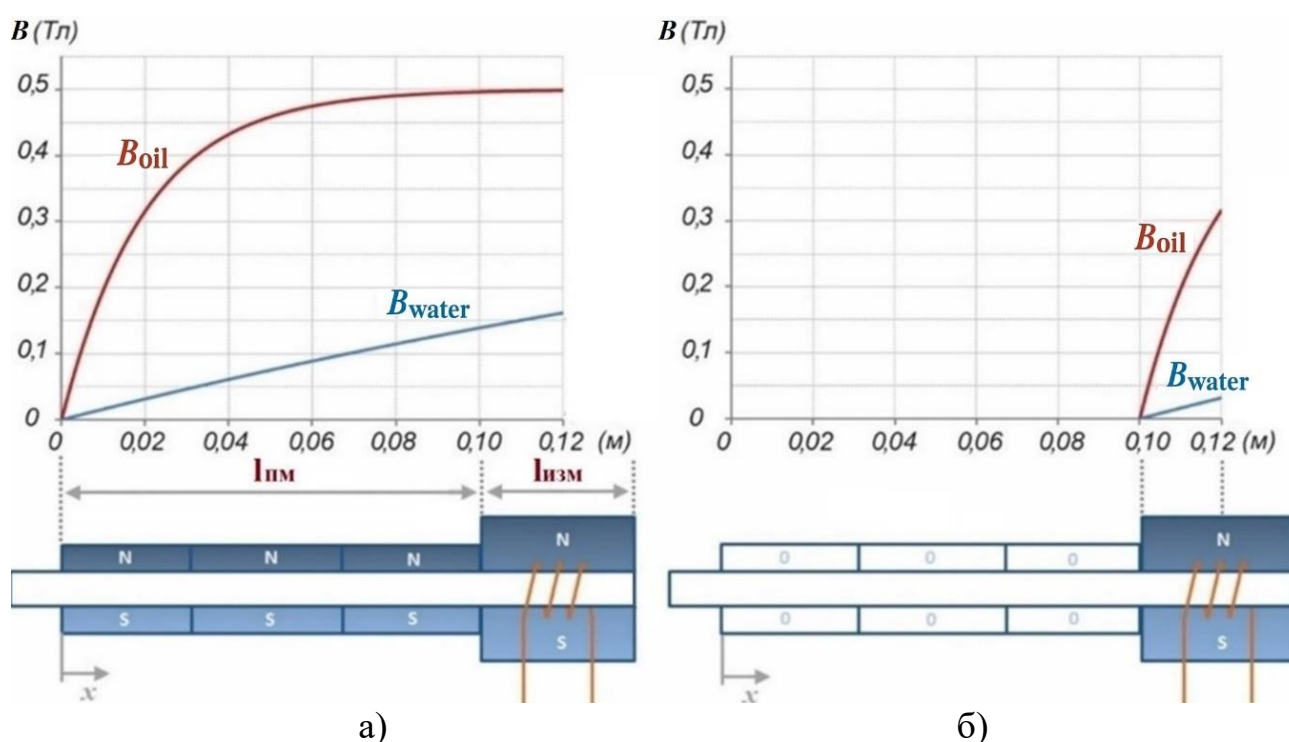
На рисунке 4.3. использованы следующие обозначения:

- 1 – измерительная емкость для турбулизации потока с целью получения порций однородного образца;
- 2 – пробоотборный патрубок (2' - его положение у входа потока);
- 3 – постоянный магнит Хальбаха для подмагничивания жидкости перед подачей к измерительному постоянному магниту;
- 4, 5 – рулонная катушка индуктивности датчика и магнит для измерений;
- 6 – электропривод для перемещения патрубка пробоотборника;
- 7 – электромеханический блок в системе пробоотбора;
- 8 – емкость с эмульсией, из которой поступает поток жидкости;
- 9 – циркуляционный насос, перекачивающий жидкость из емкости 1 в емкость 8;
- 10 – электронный блок релаксометра ПМР, управляющий процессом измерения ПМР-параметров;
- 11 – блок управления пробоотбором на базе микроконтроллера *Atmega328*;
- 12 – датчик давления общетехнический ТМ-510Р.00 (0–1,0 МПа);
- 13 – датчик температуры жидкости на базе микросхемы *DS18B20* (диапазон измерений $-55...+125$ °С, цифровой выход с интерфейсом 1-Wire, погрешность измерений $\pm 0,4$ °С в диапазоне $-10...+70$ °С, скорость измерений до 93,75 мс) [83];
- 14 – малоинерционный поверхностный термодатчик на элементе Пельтье *TEC1-12706* (диапазон измерений $-50...+80$ °С, выход аналоговый) для измерения температуры внутренней поверхности магнита с погрешностью 0,1% по патенту [84];
- 15 – ноутбук с программой управления и контроля для проведения самодиагностики ПИК и автоматизированного контроля характеристик нефти по параметрам ПМР-релаксации;
- 16 – пульт ручного управления стендом;

17 – клапана с автоматическим реле и питанием от аккумулятора марки Росма СК-11-ВД Ду25 Ру16; с мембраной NBR, давлением номинальным 16 бар; исполнение клапана - нормально закрытый; температура - до 90 °С; вес 1,14 кг;

18 – емкость для слива измеренных порций жидкости для последующих испытаний и верификации измерений в лабораторных условиях в течение длительного времени, в том числе, по традиционным методикам;

19 – устройство измерения массы слитой жидкости, построенное на тензодатчиках.



Рисунке 4.4 - Иллюстрация метода повышения уровня полезного сигнала ПМР:

а) сигнал с предварительным намагничиванием, б) сигнал без предварительного намагничивания

Ручное управление работой стенда осуществляется по алгоритму, представленному на рисунке 4.5, где кнопки, нажимаемые на пульте управления, опции и параметры выделены курсивом. Ниже представлено описание этого алгоритма.

1. Нажать кнопку *НАЧ УСТ.*

2. Нажать кнопку *РУЧН СИСТ*, то есть включить релаксометр ПМР в составе комплекса и ноутбук, включить программу управления.

3. Нажать кнопку *Pr1, НАЧ УСТ* для поверки релаксометра по внутреннему стандартному образцу. На интерфейсе ноутбука настроить параметры измерений:

а) *резонансную частоту* - по максимуму амплитуды спин-эхо (СЭ);

б) установить: *период* запуска импульсов $T = 7$ с, *число импульсов* $N = 500$, *длительности импульсов* $\delta_{90} = 10$ и $\delta_{180} = 20$ мкс, *интервал* между 90° и 180° импульсами $\tau = 200$ мкс ($2\tau = 400$ мкс между 180° импульсами), *усиление* $U \approx 37-40$ (до достижения значения $As_{\text{э}} = 240-243$), *число накоплений* $n = 7$.

Далее на интерфейсе релаксометра необходимо нажать опцию *Старт*, через 7 накоплений – опцию *Анализ*. После этого появляется трехэкспоненциальная кривая логарифмов огибающей СЭ. Затем следует переместить курсор на кривой до линейного участка огибающей логарифмов СЭ, нажать клавиши *Подгонка*, *Вычитание* и тогда появится ряд новых точек логарифмов СЭ второй фазы. Затем необходимо снова переместить курсор до линейного участка, нажать *Подгонка*, *Вычитание*. После этого появится еще ряд новых точек логарифмов СЭ третьей фазы. Характер графиков будет соответствовать рисунку 1.2. После очередного нажатия клавиши *Подгонка* на нижней панели появятся значения ПМР-параметров. Они должны соответствовать ПМР-параметрам (T_{2i} - временам спин-спиновой релаксации, P_{2i} - населенностям протонов, где I – протонная фаза вещества) стандартного образца эмульсии: $T_{2A} = 2$ с, $T_{2B} = 300$ мс, $T_{2C} = 10$ мс, $P_{2A} = 0,8$, $P_{2B} = 0,15$, $P_{2C} = 0,05$. Если наблюдается существенное (больше 4%) несоответствие, подбором параметров настроек измерений добиться ближайшего совпадения данных.

4. Нажать кнопку *Pr2 ОДНОКР*, то есть запустить насосом 9 поток водонефтяной эмульсии из накопительной емкости 8 в измерительное конформное расширение измерительной емкости 1.

5. Нажать кнопку *АНАЛОГ ПУСК Pr3*, то есть включить измерение ПМР-параметров эмульсии. К алгоритму измерения подключается *подпрограмма измерений* ПМР-параметров.

6. Нажать кнопку *ЦИКЛ*, то есть осуществить повторение пунктов 1–5 для выполнения n *накоплений* измерений. Цикл завершается при достижении заложенного в программе числа накоплений (пример: $n=7..12$).

7. Нажать кнопку *АВТО Δ*, тем самым включается измерение температуры t °C и вычисление характеристик НДС с учетом температуры образца.

8. Нажать кнопку *ПЕРЕДАЧА*, тем самым измеренные данные пересылаются и запоминаются в базе данных на ноутбуке.

9. После выполнения измерений необходимо открыть кран слива измеренного объема жидкости в специальную емкость. Данная порция нужна для подтверждения данных традиционными методами в лабораториях, что потребует длительного времени (порядка нескольких часов).

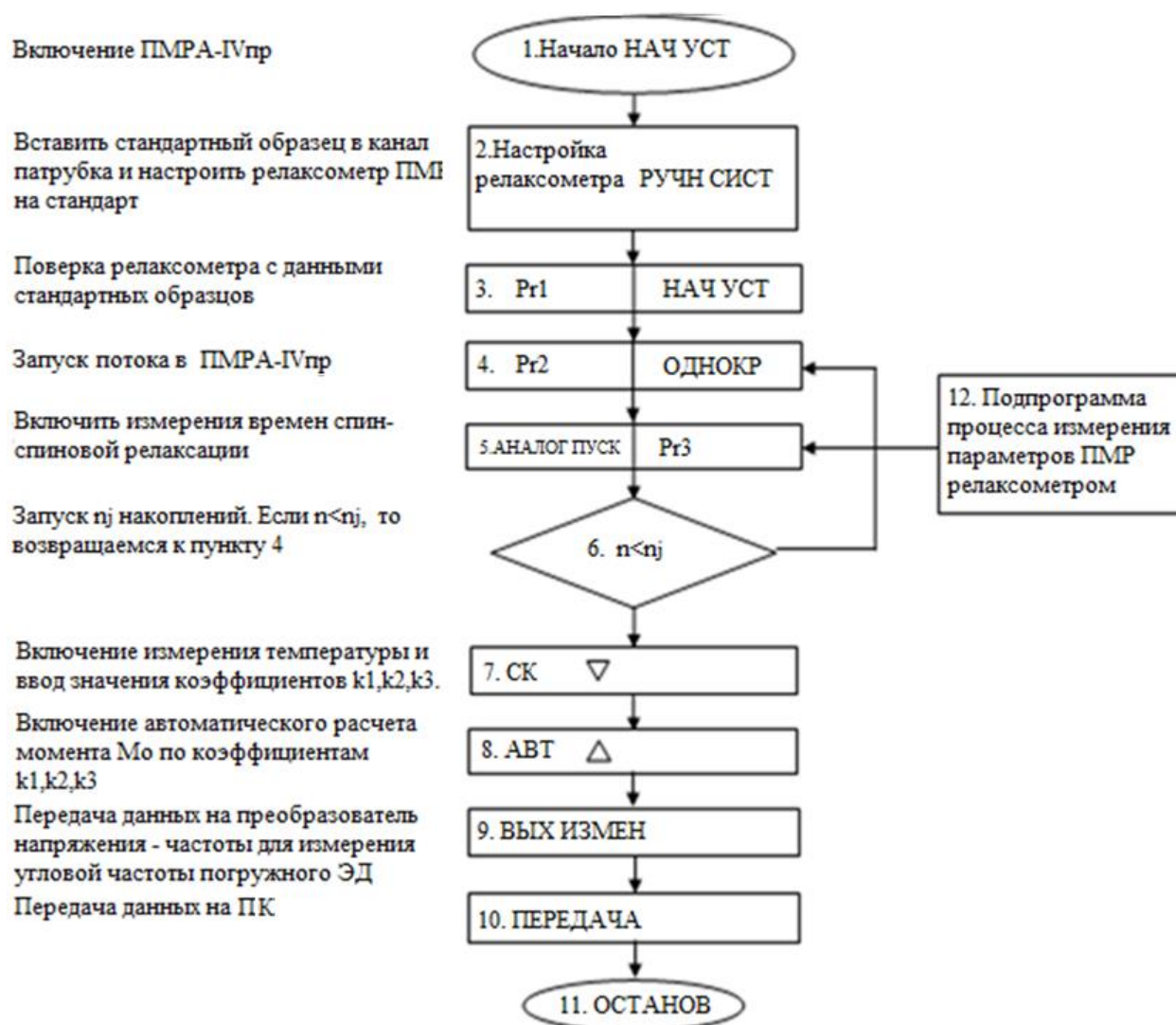


Рисунок 4.5 - Алгоритм ручного управления стендом ПМРА-IVпр

4.2. Повышение надежности работы блоков ПИК ПМРА-IV

Для увеличения надежности цифровой части ПИК следует воспользоваться повышением степени интеграции его элементов. В последние десятилетия появились новые программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС), на которых можно сформировать компактные управляющие электронные устройства высокой степени интеграции. Поэтому в используемом релаксметре ПМР в составе ПИК (проточного ПМР-анализатора) было применено данное техническое решение. Использование ПЛИС *EP2C5T144C8* в составе релаксметра позволило снизить габариты, а также существенно повысить надежность. За счет объединения множества функциональных блоков на одном кристалле сокращается количество внешних соединений и дискретных элементов, что уменьшает вероятность отказов, связанных с контактами, пайкой и межкомпонентными соединениями. ПЛИС позволяют вносить изменения в логику работы устройства посредством перепрограммирования. Это означает, что в случае выявления ошибок или изменений в требованиях к прибору можно оперативно обновить функциональность без необходимости замены аппаратной части, что снижает риск отказов в будущем. ПЛИС также позволяют реализовать схемы резервирования (например, дублирование критичных блоков) и механизмы самодиагностики, а также встроенные алгоритмы коррекции ошибок. Это помогает обнаруживать и устранять сбои до того, как они приведут к отказу системы.

Для повышения чувствительности измерений релаксметра следует повысить частоту резонанса ν_0 , поскольку отношение сигнал/шум пропорционально квадрату данного параметра. В сравнении с релаксметрами в анализаторах предыдущего поколения, резонансная частота релаксметра в ПМРА-IV была увеличена до $\nu_0 = 18,45$ МГц, что подняло чувствительность с таким же диаметром датчика в 1.6 раз. Устройство обладает меньшими габаритами и массой. В качестве измерительного магнита использована конструкция Хальбаха [85].

Для устранения влияния вибраций датчика от мощных возбуждающих импульсов проводная катушка индуктивности заменена на катушку рулонной намотки из полоски алюминиевой фольги толщиной 40 мкм и шириной 35 мм. Такое техническое решение значительно уменьшает влияние вибрации и обеспечивает высокую однородность радиочастотного поля возбуждения датчика ЯМР в 98%, которое на 75% определяется катушкой. Несмотря на то, что медь имеет лучшие параметры по сравнению с алюминием, проверка на медной фольге ощутимых преимуществ не выявила. Поэтому была выбрана алюминиевая фольга с меньшей себестоимостью.

Значение постоянного тока питания электромагнита катушки в системе перемещения патрубка выбрано таким, чтобы повышение температуры её обмотки не превышало 1 °С. Скорость изменения температуры выражается уравнением:

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{j^2}{n} \quad (4.1)$$

где j – плотность тока в обмотке А/мм²;

$n = 200$ – количество витков для обмотки.

4.2.1. Повышение надежности электронных блоков ПИК за счет использования цифровых схем с высокой степенью интеграции элементов

Применение цифровых схем в ПМРА-IV позволяет оцифровать сигнал на ранних этапах, минимизируя влияние аналоговых шумов. К тому же цифровые устройства обеспечивают точную дискретизацию сигнала и исключают ошибки, связанные с механическим дрейфом или устареванием компонентов, а современные АЦП, ЦАП имеют ещё и автоматическую коррекцию ошибок, самокалибровку и компенсацию температурных изменений. Цифровые микросхемы меньше подвержены влиянию влажности и механических воздействий. При этом они могут быть легко интегрированы с микроконтроллерами, компьютерами и ПЛИС.

Управляющим элементом ПМРА-IV является ПЛИС *EP2C5T144C8*, к выходу которого через цифровые выводы подключается синтезатор частоты, с последовательно подключенным к нему формирователем импульсов и передатчиком (см. рисунок 2.1). По команде ПЛИС передатчик подает усиленные импульсы возбуждения в датчик ПМР, откуда ответный сигнал поступает на вход приемника, далее - на АЦП с интегратором и входы *EP2C5T144C8*. Управляющие команды для релаксометра и полезные данные от анализатора передаются посредством интерфейса *USB* на ПК и от него.

Основные характеристики *EP2C5T144C8*:

- программируемая вентиляционная матрица семейства *CycloneR II*;
- 4608 ячеек;
- тактовая частота работы 402,58 МГц;
- 90 нм-технология;
- электропитание 1,2 В;
- 144-Pin *TQFP* корпус.

Цифровой синтезатор частоты. Из числа выпускаемых в настоящее время синтезаторов частоты на основе прямого цифрового синтеза (*DDS*) был выбран наиболее подходящий, доступный и оптимальный – *AD9851* с максимально допустимой частотой 180 МГц, который позволяет получать необходимый сигнал. Важно то, что синтезатор задает резонансную частоту ν_0 с высокой точностью. Поскольку отношение сигнал/шум пропорционально квадрату частоты, отклонение ν_0 всего на 1–2% ведет к снижению отношения сигнал/шум до 4%. В синтезаторе возможно изменение фазы сигнала в интервале 0 – 360° с шагом 11,25°, что необходимо для использования многоимпульсных методик измерения времен релаксации. Для установки частоты и фазы может быть использована либо последовательная, либо параллельная загрузка 40-битного управляющего кода. На рисунке 4.6 приведена принципиальная схема синтезатора частоты вместе с цепями управления. Для хранения управляющих кодов используются микросхемы регистров *KP1533ИР22*. Задающий генератор построен на микросхеме *KP1533ЛА3 (D1)* по стандартной схеме. Проведенные испытания на стенде показали

принципиальную возможность использования *DDS* синтезатора в качестве генератора резонансной частоты релаксометра. Программа управления синтезатором приведена в Приложении А.

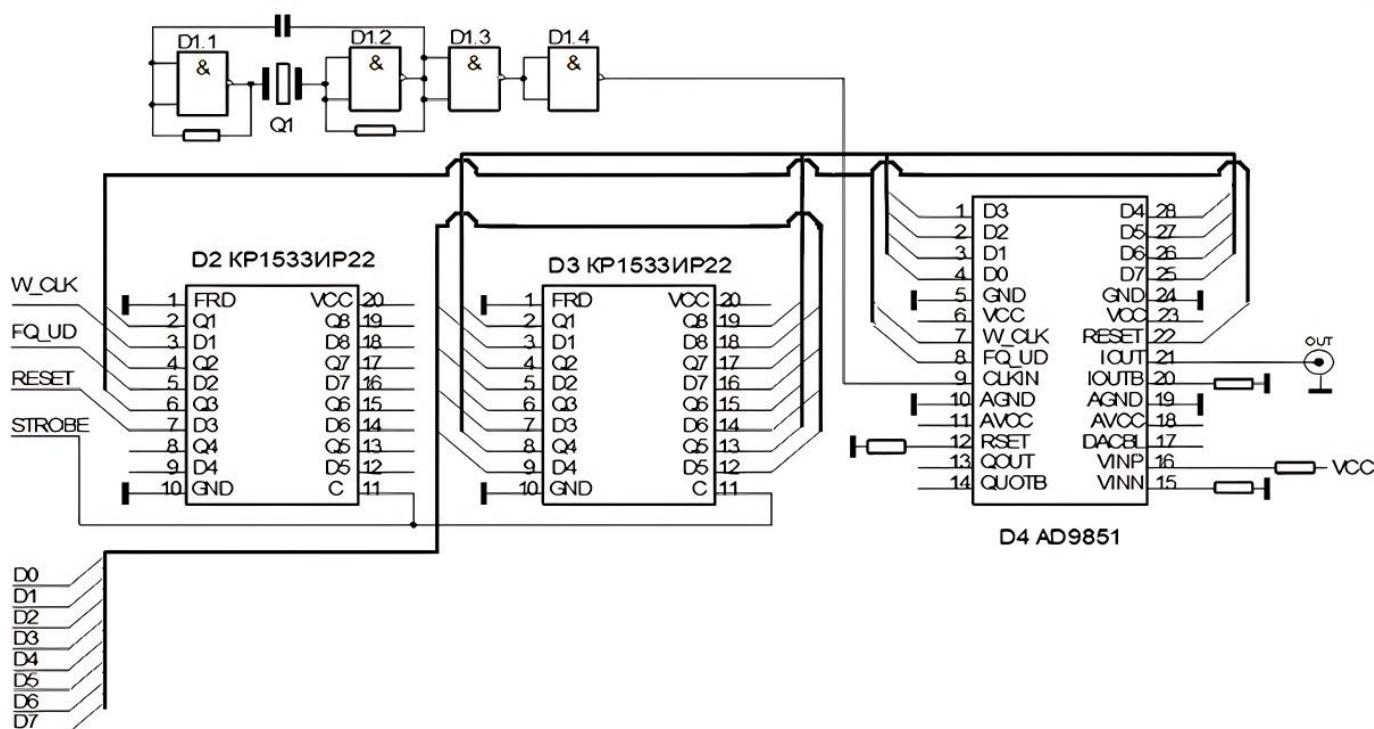


Рисунок 4.6 - Принципиальная схема цифрового синтезатора

Цифровые формирователи радиочастотных импульсов. Каждый из формирователей радиочастотных импульсов включает 8-разрядный программируемый вычитающий счетчик *HCF40103* и 8-разрядный регистр *KP1533ИР37*, хранящий код длительности импульса (рис. 4.7). Запуск формирователей осуществляется импульсами *Start*, поступающими с выходов генератора импульсных последовательностей. Информация в регистры заносится всякий раз, когда оператор изменяет длительность импульса. Формирователи позволяют получать импульсы длительностью от 0,5 до 128 мкс с шагом 0,5 мкс. Подпрограмма управления формирователем приведена в Приложении А.

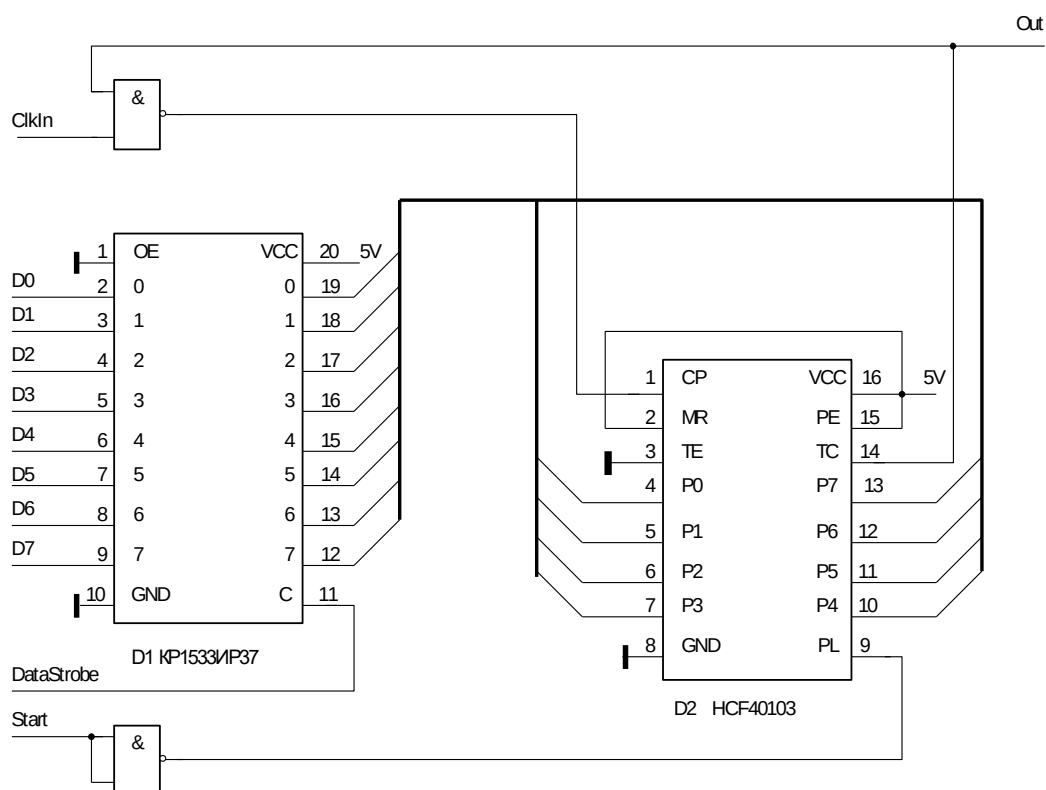


Рисунок 4.7 - Принципиальная схема формирователя импульсов

Узел цифрового измерителя сигналов ПМП. В качестве измерителя усиленных амплитудных сигналов СЭ используется аналого-цифровой преобразователь *AD7813* с интегратором (см. рисунок 4.8). С него данные уже в цифровом виде поступают через ПЛИС и преобразователь *UART-USB* на ПК в программу контроля. Основные параметры микросхемы *AD7813* [86]:

1. разрядность: 8/10 бит;
2. тип входного сигнала: однополярный;
3. диапазон входного напряжения: 0–2,5 В (при $V_{REF} = 2,5$ В);
4. опорное напряжение (V_{REF}): внешнее, до 2,5 В;
5. скорость преобразования: до 200 квыб/с;
6. интерфейс: последовательный *SPI*-совместимый;
7. питание: 2,7–5,5 В;
8. потребляемый ток: 450 мкА при 3 В, 750 мкА при 5 В;
9. режим энергосбережения: снижает потребление до 1 мкА.

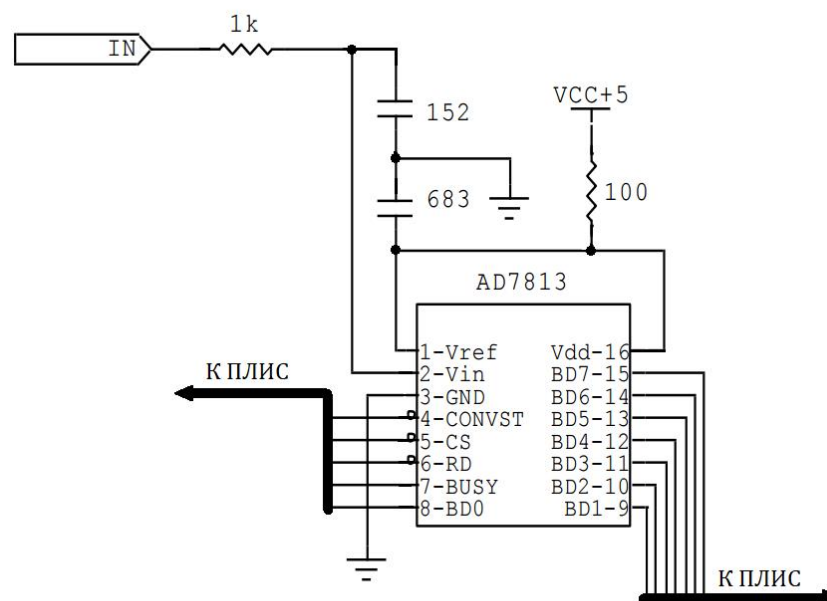


Рисунок 4.8 - Принципиальная схема узла измерений сигналов спин-эхо

4.2.2. Зависимость поля магнита от температуры окружающей среды

Исследование температурной зависимости двух магнитов релаксометра на основе сплавов *NdFeB-35* показало, что они подчиняются зависимостям:

$$\nu = 8050 - 4,47[t - 15] \quad (4.2)$$

$$\nu = 4737 - 3,375[t - 15] \quad (4.3)$$

где абсолютные значения являются экспериментально выведенными коэффициентами; обозначения t – температура в °С, ν – резонансная частота в кГц.

Как видим, средний температурный коэффициент ухода частоты ≈ -4 [кГц/°С], что соответствует $\sim 0.1\%$. Изменение окружающей температуры, которая в полевых условиях может меняться, по меньшей мере, на 40 °С требует подстройки резонансной частоты в диапазоне $\nu_0 \sim \pm 2\%$. Поэтому ПИК должен размещаться в закрытом боксе. В разработанном варианте релаксометра подстройка частоты возможна от 10 до 25 МГц.

4.2.3. Датчик протонного магнитного резонанса

В ПМРА-IV был использован однокатушечный датчик, состоящий из параллельного колебательного LC -контура, где однородность радиочастотного поля на 75% определяется рулонной намоткой витков катушки датчика. Для определения сопротивления при резонансе использовались формулы (4.4) – (4.6):

$$R_{\text{рез}} = \rho \cdot Q \quad (4.4)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{\text{кат}}C}} \quad (4.5)$$

$$\rho = \sqrt{\frac{L_{\text{кат}}}{C}} \quad (4.6)$$

где ρ - волновое сопротивление;

f_0 – резонансная частота колебательного контура;

Q – его добротность;

R – сопротивление;

L – индуктивность;

C - емкость.

Для параллельного контура стоит избегать шунтирования активным сопротивлением, поскольку это способствует уменьшению добротности, и соответственно, увеличению уровня шумов. Мощные ВЧ-импульсы от передатчика с частотой ν_0 проходят через выпрямительные диоды и по кабелю поступают к катушке датчика. Во время действия импульса низкое выходное сопротивление передатчика шунтирует резонансное сопротивление параллельного колебательного контура, обеспечивая расширенную полосу частот для минимального искажения спектра ВЧ импульсов, которыми происходит облучение образца. Степень шунтирования (добротность контура Q в момент ВЧ импульса) зависит от выходного сопротивления передатчика, коэффициента трансформации трансформатора и волнового сопротивления кабеля. Элементы конструкции устройства соответственно были подобраны таким образом, чтобы достигнуть

минимальных искажений формы ВЧ импульсов при заданной длительности 90° импульса и напряжении питания $U_{\text{пит}}$.

Параметры магнита определялись таким образом, чтобы добиться достаточного усиления сигнала и получения достоверных первичных данных без необоснованного повышения массогабаритов и стоимости данной части системы. Параметры элементов конструкции определялись также их доступностью и наличием в продаже, оптимальным соотношением цены и необходимых параметров. Так, в [87] приведены следующие параметры используемого составного магнита Хальбаха: материал - сплав $NdFeB-35$, размеры постоянных магнитов $10 \times 10 \times 10$ мм; число магнитов на 3 секции $3 \cdot 16 = 48$; общая индукция магнитного поля $B_0 = 0,48$ Тл, неоднородность $\Delta B_0/B_0 = 1,2 \cdot 10^{-4}$ на расстоянии 40-60 мм. Общий вес магнита на диаметр образца $\varnothing = 35$ мм составляет 4,3 кг, что в 4 раза меньше, чем вес магнита со сплошным магнитопроводом из мягкого железа (электротехнической стали).

4.2.4. Влияние динамических нагрузок от потока жидкости на точность отбора проб

В программно-измерительном комплексе ПМРА-IV, в узле системы пробоотбора, могут возникать динамические нагрузки, которые способны носить характер переходных или установившихся процессов. Переходные процессы, являясь реакцией конструкции на единичные возмущения, возникают при приложении, изменении или сбросе внешней нагрузки.

Вынужденные колебания вызываются внешними периодическими или случайными силами. В нашем случае для системы пробоотбора, устанавливаемой на потоке СКЖ, скачки и перепады давления в трубопроводе вызваны работой оборудования на стадиях добычи и подготовки нефти. Эти факторы приводят к динамическим нагрузкам, меняющимся случайным или периодическим образом, характер изменения которых сложно прогнозировать. При совпадении частот внешних периодических сил с одной из частот собственных колебаний

конструкции системы пробоотбора могут возникать явления резонанса, существенно искажающие рабочие режимы и приводящие к неточностям отбора пробы. Это, в свою очередь, снижает достоверность измерений ПМР-параметров в релаксометре ПМР, входящем в состав ПИК. Кроме того, эти явления снижают надежность узла пробоотбора.

В ПИК третьего поколения (ПМРА-III) пробоотборный патрубок в измерительной ёмкости перемещается с помощью электропривода, что вносит свою долю неопределённости в стабилизацию его положения из-за люфтов и запаздываний подвижных деталей системы. Поэтому в последующей модификации ПИК (ПМРА-IV) была внедрена простая и надёжная система фиксации положения патрубка с использованием электромагнитной катушки.

В старой версии анализатора также имелся ещё один конструктивный недостаток — крупные габариты платы *Atmel STK500*, отвечавшей за управление системой пробоотбора. Для повышения надёжности комплекса возникла необходимость заменить её на более компактную, которую можно было бы закрепить на внутренней боковой стенке корпуса анализатора. Такое решение позволяет обеспечить лучшую устойчивость к вибрационным воздействиям. Кроме того, уменьшенные размеры способствуют более эффективному теплоотводу за счёт локализации зон нагрева и плотного прилегания платы к корпусу.

Ещё одной проблемой являлось то, что программа на *STK500* позволяла перемещать патрубок пробоотборника только до крайних положений, а точность дозировки жидкости, поступающей в датчик релаксометра, была недостаточной.

Для устранения указанных недостатков было принято решение перенести и модернизировать программное обеспечение на более современный и распространённый микроконтроллер *Atmega328*. Модернизация программного обеспечения и переход на новую управляющую плату, спроектированную Нгуеном Д.А. [80], позволили значительно уплотнить компоновку элементов. Это, в свою очередь, позволило сократить длину соединительных проводников, снизить уровень наводок, паразитных ёмкостей и индуктивностей, а также повысить стабильность работы и уменьшить вероятность сбоев. Также в новой плате была

реализована возможность фиксации патрубка в произвольной точке оси, что обеспечило более точный забор проб. Поскольку *Atmega328* является более популярным и современным микроконтроллером, внедрение этих изменений потенциально упрощает процесс серийного производства устройства и ремонта данного узла ПИК.

Кроме того, была разработана программа в среде *LabVIEW*, позволяющая управлять положением патрубка напрямую с ПК, подключённого к ПМР-анализатору (рисунок 4.9).

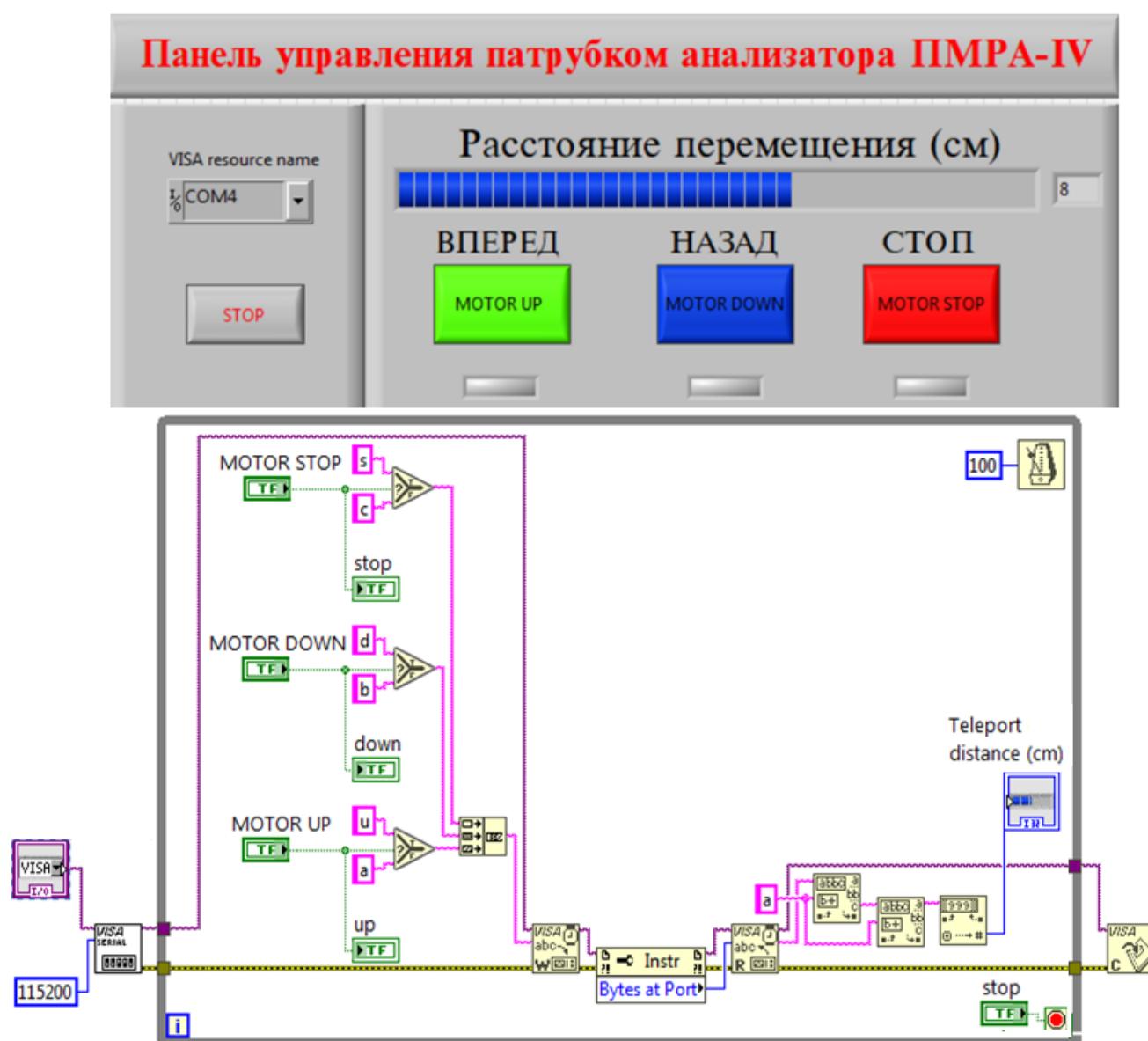


Рисунок 4.9 – Программа управления положением патрубка в системе пробоотбора для ПК

4.3. Меры по снижению неопределенности и погрешностей измерений

Для измерения различных величин должна сопутствовать некоторая количественная характеристика качества результата измерений для оценки его достоверности. Для раскрытия данного вопроса обратимся к ГОСТ 34100.3–2017 «Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения»

«Неопределенность измерения» означает сомнение в достоверности результата измерения. Специальные термины для величин, характеризующих количественную меру такого сомнения, отсутствуют. Поэтому слово «неопределенность» используют и в указанном широком смысле, и в смысле некоторой количественной меры. Это параметр, относящийся к результату измерения и характеризующий разброс значений, которые могли бы быть обоснованно приписаны измеряемой величине.

Понятие неопределенности измерения является привязанным в первую очередь к результатам измерения и оценке его неопределенности. Однако оно не противоречит использованию понятия в других смыслах, таких как: мера возможной погрешности оценки измеряемой величины, полученной как результат измерения; оценка, характеризующая диапазон значений, в пределах которого находится истинное значение измеряемой величины. Хотя оба этих традиционно используемых представления справедливы как идеализация, основной акцент в них сделан на неизвестные величины: «погрешность» результата измерения и «истинное значение» измеряемой величины.

Погрешность результата измерения обусловлена несовершенством измерительной процедуры. Традиционно погрешность рассматривают как сумму случайной и систематической погрешностей. Погрешность является идеализированным понятием, поскольку на практике ее точное значение неизвестно. Предполагается, что случайная погрешность возникает из-за непредсказуемых временных или пространственных изменений влияющих величин (магнитного поля, температурных колебаний и т. д.). Следствием таких

воздействий являются изменения измеряемой величины при повторных наблюдениях. Хотя случайную погрешность нельзя компенсировать введением поправки, ее можно уменьшить, увеличив число наблюдений. Математическое ожидание для случайной погрешности равно нулю. Выборочное же стандартное отклонение среднего арифметического значения является мерой неопределенности среднего значения, обусловленного случайными эффектами. Систематическую же погрешность, как и случайную, нельзя устранить полностью, но можно уменьшить.

Погрешности аппаратные. Линейность синхронного и амплитудного детектора в разработанном стенде ПМРА-IVпр составляет не менее 40 Дб при максимальном перепаде амплитуд (в 8-разрядном АЦП от 10 до 240 у. е.). Неоднородность радиочастотного поля H_1 минимизируется использованием рулонной катушки датчика, которая имеет в 75% объема неоднородность $H_1 < 2\%$. Погрешность от нестабильности H_1 не превышает 0,5%. Погрешность от резонансных условий, возникающая при расстройке контура, устраняется путем подстройки частоты резонанса перед каждым измерением. Сама же расстройка в ходе эксперимента минимальна, поскольку ширина частотной полосы датчика составляет $\Delta f = 300$ кГц. Стабильность длительностей импульсов обеспечивается цифровыми микросхемами и составляет $\pm 0,2 \%$.

Погрешности, определяемые условиями эксперимента. Стабильность температуры в термодатчике релаксометра стенда и в термостате, в который помещается магнит релаксометра, поддерживается с точностью $\pm 0,5$ °С [88]. Образцы выдерживаются при заданной температуре в течение, минимум, 5 минут. Учитывая диапазон температурных измерений (20 – 180 °С для нефтяных дисперсных систем), погрешность от нестабильности температурных условий оценивается в $\delta_T = \Delta t/t = 2\%$, и при перепадах температуры ± 5 °С уход резонансной частоты составляет всего ± 20 кГц ($\pm 0,2\%$).

Погрешности воспроизводимости, дополнительные, систематические, прогрессирующие и основная. Погрешность воспроизводимости амплитуды сигнала γ_B определяется как:

$$\gamma_B = \Delta_{\text{куMax}} 100\% \frac{1}{\lambda_{\text{max}} - \lambda_{\text{min}}} = \Delta_{\text{куMax}} 100\% \frac{1}{Nq} = 100\% \frac{1}{2N} \quad (4.7)$$

где $\Delta_{\text{куMax}}$ – погрешность АЦП;

$N = \lambda_{\text{max}} - \lambda_{\text{min}}$ – число интервалов квантования q .

При использовании АЦП с разрядностью 8-бит $\gamma_B = 100\%/2 \cdot 256 = \pm 0,2\%$.

Дополнительная погрешность $\gamma_\partial = \pm 0,24\%$ связана с изменением частоты поля магнита из-за внешней температуры. К ней также следует добавить, погрешность нестабильности магнитного поля и измерительных импульсов. Исходя из этого, $\gamma_\partial = \pm (0,24 + 0,5 + 0,2)\% \approx \pm 0,94\%$. Погрешности, связанные с процессами в элементах устройства, регистрировались самодиагностикой, описанной в Главе 2. Температура при экспериментах поддерживалась с точностью $\pm 0,5^\circ\text{C}$, что было в пределах *систематической* погрешности $\gamma_c = \pm 0,25\%$.

Таким образом, основная инструментальная погрешность составила: $\gamma_0 = \gamma_B + \gamma_\partial + \gamma_c = \pm (0,20 + 0,94 + 0,25)\% = \pm 1,39\%$, что в сумме с погрешностью измерений времен спин-спиновой релаксации в $\pm 2,5\%$ дает основную приведенную погрешность измерений, равную $\pm 3,89\%$

4.4. Алгоритм процесса измерения серосодержания и свойств нефти по параметрам ПМР-релаксации

На рисунке 4.10. приведен алгоритм процесса измерения характеристик нефти и содержания в ней серы по параметрам ПМР-релаксации.

Поскольку в параметрах ПМР наблюдаются температурные зависимости от измеряемых НДС (рисунок 4.11), также составлена методика повышения достоверности результатов измерений, учитывающая изменение T_{2i} . Поскольку применяемое здесь уравнение Аррениуса позволяет лишь приближенно судить об интересующих нас величинах, то следует уточнить, что зависимости для мазута и битума на данном графике справедливы лишь до точки возникновения значительного отклонения на отметке $3.2 [10^3/T (\text{K}^{-1})]$, соответствующей $T \approx 315 \text{ K}$.

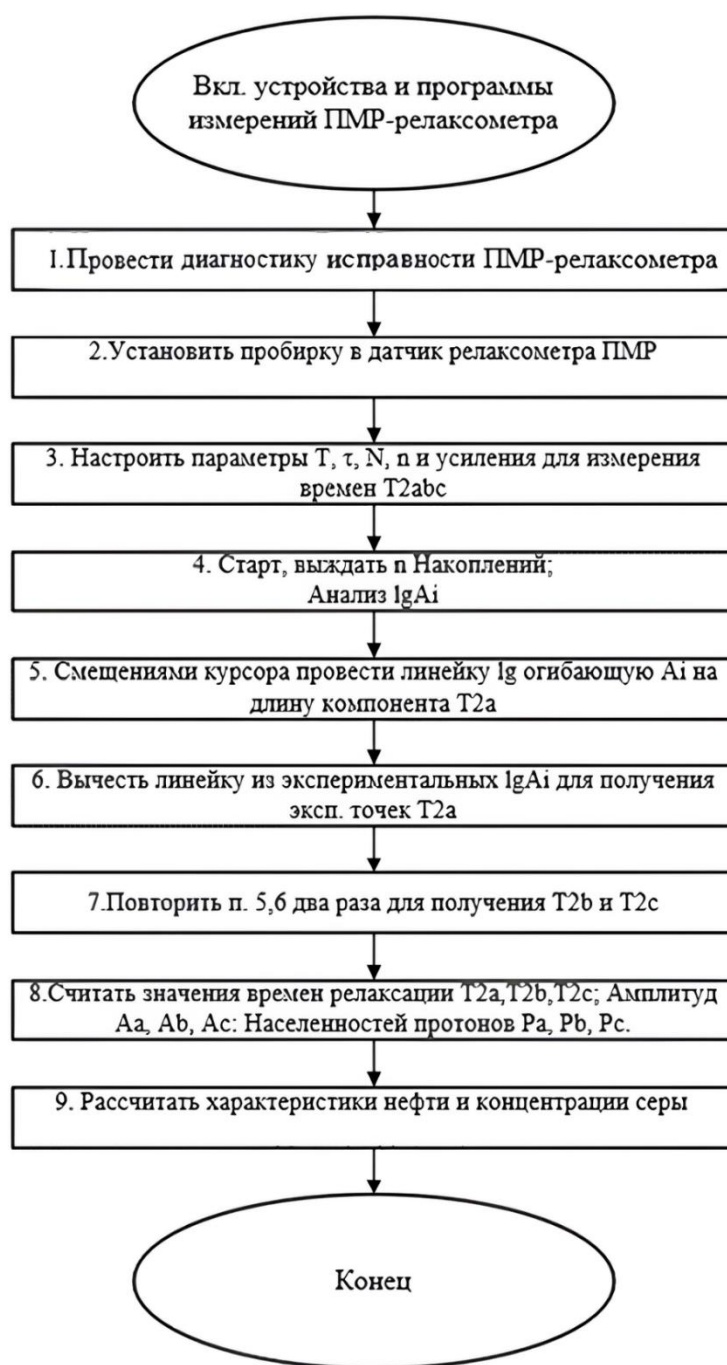


Рисунок 4.10 - Алгоритм измерения ПМР-параметров на испытательном стенде

Для получения данных значений были проведены измерения с погрешностью менее 4% (см. п.4.3) с количеством накоплений в 75 для усреднения данных и минимизации неопределенности измерений. Вместе с этим учитывалась неточность в определении энергий активации E_A , которая состояла из ошибок в определении времен корреляции, а также температур для уравнения Аррениуса и составила не более 6%.

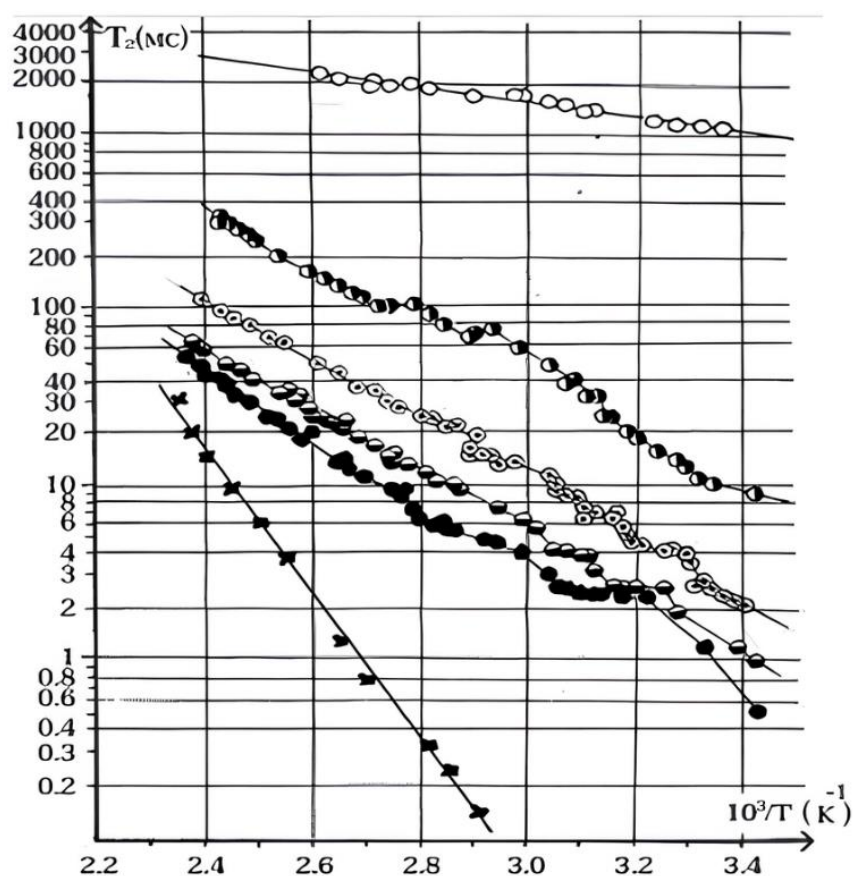


Рисунок 4.11 - Температурные зависимости времен спин-спиновой релаксации T_{2i} в дизельном топливе (○), нефти Зюзеевского месторождения (●), пиролизной смоле (⊙), мазуте (◐), битуме (●) и полиэтилене (×)

Таким образом, для разных образцов НДС температурные зависимости будут отличаться предэкспоненциальными коэффициентами k_1 и значениями энергий активации E_A молекулярного движения согласно уравнению Аррениуса:

$$T_2 = k_1 e^{\left(-\frac{E_A}{kT_{\text{абс}}}\right)} \quad (4.8)$$

где T_2 – время спин-спиновой релаксации;

k_1 - предэкспоненциальный множитель;

$T_{\text{абс}}$ – температура в градусах Кельвина;

k - константа скорости, вычисляемая по уравнению Аррениуса.

Значения энергий активации - E_A приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 - Энергии активации для Зусеевской нефти, мазута, и битума, а также для полиэтилена низкого давления (ПЭНД)

Вещество	Параметр ПМР	Энергии активации	
		E_A (ккал/моль)	E_A (кДж/моль)
нефть	по T_{2A}	$7,541 \pm 0,428$	$31,55 \pm 1,79$
мазут	по T_{2A}	$8,649 \pm 0,831$	$36,19 \pm 3,48$
битум	по T_{2A}	$10,360 \pm 0,559$	$43,35 \pm 2,34$
ПЭНД	по T_{2A}	18,736	78,39

4.5. Резервирование блоков программно-измерительного комплекса

Структурная схема блоков ПИК приведена на рисунке 4.12. Здесь использованы обозначения: ПсП – подвижный патрубок с электроприводом; РелПМР – релаксометр ПМР; ЭМкат – электромагнитная катушка в составе пробоотборника; КлсЭД – клапан с электроприводом, используемый при сливе проанализированных жидкостей обратно в нефтепровод; ИП – источник питания (аккумулятор).

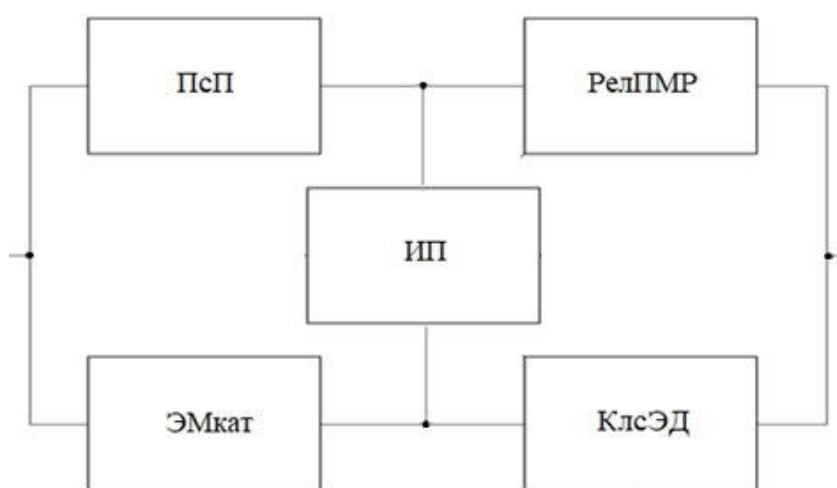


Рисунок 4.12 - Структура мостиковой схемы блоков ПИК

Для надежной работоспособности РелПМР и КлсЭД, т. е. возможности измерений отобранных образцов и их слива подходит указанная схема, но есть

необходимость в дублировании источника питания и резервировании важных элементов релаксометра ПМР.

К числу блоков, которые, на наш взгляд, имеют наиболее низкую надежность и которые следует зарезервировать, относятся:

1. РелПМР – основной блок-системы для управления измерениями и вычислений, имеющий риск отказа в ряде случаев, которые связаны с большим количеством сложных схем и используемых электронных компонентов.

2. ИП - источник питания (аккумулятор), который соединен с обеими цепями, и, следовательно, будет определять надежность релаксометра ПМР и КлсЭД.

4.5.1. Резервирование радиоэлементов плат релаксометра ПМР

Электронная система релаксометра ПМР состоит из нескольких плат: передатчика, приемника, преобразователя питания. Платы, в свою очередь, состоят из l типов разных электронных элементов. Известны значения параметров элементов плат: n_i – количество рабочих элементов i -го типа в рабочем режиме с интенсивностью отказов одного элемента λ_i . Требуется иметь численный показатель надежности системы электронных плат R_o , близкий к 1 с учетом стоимости резервных элементов. Ниже изложен алгоритм определения оптимального количества резервных запасных радиокомпонентов для обеспечения уровня надежности $R_o \approx 0,95$ [89]:

1. Используем для удобства расчётов параметр Q_o – требуемое значение показателя ненадежности системы при решении прямой задачи оптимального резервирования. Допустимый уровень Q_{oi} для отдельного типа компонентов определяется как:

$$Q_{oi} = \frac{(1 - R_o)c_i}{\sum c_i} \quad (4.9)$$

где c_i – стоимость отдельного радиоэлемента i -го типа.

В результате аналитического расчёта получили значения: $Q_{o1} = 0,0038$; $Q_{o2} = 0,0192$; $Q_{o3} = 0,0192$; $Q_{o4} = 0,0077$; $Q_{o5} = 0,0077$.

2. Используя приближенное решение задачи оптимального резервирования методом множителей Лагранжа, можно определить интенсивности отказов, если они неизвестны:

$$\lambda_i = \left(\frac{1}{Q_0}\right) \sum \left(-\frac{c_i}{\lambda \ln(q_i)}\right) = \left(\frac{1}{Q_0}\right) \sum_{i=1}^n \alpha_i \quad (4.10)$$

где q_i – вероятность отказа i -го элемента системы;

α_i – коэффициент полинома.

α_i , λ и Q_0 находятся по формулам (4.11)–(4.13):

$$\alpha_i = -\frac{c_i}{\lambda \ln q_i} \quad (4.11)$$

$$\lambda = \left(\frac{1}{Q_0}\right) \sum \alpha_i \quad (4.12)$$

$$Q_0 = \sum q_i^{x_i+1} \quad (4.13)$$

3. Вычисляем значения количества резервных элементов m_i по формуле:

$$m_i = \left(\frac{1}{\ln q_i}\right) \ln \left(\frac{\lambda \alpha_i}{q_i}\right) \quad (4.14)$$

Они оказались равными $m_1 = 3$; $m_2 = 2$; $m_3 = 2$; $m_4 = 3$; $m_5 = 2$.

В нашем конкретном случае мы выделили 5 наиболее ответственных радиокомпонентов: полевой транзистор в плате передатчика 2ON06L, интегральная микросхема AD9851, интегральная микросхема AD7813, полевой транзистор BF998 и диод 1D507A. Проведем для них аналитический расчёт и представим его результаты в таблице 4.2. Далее, используя формулу И. Бернулли (4.15), рассчитаем вероятность безотказной работы системы в двух конфигурациях:

$$P_n(k) = C_n^k \cdot p^k \cdot (1-p)^{n-k} \quad (4.15)$$

где n – количество элементов;

k – количество отказавших элементов;

p – вероятность безотказной работы элемента;

C – биномиальный коэффициент.

После резервирования вероятность безотказной работы релаксометра в составе ПИК будет равна: $P = [(1-0,23)^2] \cdot [(1-0,1^2)^3] = 0,992^2 \cdot 0,99^3 = 0,954$, а без резервирования $P = [(1-0,2)^2] \cdot [(1-0,1)^3] = 0,64 \cdot 0,729 = 0,47$.

При резервировании элементов системы аппаратно-программные возможности ПЛИС *EP2C5T144C8* позволяют использовать по 2 пары ИМС *AD7813* и *AD9851* в режиме холодного резервирования с автоматическим переключением канала, если при самодиагностике оборудования по методу определения уровня электромагнитных шумов была обнаружена неисправность. Для остальных названных элементов также предлагается применение холодного резервирования, с возможностью ручного переключения отказавшего компонента соединительным элементом.

Таблица 4.2 - Расчет резервирования элементов релаксометра ПИК

№	Обозначение	Вероятность отказа q	Стоимость c	Количество элементов в рабочем режиме n	Резервирующие элементы m в наиболее нагруженных узлах
1	Диод <i>1D507A</i>	0,1	1	10	2
2	ИМС <i>AD9851</i>	0,1	5	1	2
3	ИМС <i>AD7813</i>	0,1	5	1	2
4	Транз. <i>BF998</i>	0,2	2	10	3
5	Транз. <i>2ON06L</i>	0,2	2	2	3

Как итог, при тройном параллельном резервировании транзисторов *2ON06L* и *BF998*, а также дублировании остальных названных компонентов, используя вышенаписанные уравнения, получили необходимую вероятность безотказной работы системы, близкую к единице для 1000 часов бесперебойной работы.

4.5.2. Расчет надежности и резервирование источника питания ПИК

Нормальный двухпараметрический закон Гаусса широко используется при оценке надежности изделий, на надежность которых воздействуют несколько факторов, ни один из которых не является доминирующим. Для аккумулятора в

источнике питания это - температура, загрязнение электродов и т. д. Обычно этому закону подчиняются отказы, которые описываются уравнением:

$$Q(t) = \left(\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \right) \int_0^{\infty} \exp \left(-\frac{(t - m_x)^2}{\sigma^2} \right) \quad (4.16)$$

где Q – вероятность отказа;

σ - СКО;

m_x - математическое ожидание;

t - время.

Для расчета вероятности события $P(t)$ в заданном интервале используем:

$$P(t_1 < t < t_2) = \frac{[\Phi(x_2) - \Phi(x_1)]}{2} = \frac{\left\{ \Phi \left[\frac{t_2 - m_x}{\sigma\sqrt{2}} \right] - \Phi \left[\frac{t_1 - m_x}{\sigma\sqrt{2}} \right] \right\}}{2} \quad (4.17)$$

где $\Phi(x)$ – интеграл вероятности (Лапласа).

Он в центрированном и нормированном виде будет представлен как $\Phi(z) = \Phi[(t-m_x)/\sigma\sqrt{2}]$ и табулирован в [90]. Если воспользоваться интегралом вероятности $\Phi(z)$, то вероятность безотказной работы во времени производится по формуле:

$$P(t) = 0,5 - \Phi \left[\frac{t - m_x}{\sigma} \right] \quad (4.18)$$

Аккумулятор имеет параметры $\sigma = 4$ ч, $m_x = 30$ ч. Вероятность работы аккумулятора более 30 часов, например для 35 часов с вероятностью безотказной работы $P_c = 2/10$, вычисляется с использованием уравнения (4.18) и таблицы функции Лапласа $\Phi(z)$ по формуле:

$$Pa = 0,5 - \Phi \left[\frac{35 - 30}{4} \right] = 0,098 \quad (4.19)$$

Для обеспечения более высокой надежности мы предусмотрели постоянное («горячее») параллельное резервирование (дублирование) данного элемента с помощью сетевого источника бесперебойного питания, что описывается формулой:

$$M = \frac{[\ln(1 - P_c)]}{[\ln(1 - P_a)]} \approx 2 \quad (4.20)$$

4.6. Выводы по главе 4

1. Разработан стенд для отработки новых методов и программно-технического обеспечения автоматизации измерений, диагностики состояния узлов и средств повышения надежности ПМР-анализатора нефти.

2. Описана цифровая схемотехника релаксометра ПМР, входящего в состав программно-измерительного комплекса. Устройство обладает высоким уровнем интеграции элементов и управляется с помощью ПЛИС с соответствующим программным обеспечением.

3. Установлена зависимость поля магнита релаксометра ПИК от температуры окружающей среды и создана методика для корректировки измерений по данному параметру.

4. Определены степени погрешностей и неопределённости измерений ПИК, а также предложены меры по их снижению.

5. Описано влияние динамических нагрузок от потока на точность работы пробоотборника ПИК, а также на достоверность измерений и прогноза надежности. Представлена обновленная программа контроля пробоотборника, позволяющая перейти на более надежную плату управления и увеличить точность забора проб.

6. Предложено внедрение средств резервирования ключевых элементов программно-измерительного комплекса для повышения вероятности его безотказной работы.

7. Проведен расчет необходимого числа резервирующих радиоэлементов плат релаксометра ПМР в измерительном комплексе. Резервированием элементов плат релаксометра достигнута надежность его работы в составе ПИК $P=0,954$ (для 1000 ч). В совокупности с дублированием источника питания (аккумулятора), данные меры привели к повышению вероятности безотказной работы всего комплекса ПМРА-IV для 1000 часов эксплуатации с 59 до 92%, что продемонстрировано на рисунке 2.3

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам обзора сделан вывод о необходимости разработки новых методов и программно-технического обеспечения автоматизации измерений, диагностики узлов и средств повышения надежности ПМР-анализатора нефти.

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.

Разработанные алгоритмы и программы внедрены в научно-исследовательскую деятельность и образовательный процесс кафедры «Приборостроение и мехатроника» ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет». Способы диагностики и повышения надежности электронного оборудования внедрены на предприятии ООО «Интеграл Плюс», производящем РЭА. Внедрение основных результатов подтверждено актами, представленными в Приложении В. В Приложениях Г, Д, Е представлены свидетельства о государственной регистрации программ, полученные сертификаты участника конференций и дипломы соответственно.

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, работающих по принципу протонного магнитного резонанса.

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.

Разработанный испытательный стенд может быть использован в качестве основы при проектировании полноценной промышленной установки, предназначенной для автоматизированного контроля и обработки нефтепродуктов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rosendahl T., Hepso V. Integrated operations in the oil and gas industry: sustainability and capability development. // Imprint of IGI Global, 2013. – 458 p.
2. Тихомирнов Л.И. Цифровизация: ключевые факторы успеха. // Нефтегаз. - 2019. - В.1-2. - С.142-143.
3. Макеев А. А. Оптимизация работы центробежных насосов в малодебитных скважинах доюрского комплекса // Нефтяное хозяйство. - 2023. - №4. - С.98-100.
4. Сафиева Р. З. Физико-химия нефти; М.: Химия. – Москва, 1998. – 448 с.
5. Zavoisky E.K. Paramagnetic relaxation of liquid solutions for perpendicular fields // Journal of Physics USSR. -1945.-V.9.-№3.-P.211-215.
6. Bloch F., Hansen W.W., Packard M. Nuclear induction // Physical Review. - 1946. - V.69. - P.680.
7. Purcell E.M., Torrey H.C., Pound R.V. Resonance adsorption of nuclear moments in solids // Physical Review. -1946. - V.69. - P.37.
8. Hahn E.L. Detection of sea-water motion by nuclear precession // J. Geoph. Res. - 1960. - V. 65. - P. 776–777.
9. Suryan G. Nuclear resonance in flowing liquids // Proc. Indian Acad. Sci. 33, 107 - 1951. <https://doi.org/10.1007/BF03172192>
10. Жерновой А.И. Ядерно-магнитные расходомеры; Л.:«Машиностроение» - 1985. -128 с.
11. Khasanova N., Sakharov B., Volkov V., Nurgaliev D. Low field method for analysis of heavy oils without extraction // 17-th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2017, - 2017. - Viena, Austria. – p.297-304.
12. Чижик В.И. Квантовая радиофизика: учебное пособие; Санкт-Петербург: 2004. - 689 с.
13. Вашман А.А., Пронин И.С. Ядерная магнитная релаксация и ее применение в химической физике; М.: Наука,1979. –236с.
14. Способ определения содержания парафинов и асфальтенов в нефти: пат. 2333476 С1 Рос. Федерация: МПК G 01 N 24/08 / Николин И.В., Сафонов С.С.,

Скирда В.Д., Шкаликов Н.В.; заявитель и патентообладатель Шлюмберже Текнолоджи Б.В. - 2006146961/28; заявл. 28.12.2006; опубл 10.09.2008.

15. Carr H.Y., Purcell E. M., Effects of Diffusion on Free Precession in Nuclear Magnetic Resonance Experiments // Phys. Rev. – 1958. – № 94. – P. 630.

16. Meiboom, S., Gill D. Modified Spin-Echo Method for Measuring Nuclear Relaxation Times // Rev. Sci. Instr. – 1958. – №29. P. 688.

17. Hogendoorn J., Boer A., Appel M., deJong H., deLeeuw R., Magnetic Resonance Technology. A New Concept for Multiphase Flow Measurement // 31-th International North Sea Flow Measurement Workshop. - 2013.

18. Kashaev R.S., Temnikov A.N., Idiatullin Z.Sh., Charitonov M.V., Farachov T.I. NMR-Analyser for Automatic Control of Physical-Chemical Parameters of Crude Oil and Bitumen // Extended Abstracts “Magnetic Resonance & Related Phenomena, XXVIII Ampere Congress, Canterbury, UK.- 1996. -PP. 295-296.

19. Устройство для измерения состава и расхода многокомпонентных жидкостей методом ЯМР: пат. 2544360 С1 Рос. Федерация: МПК G 01 N 24/08 / Кашаев Р.С., Темников А.Н., Идиятуллин З.Ш.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет». - 2013154003/28; заявл. 04.12.2013; опубл 20.03.2015.

20. Кашаев Р.С., Козелков О.В. Приборостроение и мехатроника в нефтяной промышленности и энергетике: монография; Saarbrucken: Palmarium academic publishing, 2017. - 110 с.;

21. Kashaev R., Nguyen Duk Ahn, Kozelkova V., Kozelkov O., Dudkin V. Online Multiphase Flow Measurement of Crude Oil Properties Using Nuclear (Proton) Magnetic Resonance Automated Measurement Complex for Energy Safety at Smart Oil Deposits. // Energies - 2023.-№16(3). - P.1080.

22. Кашаев Р.С., Михайлов А.Г., Козелкова В.О., Овсеенко Г.А., Чан Ван Тунг, Нгуен Тьи Киен. Технологии экспресс-контроля и очистки нефти от примесей в мехатронной установке с управлением от комплекса на базе ПМР-релаксометрии. // Химическая технология. - 2022. - № 3. С. 261-266.

23. Kashaev R.S., Kozelkov O.V. On-line express-analyzer and method of water monitoring on the base of proton magnetic resonance // International Scientific and Practical Conference: Water Power Energy Forum. -2019. -V. 288. - №1.

24. Кашаев Р.С., Козелкова В.О., Овсенко Г.А., Карачин В.И., Козелков О.В. Многопараметрический проточный измерительный комплекс для экспресс-контроля качества нефти методом протонной магнитной резонансной релаксометрии // Измерительная техника. - 2023. - № 5. С52-60

25. Нгуен Тьи 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. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-1-108-116

26. Кашаев Р.С., Козелков О.В. Приборно-мехатронный комплекс отбора пробы из потока нефти // Фундаментальные Исследования. - 2017. - № 8–1. - С. 38–43.

27. Многофункциональная автоматическая цифровая интеллектуальная скважина: пат. 2689103 С1 Рос. Федерация: МПК Е 21 В 47/00 / Кашаев Р.С., Козелков О.В., Сафиуллин Б. Р.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет». - 2018116940; заявл. 07.05.2018; опубл 23.05.2019.

28. Система оптимизации работы группы нефтегазовых скважин: пат. 2681738 С1 Рос. Федерация: МПК Е 21 В 47/10 / Кашаев Р.С., Козелков О.В.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет». - 2017146953; заявл. 28.12.2017; опубл 12.03.2019.

29. Устройство для обезвоживания водонефтяных эмульсий: пат. 198224 U1 Рос. Федерация: МПК С 10 G 33/02 / Кашаев Р.С., Киен Н.Т., Тунг Ч.В., Козелков О.В.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет». - 2019137175; заявл. 19.11.2019; опубл 25.06.2020.

30. Козелков О. В., Кашаев Р. С. Приборные и мехатронные комплексы в нефтяной промышленности и энергетике: монография; Махачкала: Апробация, 2019. - 112 с.

31. Овсеенко Г.А., Кашаев Р.С., Козелков О.В. Использование искусственных нейронных сетей для контроля достоверности измерения свойств нефтяных дисперсных систем релаксометром ПМР // Journal of Advanced Research in Technical Science. – 2022. - I. 31. - P. 39–41.

32. Ovseenko G., Kozelkov O., Kashaev R., Trang Van Tung. Apparatus for on-line structure-dynamic analysis of oils by nuclear magnetic resonance relaxometry method // в сборнике: Scientific research of the sco countries: synergy and integration. - Beijing, PRC, 2021.

33. Овсеенко Г.А., Кашаев Р.С., Филимонова Т.К. Применение нейронных сетей при контроле достоверности измерений физико-химических характеристик релаксометром ПМР // Journal of Advanced Research in Technical Science. - 2022. - № 32.

34. Кашаев Р.С., Овсеенко Г.А., Козелков О.В. Мехатронный комплекс на основе метода ПМР и контроль достоверности его измерений. // материалы в сборнике конф.: Технические и технологические системы: материалы тринадцатой Международной научной конференции: «Технические и технологические системы» (ТТС-22). - Краснодар: Изд-во издательский Дом – Юг, 2022. – 478 с.

35. Овсеенко Г.А., Кашаев Р.С., Козелков О.В. Интеллектуальная система управления мехатронного комплекса при добыче и подготовки нефти // Национальная научно-практическая конференция: «Цифровые системы и модели: теория и практика проектирования, разработки и применения». - 2024.

36. Yu. K. Evdokimov, E. Denisov, Fluctuation-noise diagnostics of optical system power supply units based on fuel cell. // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. March 2013 - Vol. 8787 – P. 87870E-1 – 87870E-11

37. Якимов А.В. Физика шумов и флуктуаций параметров: электронное учебное пособие.; Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2013. – 85 с.

38. Козелкова В.О., Кашаев Р.С., Арсланов А.Д. Установка и алгоритм управления удаления воды из нефти под управлением анализатора ядерного магнитного резонанса (ЯМР) // Исследовательская инициатива - 2023: Сборник статей Международного научно-исследовательского конкурса, Петрозаводск, 25 октября 2023 года. – Петрозаводск: Международный центр научного партнерства «Новая Наука» (ИП Ивановская И.И.), 2023. – С. 304-310.

39. Арсланов А. Д., Овсеенко Г.А., Кашаев Р.С. Влияние шумов на измерения параметров протонной магнитной релаксации // Высшая школа: научные исследования: материалы Межвузовского международного конгресса, Москва, 13 октября 2023 года. – Москва: Инфинити, 2023. – С. 144-148.

40. 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. – №1 2025. – С. 51–53 (категория K2).

41. Crainic, R., Dragan, L., Fechete, Radu. ^1H NMR Relaxometry and ATR-FT-IR Spectroscopy Used for the Assesment of Wastewater Treatment in Slaughterhouse. // Fechete Studia Universitatis Babes-Bolyai Physica. – 2018. - V. 63. - P. 49 - 60.

42. Safieva R.Z., Mishin V.D. Systems Analysis of the Evolution of Views on Oil Systems: From Petroleum Chemistry to Petroinformatics. // Pet. Chem. -2021. - V.61. – P. 539–554.

43. Якубович Б.И. Фундаментальные электрические шумы и неразрушающий контроль электронных приборов // Надежность. - 2017. - Т. 17, - № 2. – С. 31–35.

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

45. Granwehr J. Multiplicative or t_1 Noise in NMR Spectroscopy // Appl. Magn. Reson. – 2007. – V. 32. - P.113–156

46. Коняхин И.А., Зверева Е.Н. Типовые расчеты по определению характеристик надежности оптико-электронных приборов: учебное пособие; СПб: Университет ИТМО, 2016. – 65 с.

47. ГОСТ Р МЭК 61508-4-2012 Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью. – М.: Стандартин-форм, 2012. - 38 с.

48. ГОСТ 27.102–2021 Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения. – М.: Стандартин-форм, 2021. - 40 с.

49. Гречин Д.Н. Подход к оценке надежности интегральных схем на основе изучения физики отказов. // Технические средства управления и вопросы их надежности. — М.: Наука, 1974, 172-177 с.

50. Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учебник для вузов - 12-е изд.; Москва: Изд-во Юрайт, 2024.- 479 с.

51. Лыкин А. В. Математическое моделирование электрических систем и их элементов — 2-е изд., перераб. и доп.; Новосибирск: Изд-во Новосибирский государственный технический университет, 2009. — 188 с.

52. Арсланов А.Д., Козелков О.В., Кашаев Р.С. Программа управления и диагностики для ПМР-анализатора нефти // Цифровые системы и модели: теория и практика проектирования, разработки и применения: Материалы национальной (с международным участием) научно-практической конференции, Казань, 10–11 апреля 2024 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2024. – С. 21-24.

53. Арсланов А.Д., Нгуен Д.А., Галиев А.Б. Система управления проточного ПМР-анализатора для экспресс-контроля характеристик нефти по параметрам протонного магнитного резонанса // Тинчуринские чтения - 2024 «Энергетика и цифровая трансформация»: Материалы Международной молодежной научной конференции, Казань, 24–26 апреля 2024 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2024. – С. 163-167.

54. Кашаев Р.С., Нгуен Д.А., Арсланов А.Д. Исследование причин и методы устранения искажений сигнала в передатчике ПМР релаксометра // Цифровые системы и модели: теория и практика проектирования, разработки и применения : Материалы национальной (с международным участием) научно-практической

конференции, Казань, 10–11 апреля 2024 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2024. – С. 225-228.

55. 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., Нгуен Д.А., Галиев А.Б.; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет».

56. Тунг Чан Ван. Контроль воды, газа и плотности нефти в скважинной жидкости по данным протонной магнитной резонансной релаксометрии: дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук: 05.11.13 / Тунг Чан Ван. - М., 2020. – 103 с;

57. MIL-HDBK-217F, Notice. MILITARY HANDBOOK. RELIABILITY PREDICTION OF ELECTRONIC EQUIPMENT. 2 December 1991.

58. White M., Bernstein J. B. Microelectronics Reliability: Physics-of-Failure Based Modeling and Lifetime Evaluation // California: Jet Propulsion Laboratory, 2008.

59. Wafer fabrication data // ANALOG DEVICES URL:
www.analog.com/en/support/quality-and-reliability/reliability/wafer-fabrication-data.html (дата обращения: 12.08.2024).

60. Patrick D. T. O'Connor, Andre Kleyner. Practical Reliability Engineering; John Wiley & Sons, Ltd 2012, - P512.

61. AD7813 // Чип и Дип URL:
<https://static.chipdip.ru/lib/711/DOC011711941.pdf> (дата обращения: 12.08.2024).

62. AD9851 // Чип и Дип URL:
<https://static.chipdip.ru/lib/261/DOC000261220.pdf> (дата обращения: 12.08.2024).

63. Shumskayete M., Mezin A., Chernova E., Burukhina A., Golikov N., Melkozerova S. Estimating water content in water-oil mixtures and porous media they saturate: joint interpretation of NMR Relaxometry and dielectric spectroscopy // Geosciences. – 2022. - №12(4). - P.179.

64. Provencher S.W., CONTIN User's Manual, EMBL Technical Report DA05, European Molecular Biology Laboratory 30. (1982).

65. Song Y. Resolution and uncertainty of Laplace inversion spectrum // Magnetic resonance Imaging. - 2007. - V.25. - I.4. - P.445-448.

66. Tikhonov A.N., Goncharsky A.V., Stepanov V.V., Yagola A.G. Numerical methods for solving Ill-Posed Problems Nedra; M.: Nedra: Russia, 1992. - p.232.

67. 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.

68. 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, Smart Industry Con 2024. – 2024. - P.P. 214–218

69. 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.; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет».

70. Кашаев Р.С., Киен Н.Т., Тунг Ч.В., Козелков О.В. Экспресс-методы протонной магнитной резонансной релаксометрии определения вязкости и концентрации асфальтенов в нефтях // Журнал прикладной спектроскопии. – 2019. – Т. 86. - № 5. – С. 807–812.

71. 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. – М., 2021. – 299 с;

72. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №22019666343 Российская Федерация. Программный комплекс управления, приёма, обработки и хранения информации ЯМР-Анализатора: №2019663063, заявл. 09.10.2019, опубл. 09.12.2019. / Агафонов О.С., Зверев Л.В., Прудников С.М.

73. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022669531 Российская Федерация. Программа обработки данных ЯМР - анализатора при определении содержания парафина, асфальтенов и смол в нефти методом ЯМР: заявл. 14.10.2022, опубл. 21.10.2022. / Ляпин А.Ю., Габова С.В., Жмако Ф.С. и др.

74. Хабибуллина Л.Р., Тутубалина В.П. Влияние сернистых соединений на термостабильность трансформаторного масла. Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности // Материалы Четвертой Российской научно-технической конференции. - 2003. - С.205-210.

75. Кашаев Р.С., Малацион С.Ф., Самигуллин Ф.М., Матухин В.Л. Исследование СД-параметров и дисперсных характеристик водо-мазутной эмульсии методами ЯМР и вискозиметрии // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2004. - №.1-2. - С.32-36.

76. Нестеров, А.Н. Фазовые равновесия и обратимые переходы в нефтяных остатках: автореф. дис. канд. хим. наук: 05.17.07 / А. Н. Нестров. - М., 1987.–180 с.

77. ГОСТ 34396–2018 Системы измерений количества и показателей качества нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия. Издания. Международный стандартный книжный номер. Использование и издательское оформление. – М.: Стандартинформ, 2018. -32 с.

78. Арсланов А.Д., Козелков О.В., Кашаев Р.С. Разработка системы управления и контроля проточного ПМР-анализатора // Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве: материалы IX Национальной научно-практической конференции, посвященной 55-летию КГЭУ, Казань, 07–08 декабря 2023 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2024. – С. 9-11.

79. Нгуен Д.А., Арсланов А.Д., Галиев А.Б. Разработка усовершенствованного управляемого напряжением усилителя для приемника релаксометра ПМР-анализатора // Тинчуринские чтения - 2024 «Энергетика и цифровая трансформация»: Материалы Международной молодежной научной конференции, Казань, 24–26 апреля 2024 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2024. – С. 205-208.

80. 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. doi:10.30724/1998-9903-2025-27-1-3-15 (категория K2).

81. ГОСТ Р 15.301–2016 Система разработки и постановки продукции на производство. Продукция производственно-технического назначения. Порядок разработки и постановки продукции на производство. Издания. Международный стандартный книжный номер. Использование и издательское оформление. – М.: Стандартинформ, 2016. - 15 с.

82. Устройство для измерения состава и расхода многокомпонентных жидкостей методом ядерного магнитного резонанса: пат. 2544360 С1 Рос. Федерация: МПК G 01 N 24/08 / Р. С. Кашаев, А. Н. Темников, З. Ш. Идиятуллин; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет». - 2013154003/28; заявл. 04.12.2013; опубл 20.03.2015.

83. DS18B20 // Чип и Дип URL:
<https://static.chipdip.ru/lib/953/DOC011953598.pdf> (дата обращения: 12.08.2024).

84. Устройство для измерения температур твердой поверхности: пат. 136161 U1 Рос. Федерация: МПК G 01 K 7/00 / Кашаев Р.С., Масиаб А.Г.Н.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет». - 2013138239/28; заявл. 15.08.2013; опубл 27.13.2013.

85. Mitchell J., Gladden L. F., Chandrasekera T. C., Fordham E. J. Low-field permanent magnets for industrial process and quality control [Электронный ресурс] //

Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy 76. – 2014. P.1–60. – Режим доступа: www.elsevier.com/locate/pnmrs.

86. D7813YRZ // Чип и Дип URL: static.chipdip.ru/lib/711/DOC011711941.pdf (дата обращения: 12.08.2024).

87. Магнит: пат. 2808801 С1 Рос. Федерация: МПК Н 01 F 7/00 / Кашаев Р.С., Нгуен Д.А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет». - 2023105051; заявл. 06.03.2023; опубл 05.12.2023.

88. Устройство для термостатирования магнита с образцом.: пат. 136143 U1 Рос. Федерация: МПК F 28 D 1/00 / Кашаев Р.С., Масиаб А.Г.Н; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет». - 2013143081/28; заявл. 23.09.2013; опубл 27.12.2013.

89. Ушаков И. А. Методы решения простейших задач оптимального резервирования при наличии ограничений; Рипол Классик. — 2013. — 176 с.

90. Котеленец Н.Ф., Кузнецов Н.Л. Испытания и надежность электрических машин. - М.: Высшая школа, 1988. -232 с.

Приложение А

Программы управления электронными блоками релаксометра.

//Программа управления синтезатором частоты:

```

DimW(4) AsDouble
Dim ByteValue As Double
Sub UpDate()
Out &H37A, 11
Out &H37A, 3
Out &H37A, 11
Out &H37A, 10
Out &H37A, 2
Out &H37A, 10
Out &H37A, 11
Out &H37A, 3
Out &H37A, 11
Out &H37A, 3
Out &H37A, 11
Out &H37A, 9
Out &H37A, 1
Out &H37A, 3
Out &H37A, 11
Out &H37A, 3
Out &H37A, 11
For i = 4 To 1 Step -1
    Out &H378, W(i)
    Out &H37A, 3
    Out &H37A, 11
    Out &H37A, 9
    Out &H37A, 1
    Out &H37A, 3
    Out &H37A, 11
    Out &H37A, 3
    Out &H37A, 11
Next i
Out &H37A, 10
Out &H37A, 2
Out &H37A, 10
Out &H37A, 11
Out &H37A, 3
Out &H37A, 11
End Sub
Private Sub Form_Load()
Hscroll11.Value = Hscroll11.Min
Hscroll12.Value = Hscroll12.Min
Call UpData
End Sub
Private Sub Hscroll11_Change()

```

```

Call UpData
End Sub
Private Sub Hscroll12_Change()
Call UpData
End Sub
Sub UpData()
W(0) = Hscroll12.Value * 8
W(1) = 0
W(2) = 0
W(3) = Hscroll11.Value And 255
W(4) = (Hscroll11.Value And 65280) / 256
Text1.Text = Format(60000 * (W(3) * 65536 + W(4) * 16777216) /
4294967296#, "###,##0.000")
Text2.Text = Hscroll12.Value * 11.25
Call UpDate
EndSub

//Подпрограмма управления формирователем импульсов:
PrivateSubHscroll14_Change()
Pulse1 = Hscroll14.Value
Out &H378, 2
Out &H37A, 9
Out &H37A, 1
Out &H37C, Pulse1
Text4.Text = (Hscroll14.Value + 1) * 0.5
Out &H378, 64
Out &H37A, 9
Out &H37A, 1
CallDataTrain
EndSub

```

Приложение Б

Программа управления ПМРА-IV и автоматического расчёта характеристик нефти по ПМР-параметрам.

Файл MainWindow.xaml.cs (основные участки программы):

```
//Инициализация программы:
public MainWindow()
{
    InitializeComponent();
    Innit_pmr_analyzer();
    Innit_Chart();
    Innit_Pulse_Time();
    Address_Innit();
    Send_Comport.Tick += Send_Comport_Tick;
    Send_Comport.Interval = new TimeSpan(0, 0, 0, 0, 100);    // мсек
    Send_Comport.Stop();
    error_fix = 1;
    innit_done = 1;
    innit_Data();
}
public void innit_Data()
{ for (int h = 0; h < 10000; h++)
    {
        ADC_AVG[h] = 0.0;
        ADC_AVG2[h + 10] = 0.0;
        ADC_Ln[h] = 0.0;
        ADC_Ln2[h] = 0.0;
        ADC_Ln3[h] = 0.0;
        ADC_Ln4[h] = 0.0;
        ADC_Ln5[h] = 0.0;
    }
}
private void Address_Innit()
{
    try
    { //Работа с сохранениями
        Config_Dir = System.AppDomain.CurrentDomain.BaseDirectory;
        Setup_Dir = string.Concat(Config_Dir, "/App_Setup");
        if (!System.IO.Directory.Exists(Setup_Dir))
            System.IO.Directory.CreateDirectory(Setup_Dir);
        Data_Dir = string.Concat(Config_Dir, "/App_Data");
        if (!System.IO.Directory.Exists(Data_Dir))
            System.IO.Directory.CreateDirectory(Data_Dir);
        Source_DIR = Data_Dir;
    }
    catch (Exception ex) {}
}
```

```

public void SCI_Chart_Innit()
{
    var lineData = new XyDataSeries<double, double>();
    var lineData2 = new XyDataSeries<double, double>();
    var lineData3 = new XyDataSeries<double, double>();
    var lineData4 = new XyDataSeries<double, double>();
    for (int i = 0; i < 10000; i++)
    {
        Sensor_Frame0[i] = -3.0;
        lineData.Append(i, Sensor_Frame0[i]);
        lineData2.Append(i, Sensor_Frame0[i]);
        lineData3.Append(i, Sensor_Frame0[i]);
        lineData4.Append(i, Sensor_Frame0[i]);
    }

    Sensor_Data.DataSeries = lineData;
    Sensor_AVG.DataSeries = lineData;
    Sensor_Data2.DataSeries = lineData2;
    Sensor_Data3.DataSeries = lineData3;
    Sensor_Data4.DataSeries = lineData4;
    Sensor_Data5.DataSeries = lineData4;
    Sensor_Data6.DataSeries = lineData4;
    Sensor_Data7.DataSeries = lineData4;

    Sensor_Scope.ZoomExtents();
    Sensor_Scope2.ZoomExtents();

    X_Scope.VisibleRange = new DoubleRange(0.0, 10.0);
    Y_Scope.VisibleRange = new DoubleRange(0.0, 400.0);
    X_Scope2.VisibleRange = new DoubleRange(0.0, 10.0);
    Y_Scope2.VisibleRange = new DoubleRange(0.0, 6.0);
}

public void Innit_pmr_analyzer()
{
    cb_Update.Items.Add("0.5 S");
    cb_Update.Items.Add("1.0 S");
    cb_Update.Items.Add("1.5 S");
    cb_Update.Items.Add("2.0 S");
    cb_Update.Items.Add("2.5 S");
    cb_Update.Items.Add("3.0 S");
    cb_Update.SelectedIndex = 5;

    Slider_CHb.Minimum = 1;
    Slider_CHb.Maximum = 255;
    Slider_CHb.Value = 52;

    Slider_T90.Minimum = 10;
    Slider_T90.Maximum = 150;
    Slider_T90.Value = 50;

    Slider_T180.Minimum = 10;

```

```

Slider_T180.Maximum = 200;
Slider_T180.Value = 100;

Slider_T.Minimum = 1;
Slider_T.Maximum = 100;
Slider_T.Value = 10;
Slider_MC_Time.Minimum = 0;
Slider_MC_Time.Maximum = 5010;
Slider_MC_Time.Value = 0;
Slider_MC2_time2.Minimum = 5;
Slider_MC2_time2.Maximum = 300;
Slider_MC2_time2.Value = 5;

MC_Time_Value = 50;
Slider_MC_Pulse.Minimum = 1;
Slider_MC_Pulse.Maximum = 10000;
Slider_MC_Pulse.Value = 10;
Slider_ADC.Minimum = 1;
Slider_ADC.Maximum = 255;
Slider_ADC.Value = 1;
Savings_ADC = 1;

Send_Data[0] = 0x42;
Send_Data[1] = 0x09; // W0
Send_Data[2] = 0x0e; // W1
Send_Data[3] = 0x38; // W2
Send_Data[4] = 0xe3; // W3
Send_Data[5] = 0x8e; // W4
Send_Data[6] = (byte)128; // CHB
Send_Data[7] = (byte)128; // CHC
Send_Data[8] = (byte)128; // CHD
Send_Data[9] = (byte)100; // T90
Send_Data[10] = (byte)150; // T180
Send_Data[11] = 0x0a; // Toff
Send_Data[12] = (byte)(500 / 256);
Send_Data[13] = (byte)(500 % 256);
Send_Data[14] = (byte)(4166 / 256);
Send_Data[15] = (byte)(4166 % 256);
}

public void Innit_Pulse_Time()
{
    Impulse90[0] = 8;
    Impulse90[1] = 8;
    Impulse90[2] = 8;
    ...
    Impulse180[148] = 225;
    Impulse180[149] = 226;
    Impulse180[150] = 227;
}

```

```

private void Innit_Chart()
{
    SCI_Chart_Innit();
}

//Обработчики измерений:
public void Handle_Oscan1()
{
    var lineData = new XyDataSeries<double, double>();
    // Radar_Data
    for (int l = 0; l < ADC_Y_Counter; l++)
    {
        lineData.Append(l, Sensor_Frame[l]);
    }
    Sensor_Data.DataSeries = lineData;
    if (ADC_Block > 0)
    {
        Percent_done = Receiver_Pulse_count * 100.0 / max_Pulse_count;
        if (Percent_done > 100.0)
            Percent_done = 100.0;
        Process_Done.Dispatcher.Invoke(() => Process_Done.Value =
            Percent_done);
        cmd_percent.Dispatcher.Invoke(() => cmd_percent.Content =
            string.Concat(Percent_done / 1.0));
        cmd_savings2.Dispatcher.Invoke(() => cmd_savings2.Content =
            string.Concat(Receiver_Pulse_count, "/", max_Pulse_count));
    }
}

public void Handle_Oscan2()
{
    var lineData = new XyDataSeries<double, double>();
    // Radar_Data
    for (int l = 0; l < ADC_Y_Counter; l++)
    {
        lineData.Append(l, Sensor_Frame[l]);
    }
    Sensor_Data.DataSeries = lineData;
    if (ADC_Block > 0)
    {
        Percent_done = Receiver_Pulse_count * 100.0 / max_Pulse_count;
        if (Percent_done > 100.0) Percent_done = 100.0;
        Process_Done.Dispatcher.Invoke(() => Process_Done.Value =
            Percent_done);
        cmd_percent.Dispatcher.Invoke(() => cmd_percent.Content =
            string.Concat(Percent_done / 1.0));
        cmd_savings2.Dispatcher.Invoke(() => cmd_savings2.Content =
            string.Concat(Receiver_Pulse_count, "/", max_Pulse_count));
    }
}

```

```

public void Handle_Oscan3()
{
    var lineData = new XyDataSeries<double, double>();
    // Radar_Data
    for (int l = 0; l < ADC_Y_Counter; l++)
    {
        lineData.Append(l, Sensor_Frame[l]);
    }

    Sensor_Data.DataSeries = lineData;
    if (ADC_Block > 0)
    {
        Percent_done = Receiver_Pulse_count * 100.0 / max_Pulse_count;
        if (Percent_done > 100.0) Percent_done = 100.0;
        Process_Done.Dispatcher.Invoke(() => Process_Done.Value =
        Percent_done);
        cmd_percent.Dispatcher.Invoke(() => cmd_percent.Content =
        string.Concat(Percent_done / 1.0));
        cmd_savings2.Dispatcher.Invoke(() => cmd_savings2.Content =
        string.Concat(Receiver_Pulse_count, "/", max_Pulse_count));
    }
}

public void Handle_Oscan4()
{
    var lineData = new XyDataSeries<double, double>();

    // Radar_Data
    for (int l = 0; l < ADC_Y_Counter; l++)
    { lineData.Append(l, Sensor_Frame[l]); }

    Sensor_Data.DataSeries = lineData;

    if (ADC_Block > 0)
    {
        Percent_done = Receiver_Pulse_count * 100.0 / max_Pulse_count;
        if (Percent_done > 100.0) Percent_done = 100.0;
        Process_Done.Dispatcher.Invoke(() => Process_Done.Value =
        Percent_done);
        cmd_percent.Dispatcher.Invoke(() => cmd_percent.Content =
        string.Concat(Percent_done / 1.0));
        cmd_savings2.Dispatcher.Invoke(() => cmd_savings2.Content =
        string.Concat(Receiver_Pulse_count, "/", max_Pulse_count));
    }

    //Работа с COMport:
    private void Send_Comport_Tick(object sender, EventArgs e)
    {
        if ((Connect_ok == 1) && (Send_start == {
        Check_Fix_Pulse = (T180_Value / 10.0 + Toff_Value * 100.0);
        Press_Pulse = (int)(20000.0 / Check_Fix_Pulse);
        Fix_Pulse = MC_Pulse_Value / Press_Pulse + 1;

        Check_OverLoad = T90_Value / 10.0 + // Step = 0.1 us

```

```

Toff_Value * 50.0 +      // step = 100us
MC_Pulse_Value * (Tl80_Value / 10.0 + Toff_Value * 100.0);

Max_OverLoad = Check_OverLoad * 5.0;

if (Max_OverLoad <= 500000.0)
{
    Max_Time_Config = 50 + Max_Time_Config2 * 10;
}

else if (Max_OverLoad > 500000.0)
{
    Check_OverLoad2 = T90_Value / 10.0 +      // Step = 0.1 us
    Toff_Value * 50.0 +      // step = 100us
    (Fix_Pulse*Press_Pulse) * (Tl80_Value / 10.0 + Toff_Value*100.0);

    Max_Time_Config = Convert.ToInt32(Check_OverLoad2 / 2000.0) +
    Max_Time_Config2 * 10;
}

cmd_MC_Time4.Content = string.Format("{0:0.0#}", Fix_Pulse);
cmd_MC_Time3.Content = string.Format("{0:0.0#}", Press_Pulse);
cmd_MC_Time.Content = string.Format("{0:0.0#}S", Max_Time_Config /
100.0);

Max_Pulse_Config = MC_Pulse_Value;

Delta_Phase = (UInt32)((Freq * 2 * 4294967296) / SysClock);
PC_Test.Text = string.Format("#{0:X}", Delta_Phase); //
string.Concat(Tl80_Value);

if (Send_ENA < Max_Send_Time) { Send_ENA++; Send_start = 0; }
else { Send_start = 1; Send_ENA = 0; }

{
    Send_start = 0;
    Send_Data[0] = 0x42;
    Send_Data[1] = 0x09; // W0
    Send_Data[2] = (byte)((Delta_Phase & 0xff000000) >> 24); // W1
    Send_Data[3] = (byte)((Delta_Phase & 0x00ff0000) >> 16); // W2
    Send_Data[4] = (byte)((Delta_Phase & 0x0000ff00) >> 8); // W3
    Send_Data[5] = (byte)((Delta_Phase & 0x000000ff)); // W4
    Send_Data[6] = (byte)CHB_Value; // CHB
    Send_Data[7] = (byte)(T90_Value); // ((T90_Val*255)/100); CHC
    Send_Data[8] = (byte)(Tl80_Value); // ((Tl80_Va*255)/ 150); CHD
    Send_Data[9] = (byte)(T90_Value); // T90
    Send_Data[10] = (byte)(Tl80_Value); // Tl80
    Send_Data[11] = (byte)Toff_Value; // Toff
    Send_Data[12] = (byte)(Max_Pulse_Config / 256);
    Send_Data[13] = (byte)(Max_Pulse_Config % 256);
    Send_Data[14] = (byte)(Max_Time_Config / 256);
    Send_Data[15] = (byte)(Max_Time_Config % 256);
}

```



```

        Send_Data[16] = (byte) (MC_Time_Value2 / 256);
        Send_Data[17] = (byte) (MC_Time_Value2 % 256);
        Send_Data[18] = (byte) (ADC_Block);

    if (mySerialPort.IsOpen == true) mySerialPort.Write(Send_Data,0,19);

        ADC_Time_MAX = Savings_ADC;
        ADC_Sample_Value = Max_Pulse_Config;
    }
}

private void bt_find_Click(object sender, RoutedEventArgs e)
{
    PC_Comport.Items.Clear();
    Com_counter = 0;
    foreach (string s in SerialPort.GetPortNames())
    {
        PC_Comport.Items.Add(s);
        Com_counter++;
    }

    if (Com_counter >= 1)
    {
        PC_Comport.SelectedIndex = 0;
        PC_Comport.IsEnabled = true;
        PC_Ket_noi.IsEnabled = true;
    }
}

private void PC_Ket_noi_Checked(object sender, RoutedEventArgs e)
{
    PC_Comport.IsEnabled = false;
    bt_find.IsEnabled = false;
    try
    {
        mySerialPort = new SerialPort(PC_Comport.Text){
            BaudRate = 115200,
            Parity = Parity.None,
            StopBits = StopBits.One,
            DataBits = 8,
            Handshake = Handshake.None,
            RtsEnable = true
        };

        mySerialPort.Open();
        t5 = new Thread(new ThreadStart(Read_COM));
        t5.Start();
        Connect_ok = 1;
        Send_Comport.Start();

        Receiver_ENA = 1;
        ADC_Counter = 0;
    }
}

```

```

catch
{
    Receiver_ENA = 0;
    Connect_ok = 0;

    Send_Comport.Stop();
}
}
public void Read_COM()
{
    PC_ADC.Dispatcher.Invoke(() => PC_ADC.Text = "0");
    while (true)
    {
        if (Receiver_ENA == 1)
        {
            try
            {
                Receiver_data = (byte)mySerialPort.ReadByte();
                ADC_buffer4[2] = ADC_buffer4[1];
                ADC_buffer4[1] = ADC_buffer4[0];
                ADC_buffer4[0] = Receiver_data;
                if ((ADC_buffer4[2] == 'A') && (ADC_buffer4[1] == 'D') &&
                    (ADC_buffer4[0] == 'C'))
                {

                    if (Start_Save == 1)
                    {
                        Start_Save = 2;
                        ADC_Read_State = 1;
                        ADC_Time_Value = 0;
                        Receiver_Pulse_count = 0;
                        ADC_Block = 2;
                        Percent_done = 0.0;
                        cmd_savings.Dispatcher.Invoke(() => cmd_savings.Content =
                            string.Concat(ADC_Time_Value + 1));}

                    else if (ADC_Block == 0)
                    {
                        if(Online_Scope==1) ADC_Read_State=1; else ADC_Read_State = 0;
                    }
                    else if (ADC_Block == 2)
                    {
                        ADC_Read_State = 1;
                    }
                    ADC_Y_Counter = 0;
                }
            }
            else if (ADC_Read_State == 1)
            {
                if (Receiver_data >= 255) Receiver_data = 255;
                if (ADC_Y_Counter == 1) PC_ADC.Dispatcher.Invoke(() =>
                    PC_ADC.Text = string.Concat(Receiver_data));
                Sensor_Frame[ADC_Y_Counter] = Receiver_data;
            }
        }
    }
}

```

```

if (ADC_Y_Counter % 32 == 0)
{
    t1 = new Thread(new ThreadStart(Handle_Oscan1));
    t1.Start();
    cmd_adc.Dispatcher.Invoke(() => cmd_adc.Content =
    ADC_Y_Counter.ToString());
}
else if (ADC_Y_Counter % 32 == 8)
{
    t2 = new Thread(new ThreadStart(Handle_Oscan2));
    t2.Start();
    cmd_adc.Dispatcher.Invoke(() => cmd_adc.Content =
    ADC_Y_Counter.ToString());
}
else if (ADC_Y_Counter % 32 == 16)
{
    t3 = new Thread(new ThreadStart(Handle_Oscan3));
    t3.Start();
    cmd_adc.Dispatcher.Invoke(() => cmd_adc.Content =
    ADC_Y_Counter.ToString());
}
else if (ADC_Y_Counter % 32 == 24)
{
    t4 = new Thread(new ThreadStart(Handle_Oscan4));
    t4.Start();
    cmd_adc.Dispatcher.Invoke(() => cmd_adc.Content =
    ADC_Y_Counter.ToString());
}
else if (ADC_Y_Counter == (MC_Pulse_Value - 1))
{
    t4 = new Thread(new ThreadStart(Handle_Oscan4));
    t4.Start();
    cmd_adc.Dispatcher.Invoke(() => cmd_adc.Content =
    ADC_Y_Counter.ToString());
}

if (ADC_Y_Counter < MC_Pulse_Value) // ADC_Sample_Value
{
    if (ADC_Block > 0)
    {
        Receiver_Pulse_count++;
        ADC_TichLuy[ADC_Time_Value, ADC_Y_Counter] = Receiver_data;
    }
    ADC_Y_Counter++;
}
else if (ADC_Y_Counter >= MC_Pulse_Value) // ADC_Sample_Value
{
    if (ADC_Block > 0)
    {
        ADC_Time_Value++;
        //Receiver_Pulse_count++;
        ADC_Read_State = 0;
        if (ADC_Time_Value < max_tichluy)
            cmd_savings.Dispatcher.Invoke(() => cmd_savings.Content =
            string.Concat(ADC_Time_Value + 1));
    }
}

```

```

else
cmd_savings.Dispatcher.Invoke(() => cmd_savings.Content =
string.Concat(ADC_Time_Value));
if (ADC_Time_Value >= max_tichluy)
{
ADC_Block = 0;
if (continuous_mode == 0) Online_Scope = 0;
else if (continuous_mode == 1) Online_Scope = 1;
Percent_done = Receiver_Pulse_count * 100.0 / max_Pulse_count;
if (Percent_done > 100.0) Percent_done = 100.0;
Process_Done.Dispatcher.Invoke(() => Process_Done.Value =
Percent_done);
cmd_percent.Dispatcher.Invoke(() => cmd_percent.Content =
string.Concat(Percent_done / 1.0));
cmd_savings2.Dispatcher.Invoke(() => cmd_savings2.Content =
string.Concat(Receiver_Pulse_count, "/", max_Pulse_count));
}
}
}
}
}
catch {}
}
}
}

//Управление измерениями:
private void bt_Start_Click(object sender, RoutedEventArgs e)
{
var lineDataA1 = new XyDataSeries<double, double>();
int tm = (int)(Slider_ADC.Value);
int pm = (int)(Slider_MC_Pulse.Value);

if (cb_xoa.IsChecked == true)
{
for (int counter = 0; counter < MC_Pulse_Value; counter++)
{
lineDataA1.Append(counter, 0);
}
Sensor_AVG.DataSeries = lineDataA1;
}
ADC_Block = 0;
Start_Save = 1;
max_Pulse_count = tm * pm;
max_tichluy = tm;
ADC_Time_Value = 0;
Receiver_Pulse_count = 0;
cmd_savings2.Dispatcher.Invoke(() => cmd_savings2.Content =
string.Concat(Receiver_Pulse_count, "/", max_Pulse_count));
Online_Scope = 1;
}
}

```

```

private void bt_Stop_Click(object sender, RoutedEventArgs e)
{
    ADC_Block = 0;
}

//Анализ снятой осциллограммы
private void bt_Analyse_Click(object sender, RoutedEventArgs e)
{
    var lineDataA1 = new XyDataSeries<double, double>();
    var lineDataA2 = new XyDataSeries<double, double>();
    var lineData = new XyDataSeries<double, double>();
    double buf_divn = Savings_ADC * 1.0;
    int buf_val = 0, fi;
    double Analyse_Value = 0.0;
    for (int i = 0; i < ImpulseCnt; i++)
    {
        lineData.Append(i, Sensor_Frame0[i]);
    }
    Sensor_Data2.DataSeries = lineData;
    Sensor_Data4.DataSeries = lineData;
    Sensor_Data5.DataSeries = lineData;
    Sensor_Data6.DataSeries = lineData;
    Sensor_Data7.DataSeries = lineData;
    ImpulseCnt2 = 0;
    ImpulseCnt3 = 0;
    ImpulseCnt4 = 0;
    step_bt1 = 1;
    step_bt2 = 1;
    RelaxTimeA = 0.0;
    RelaxTimeB = 0.0;
    RelaxTimeC = 0.0;
    AmplSE_A = 0.0;
    AmplSE_B = 0.0;
    AmplSE_C = 0.0;
    ProtonPopulationA = 0.0;
    ProtonPopulationB = 0.0;
    ProtonPopulationC = 0.0;

    Line1_s.X1 = (int)(MC_Pulse_Value / 3);
    Line2_s.X1 = 0.0;
    ADC_AVG2[0] = MC_Pulse_Value;
    ADC_AVG2[1] = Impulse90_180_value;
    ADC_AVG2[2] = T180_Value / 10.0;
    ADC_AVG2[3] = T90_Value / 10.0;
    ADC_AVG2[4] = Freq / 1000.0;
    ADC_AVG2[5] = Savings_ADC;
    ADC_AVG2[6] = CHB_Value;
    ADC_AVG2[7] = 0;
    ADC_AVG2[8] = 0;
    ADC_AVG2[9] = 0;

    ImpulseCnt = MC_Pulse_Value - 1;
    tb_Dialog.Text = "Анализобразца : " + ADC_AVG2[0] + "\n";
    tb_Dialog.Text += "Число 180 импульсов : " + ImpulseCnt + "\n";
    tb_Dialog.Text += "Интервал 90 -180, мкс : "+ADC_AVG2[2] + "us\n";
}

```

```

tb_Dialog.Text += "Длительность 180      : " + ADC_AVG2[3] + "us\n";
tb_Dialog.Text += "Длительность 90       : " + ADC_AVG2[4] + "us\n";
tb_Dialog.Text += "Частота, МГц        : " + ADC_AVG2[5] + " MHz\n";
tb_Dialog.Text += "Числонакоплений    : " + ADC_AVG2[6] + "\n";
tb_Dialog.Text += "Усиление           : " + ADC_AVG2[7] + "\n";

for (int counter = 0; counter < ImpulseCnt; counter++)
{
    buf_val = 0;
    for (fi = 0; fi < buf_divn; fi++)
    {
        buf_val += (int)ADC_TichLuy[fi, counter];
    }
    Analyse_Value = buf_val / (buf_divn);
    ADC_Ln[counter] = Math.Log(Analyse_Value);
    lineDataA1.Append(counter, Analyse_Value);
    lineDataA2.Append(counter, ADC_Ln[counter]);
    ADC_AVG[counter] = Analyse_Value;
    ADC_AVG2[counter + 10] = Analyse_Value;
}
Sensor_AVG.DataSeries = lineDataA1;
Sensor_Data3.DataSeries = lineDataA2;
bt_Save.IsEnabled = true;
}

//Расчёты при анализе и отрисовка результатов на графике:
public void Draw_line2()
{
    var lineDataA5 = new XyDataSeries<double, double>();

    int XX1 = Convert.ToInt16(Line1_s.X1);
    int XX3 = 0;
    double YY1 = ADC_Ln[XX1];
    int Find_AT = 0, Find_ATi = 0;
    double Ax, Bx;
    M1 = 0.0;
    B1 = 0.0;
    X1 = 0.0;
    Y1 = 0.0;
    XY1 = 0.0;
    SX1 = 0.0;
    SY1 = 0.0;
    S1X2 = 0.0;
    SXY = 0.0;
    N1 = ImpulseCnt - XX1;
    Line2_s.X1 = XX1 / 6;
    for (int cc = 0; cc < N1; cc++)
    {
        X1 = cc + XX1;
        Y1 = ADC_Ln[cc + XX1];
        SX1 = SX1 + X1;
        SY1 = SY1 + Y1;
        S1X2 = S1X2 + X1 * X1;
        SXY = SXY + X1 * Y1;
    }
}

```

```

//*****
L1_Xn = 0.0;
L1_Yn = 0.0;
Sum1_X = 0.0;
Sum1_Y = 0.0;
L1_XX = 0.0;
L1_YY = 0.0;
L1_XY = 0.0;
L1_X2 = 0.0;
L1_B = 0.0;
L1_M = 0.0;
for (int xx = 0; xx < N1; xx++)
{
    Sum1_X += xx + XX1;
    Sum1_Y += ADC_Ln[xx + XX1];
}
L1_Xn = Sum1_X / N1;
L1_Yn = Sum1_Y / N1;

for (int xx = 0; xx < N1; xx++)
{
    L1_XX = (xx + XX1) - L1_Xn;
    L1_YY = ADC_Ln[xx + XX1] - L1_Yn;
    L1_XY += L1_XX * L1_YY;
    L1_X2 += L1_XX * L1_XX;
}

M1 = L1_XY / L1_X2;
B1 = L1_Yn - M1 * L1_Xn;
//*****

tb_Dialog.Text+=string.Concat("Y = ", M1, " x X + ", B1, "\n");
tb_Dialog.Text+=string.Concat("Yn =", L1_Yn, "   Xn =", L1_Xn, "\n");
//Нахождение точек в ближайшей асимптоте
Find_AT = 0;
for (int cc1 = 0; cc1 < ImpulseCnt; cc1++)
{
    // Y = Ax + B
    ADC_Ln2[cc1] = M1 * cc1 + B1;
    lineDataA5.Append(cc1, ADC_Ln2[cc1]);

    ADC_Delta[cc1] = ADC_Ln[cc1] - ADC_Ln2[cc1];

    if ((ADC_Delta[cc1] <= 0.02) && (Find_AT == 0))
    {
        Find_AT = 1;
        At1 = ADC_AVG[cc1];
        XX1 = cc1;
    }
}
Ys1 = Math.Pow(Math.E, B1);
At1 = Math.Log(Ys1 / Math.E);

```

```

// решение уравнения: At1 = M1 x X + B1
// => X = (At1 - B1) / M1
times1 = (At1 - B1) / M1;
//times1 = (-2.0 * ts1) / Math.Log(At1 / A1);
AmplSE_A = Ys1;
RelaxTimeA = times1;
if (Double.IsNaN(AmplSE_B))
{
    ProtonPopulationA = (AmplSE_A * 100) / (AmplSE_A);
}

else if (Double.IsNaN(AmplSE_C))
{
    ProtonPopulationA = (AmplSE_A * 100) / (AmplSE_A + AmplSE_B);
    ProtonPopulationB = (AmplSE_B * 100) / (AmplSE_A + AmplSE_B);}
else
{
    ProtonPopulationA = (AmplSE_A * 100) / (AmplSE_A + AmplSE_B +
        AmplSE_C);
    ProtonPopulationB = (AmplSE_B * 100) / (AmplSE_A + AmplSE_B +
        AmplSE_C);
    ProtonPopulationC = (AmplSE_C * 100) / (AmplSE_A + AmplSE_B +
        AmplSE_C);
}

tb_se_amplitudes.Text = "Амплитуда CЭ \nAa = " +
Math.Round(AmplSE_A, 2) + "\nAb = " + Math.Round(AmplSE_B, 2) +
"\nAc = " + Math.Round(AmplSE_C, 2);

tb_relax_times.Text = "Время релаксации \nT2a = " +
Math.Round(RelaxTimeA, 2) + "ms\nT2b = " + Math.Round(RelaxTimeB, 2)
+ "ms\nT2c = " + Math.Round(RelaxTimeC, 2) + "ms";

ImpulseCnt2 = XX1;
for (int cc = 0; cc < XX1; cc++)
{
    Ax = Math.Pow(Math.E, ADC_Ln[cc]);
    Bx = Math.Pow(Math.E, ADC_Ln2[cc]);

    ADC_Ln3[cc] = Math.Log(Ax - Bx);
}
Sensor_Data2.DataSeries = lineDataA5;
step_bt1 = 2;
}

public void Draw_line3()
{
    var lineDataA6 = new XyDataSeries<double, double>();
    for (int cc = 0; cc < ImpulseCnt2; cc++)
    {
        if (ADC_Ln3[cc] >= 1.0) lineDataA6.Append(cc, ADC_Ln3[cc]);
        else
        {
            ImpulseCnt2 = cc;
            break;}
    }
    Sensor_Data4.DataSeries = lineDataA6;
    step_bt2 = 2;
}

```



```

public void Draw_line4()
{
    var lineDataA6 = new XyDataSeries<double, double>();
    int XX1 = Convert.ToInt16(Line2_s.X1);
    int XX2 = ImpulseCnt2;
    double YY1 = ADC_Ln3[XX1];
    int Find_AT = 0;
    double Ax, Bx;
    M2 = 0.0;
    B2 = 0.0;
    X2 = 0.0;
    Y2 = 0.0;
    XY2 = 0.0;
    SX2 = 0.0;
    SY2 = 0.0;
    S2X2 = 0.0;
    SXY2 = 0.0;
    N2 = XX2 - XX1 - 1; // XX2 - XX1 - 1
    for (int cc = 0; cc < N2; cc++)
    {
        X2 = cc + XX1;
        Y2 = ADC_Ln3[cc + XX1];
        SX2 = SX2 + X2;
        SY2 = SY2 + Y2;
        S2X2 = S2X2 + X2 * X2;
        SXY2 = SXY2 + X2 * Y2;
    }
    //*****
    L2_Xn = 0.0;
    L2_Yn = 0.0;
    Sum2_X = 0.0;
    Sum2_Y = 0.0;
    L2_XX = 0.0;
    L2_YY = 0.0;
    L2_XY = 0.0;
    L2_X2 = 0.0;
    L2_B = 0.0;
    L2_M = 0.0;
    for (int xx = 0; xx < N2; xx++)
    {
        Sum2_X += xx + XX1;
        Sum2_Y += ADC_Ln3[xx + XX1];
    }

    L2_Xn = Sum2_X / N2;
    L2_Yn = Sum2_Y / N2;

    for (int xx = 0; xx < N2; xx++)
    {
        L2_XX = (xx + XX1) - L2_Xn;
        L2_YY = ADC_Ln3[xx + XX1] - L2_Yn;
        L2_XY += L2_XX * L2_YY;
        L2_X2 += L2_XX * L2_XX;
    }
}

```

```

//M2 = L2_XY / L2_X2;
//B2 = L2_Yn - M2 * L2_Xn;
//*****
M2 = (N2 * SXY2 - SX2 * SY2) / (N2 * S2X2 - SX2 * SX2);
B2 = (SY2 - M2 * SX2) / (N2 * 1.0);

for (int cc = 0; cc < XX2; cc++)
{
    // Y = Ax + B
    ADC_Ln4[cc] = M2 * cc + B2;
    lineDataA6.Append(cc, ADC_Ln4[cc]);
    ADC_Delta2[cc] = ADC_Ln3[cc] - ADC_Ln4[cc];

    if ((ADC_Delta2[cc] <= 0) && (Find_AT == 0))
    {
        Find_AT = 1;
        At1 = ADC_AVG[cc];
        XX1 = cc;
    }

    if (cc < XX1)
    {
        Ax = Math.Pow(Math.E, ADC_Ln3[cc]);
        Bx = Math.Pow(Math.E, ADC_Ln4[cc]);

        ADC_Ln5[cc] = Math.Log(Ax - Bx);
    }
}
Ys2 = Math.Pow(Math.E, B2);
At2 = Math.Log(Ys2 / Math.E);
// Решение уравнения : At1 = M1 x X + B1
// => X = (At1 - B1) / M1
times2 = (At2 - B2) / M2;
//times2 = (-2.0 * ts2) / Math.Log(At2 / A2);
AmplSE_B = Ys2;
RelaxTimeB = times2;
if (Double.IsNaN(AmplSE_B))
{
    ProtonPopulationA = (AmplSE_A * 100) / (AmplSE_A);
}
else if (Double.IsNaN(AmplSE_C))
{
    ProtonPopulationA = (AmplSE_A * 100) / (AmplSE_A + AmplSE_B);
    ProtonPopulationB = (AmplSE_B * 100) / (AmplSE_A + AmplSE_B);
}
else
{
    ProtonPopulationA = (AmplSE_A * 100) / (AmplSE_A + AmplSE_B + AmplSE_C);
    ProtonPopulationB = (AmplSE_B * 100) / (AmplSE_A + AmplSE_B + AmplSE_C);
    ProtonPopulationC = (AmplSE_C * 100) / (AmplSE_A + AmplSE_B + AmplSE_C);
}

```

```

tb_se_amplitudes.Text = "АмплитудаСЭ \nAa = " + Math.Round(AmplSE_A,
2) + "\nAb = " + Math.Round(AmplSE_B, 2) + "\nAc = " +
Math.Round(AmplSE_C, 2);
tb_relax_times.Text = "Времярелаксации \nT2a = " +
Math.Round(RelaxTimeA, 2) + "ms\nT2b = " + Math.Round(RelaxTimeB, 2)
+ "ms\nT2c = " + Math.Round(RelaxTimeC, 2) + "ms";
    ImpulseCnt3 = XX1;
    Sensor_Data5.DataSeries = lineDataA6;
    step_bt1 = 3;
}

public void Draw_line5()
{
    var lineDataA7 = new XyDataSeries<double, double>();

    for (int cc = 0; cc < ImpulseCnt3; cc++)
    {
        if (ADC_Ln5[cc] >= 1.0) lineDataA7.Append(cc, ADC_Ln5[cc]);
    }
    Sensor_Data6.DataSeries = lineDataA7;
    step_bt2 = 3;
}

public void Draw_line6()
{
    var lineDataA8 = new XyDataSeries<double, double>();

    int XX1 = Convert.ToInt16(Line3_s.X1); ;
    int XX2 = ImpulseCnt3;
    double YY1 = ADC_Ln5[XX1];
    int Find_AT = 0;
    M3 = 0.0;
    B3 = 0.0;
    X3 = 0.0;
    Y3 = 0.0;
    XY3 = 0.0;
    SX3 = 0.0;
    SY3 = 0.0;
    S3X2 = 0.0;
    SXY3 = 0.0;
    N3 = XX2 - 1;
    for (int cc = 0; cc < N3; cc++)
    {
        X3 = cc;
        Y3 = ADC_Ln5[cc];
        SX3 = SX3 + X3;
        SY3 = SY3 + Y3;
        S3X2 = S3X2 + X3 * X3;
        SXY3 = SXY3 + X3 * Y3;
    }
    M3 = (N3 * SXY3 - SX3 * SY3) / (N3 * S3X2 - SX3 * SX3);
    B3 = (SY3 - M3 * SX3) / (N3 * 1.0);
}

```

```

Ys3 = Math.Pow(Math.E, B3);
At3 = Math.Log(Ys3 / Math.E);
// Решение уравнения : At1 = M1 x X + B1
// => X = (At1 - B1) / M1
times3 = (At3 - B3) / M3;

RelaxTimeC = times3;
AmplSE_C = Ys3;
if (Double.IsNaN(AmplSE_B))
{
    ProtonPopulationA = (AmplSE_A * 100) / (AmplSE_A);
}
else if (Double.IsNaN(AmplSE_C))
{
    ProtonPopulationA = (AmplSE_A * 100) / (AmplSE_A + AmplSE_B);
    ProtonPopulationB = (AmplSE_B * 100) / (AmplSE_A + AmplSE_B);
}
else
{
    ProtonPopulationA = (AmplSE_A * 100) / (AmplSE_A + AmplSE_B +
    AmplSE_C);
    ProtonPopulationB = (AmplSE_B * 100) / (AmplSE_A + AmplSE_B +
    AmplSE_C);
    ProtonPopulationC = (AmplSE_C * 100) / (AmplSE_A + AmplSE_B +
    AmplSE_C);
}

tb_se_amplitudes.Text = "АмплитудаСЭ \nAa = " +
Math.Round(AmplSE_A, 2) + "\nAb = " + Math.Round(AmplSE_B, 2) +
"\nAc = " + Math.Round(AmplSE_C, 2);
tb_relax_times.Text = "Времярелаксации \nT2a = " +
Math.Round(RelaxTimeA, 2) + "ms\nT2b = " + Math.Round(RelaxTimeB, 2)
+ "ms\nT2c = " + Math.Round(RelaxTimeC, 2) + "ms";

for (int cc = 0; cc < XX2; cc++)
{
    // Y = Ax + B
    ADC_Ln6[cc] = M3 * cc + B3;

    if (ADC_Ln6[cc] > 1.0) lineDataA8.Append(cc, ADC_Ln6[cc]);
}
Sensor_Data7.DataSeries = lineDataA8;
step_bt2 = 2;
step_bt1 = 3;
}

//Управление элементами интерфейса пользователя:
private void Bt_line1_Click(object sender, RoutedEventArgs e)
{
    if (step_bt1 == 1) Draw_line2();
    else if (step_bt1 == 2) Draw_line4();
    else if (step_bt1 == 3) Draw_line6();
}

```

```

private void Bt_Line2_Click(object sender, RoutedEventArgs e)
{
    if (step_bt2 == 1) Draw_line3();
    else if (step_bt2 == 2) Draw_line5();
}
private void Bt_Line3_Click(object sender, RoutedEventArgs e)
{
    Print_T2_P2();
}
private void Bt_calc_w_conc_Click(object sender, RoutedEventArgs e)
{
    //Все значения в мсек
    if (T2_oil == T2_water) T2_water += 0.1;
    W_Conc = 100*(T2_water*(T2_eff-T2_oil))/(T2_eff*(T2_water- T2_oil));
    W_conc_output.Text = "" + Math.Round(W_Conc, 2)+"%";
}
private void Bt_calcT2_Click(object sender, RoutedEventArgs e)
{
    //Посчитаем T2* (эффективное время релаксации)
    Line1_s.X1 = 0;
    Draw_line2();
    T2_eff = RelaxTimeA;
    T2_eff_out.Text = "" + Math.Round(T2_eff, 2);
}
public void Print_T2_P2()
{
    //Посчитаем T2
    double T2a, T2b, T2c, P2a, P2b, P2c; //T2 -время спин-спиновой
    //релаксации, A2 -амплитуда спин-эхо, P2 - населенности протонов.

    T2a = RelaxTimeA;
    T2b = RelaxTimeB;
    T2c = RelaxTimeC;
    //Переведем из процентов в доли единицы
    P2a = ProtonPopulationA / 100;
    P2b = ProtonPopulationB / 100;
    P2c = ProtonPopulationC / 100;
    T2 = 1 / (P2a / T2a + P2b / T2b + P2c / T2c);
    tb_relax_times.Text = "Время релаксации \nT2a = " +
    Math.Round(RelaxTimeA, 2) + "ms\nT2b = " + Math.Round(RelaxTimeB, 2)
    + "ms\nT2c = " + Math.Round(RelaxTimeC, 2) + "ms\nT2
    = " + Math.Round(T2, 2) + "ms";
    tb_proton_populations.Text = "Населенность \nP2a = " +
    Math.Round(ProtonPopulationA, 2) + "%\nP2b = " +
    Math.Round(ProtonPopulationB, 2) + "%\nP2c = " +
    Math.Round(ProtonPopulationC, 2) + "%";
}

```

```

//Автоматический анализ данных и вспомогательные функции для анализа:
// Функция для преобразования списка в массив
public static double[] ListToArray(List<double> list)
{
    if (list == null)
    {
        throw new ArgumentNullException("list");
    }
    // Создание и заполнение массива
    double[] array = new double[list.Count];
    list.CopyTo(array, 0);

    // Возврат массива
    return array;
}
private double max(double[] arr)
{
    double maxValue = arr[0];
    for (int i = 0; i < arr.Length; i++)
    {
        maxValue = maxValue > arr[i] ? maxValue : arr[i];
    }
    return maxValue;
}
private double min(double[] arr)
{
    double minValue = arr[0];
    for (int i = 0; i < arr.Length; i++)
    {
        minValue = minValue < arr[i] ? minValue : arr[i];
    }
    return minValue;
}
private double getYvalue(double x, double[] args)
{
    double y = args[0];
    double xPower = 1;
    for (int i = 1; i < args.Length; i++)
    {
        xPower *= x;
        y += args[i] * xPower;
    }
    return y;
}
private void Bt_auto_Click(object sender, RoutedEventArgs e)
{
    //Перепеция-----
    double[] xData = new double[ImpulseCnt];
    double[] yData = new double[ImpulseCnt];
    for (int cnt = 0; cnt < ImpulseCnt; cnt++)
    {
        xData[cnt] = cnt;
        Sensor_Data3.DataSeries.YValues.CopyTo(array: yData, index: 0);
    }
}

```

```

// Вычисление СКО
double mean = yData.Average();
double variance = yData.Select(x => Math.Pow(x - mean, 2)).Average();
double stdDev = Math.Sqrt(variance);
// Определение точек, отклоняющихся более чем на 3*СКО
double threshold = 1 * stdDev;

    for (int i = 5; i < yData.Length - 5; i++)
    {
        if (Math.Abs(yData[i] - mean) <= threshold)
            continue;

        yData[i] = 0;
        for (int cnt = -5; cnt <= 5; cnt++)
            if (cnt == 0) continue;
            else yData[i] += yData[i+cnt];
        yData[i] /= 10;
    }
    //Вывод полученной кривой
    var tmpLine0 = new XyDataSeries<double, double>();
    for (int counter = 0; counter < ImpulseCnt; counter++)
    {
        tmpLine0.Append(counter, yData[counter]);
    }
    Sensor_Data3.DataSeries = tmpLine0; // - для отображения кривой с
    удалением превышающих 3*СКО точек

    int order = 3;
    double[] args = LeastSquares.MultiLine(xData, yData, ImpulseCnt,
    order);
    double[] Xs = new double[ImpulseCnt];
    double[] Ys = new double[ImpulseCnt];
    Xs[0] = xData[0];
    Ys[0] = getYvalue(Xs[0], args);
    double step = 1;

    for (int i = 1; i < ImpulseCnt; i++)
    {
        Xs[i] = Xs[i - 1] + step;
        Ys[i] = getYvalue(Xs[i], args);
    }
    //Вывод полученной кривой
    var tmpLine = new XyDataSeries<double, double>();
    for (int counter = 0; counter < ImpulseCnt; counter++)
    {
        tmpLine.Append(counter, Ys[counter]);
    }
    //Sensor_Data3.DataSeries = tmpLine; - для отображения
    регрессированной кривой

    var straightLine = new double[ImpulseCnt];

    for (int x = 0; x < ImpulseCnt; x++)

```

```

{
    double v = (x) * (Ys[ImpulseCnt - 1] - Ys[0]);
    straightLine[x] = v / (ImpulseCnt) + Ys[0];
}

for (int x = 0; x < ImpulseCnt; x++)
{
    Ys[x] = straightLine[x] - Ys[x];
}
// Инициализируем индекс наибольшего элемента значением -1
int largestIndex = -1;
// Инициализируем максимальное значение наименьшим возможным
значением int
double maxValue = double.MinValue;
// Перебираем массив и обновляем индекс и максимальное значение по
мере необходимости
for (int i = 0; i < Ys.Length; i++)
{
    if (Ys[i] > maxValue)
    {
        maxValue = Ys[i];
        largestIndex = i;
    }
}
Line1_s.X1 = largestIndex;
Bt_line1_Click(Bt_line1, e); //Первая подгонка после вычисления T2*
Bt_Line2_Click(Bt_Line2, e); //Вычитание

//ФазаB-----
double[] x2Data = new double[ImpulseCnt2];
double[] y2Data = new double[ImpulseCnt2];

for (int cnt = 0; cnt < ImpulseCnt2; cnt++)
    x2Data[cnt] = cnt;
Sensor_Data4.DataSeries.YValues.CopyTo(array: y2Data, index: 0);

// Вычисление СКО
double mean2 = y2Data.Average();
double variance2 = y2Data.Select(x => Math.Pow(x - mean2, 2)).Average();
double stdDev2 = Math.Sqrt(variance2);

// Определение точек, отклоняющихся более чем на 3*СКО
double threshold2 = 3 * stdDev2;
for (int i = 5; i < y2Data.Length - 5; i++)
{
    if (Math.Abs(y2Data[i] - mean2) <= threshold2)
        continue;
    y2Data[i] = 0;
    for (int cnt = -5; cnt <= 5; cnt++)
        if (cnt == 0) continue;
    else y2Data[i] += y2Data[i + cnt];
    yData[i] /= 10;
}

```



```

//Вывод полученной кривой
var tmpLine02 = new XyDataSeries<double, double>();
for (int counter = 0; counter < ImpulseCnt2; counter++)
{
    tmpLine02.Append(counter, y2Data[counter]);
}
ExpRegression expRegression = new ExpRegression();
double[] p = expRegression.Exponential(x2Data, y2Data);
// a=1.017, r=0.687
double[] Y2s = MathNet.Numerics.Generate.Map(x2Data, k => p[0] *
Math.Exp(p[1] * k)); // 2.02, 4.02, 7.98

//Вывод полученной кривой
var tmpLine2 = new XyDataSeries<double, double>();
for (int counter = 0; counter < ImpulseCnt2; counter++)
{
    tmpLine2.Append(counter, Y2s[counter]);
}

//Теперь нужно провести через начало и конец кривой прямую, для
//определения места излома
var straightLine2 = new double[ImpulseCnt2];

for (int x = 0; x < ImpulseCnt2; x++)
{
    double v = (x) * (Y2s[ImpulseCnt2 - 1] - Y2s[0]);
    straightLine2[x] = v / (ImpulseCnt2) + Y2s[0];
}

//Найдем разницу между элементами прямой и кривой после регрессии
for (int x = 0; x < ImpulseCnt2; x++)
{
    Y2s[x] = straightLine2[x] - Y2s[x];
}

// Инициализируем индекс наибольшего элемента значением -1
int largestIndex2 = -1;

// Инициализируем максимальное значение наименьшим возможным
//значением int
double maxValue2 = double.MinValue;

//Перебираем массив и обновляем индекс и максимальное значение по
//мере необходимости
for (int i = 0; i < Y2s.Length; i++)
{
    if (Y2s[i] > maxValue2)
    {
        maxValue2 = Y2s[i];
        largestIndex2 = i;
    }
}

```

```

Line2_s.X1 = largestIndex2;
Bt_line1_Click(Bt_line1, e);
Bt_Line2_Click(Bt_Line2, e);

step_bt1 = 3;
Bt_line1_Click(Bt_line1, e);
Bt_Line3_Click(Bt_Line3, e);

//Расчитаем и выведем все остальные параметры
Show_Line_1n2_Table.Text = "LineA_ms = " + Line1_s.X1 + "\nLineB_ms
= " + Line2_s.X1 + "\nLineC_ms = " + Line3_s.X1;
Bt_show_oil_params_Click(Bt_show_oil_params, e);
}

private void T2_TextChanged(object sender, EventArgs e)
{
    TextBox textBox = sender as TextBox;
    double t2_tmp;
    if (Double.TryParse(textBox.Text, out t2_tmp))
    {
        if (sender == T2_oil_input)
            T2_oil = t2_tmp;
        else if (sender == T2_water_input)
            T2_water = t2_tmp;
    }
}

//Код отображения графиков с зависимостями характеристик нефти от ПМП-
параметров:
//Отображение зависимостей характеристик нефти от ПМП-параметров
private void Bt_change_graph_Click(object sender, RoutedEventArgs e)
{
    var tmp_line_1 = new XyDataSeries<double, double>();
    var tmp_line_2 = new XyDataSeries<double, double>();
    var tmp_line_3 = new XyDataSeries<double, double>();
    var tmp_line_4 = new XyDataSeries<double, double>();
    var tmp_line_5 = new XyDataSeries<double, double>();
    var tmp_line_6 = new XyDataSeries<double, double>();

    Graphic_1.DataSeries = new XyDataSeries<double, double>();
    Graphic_2.DataSeries = new XyDataSeries<double, double>();
    Graphic_3.DataSeries = new XyDataSeries<double, double>();
    Graphic_4.DataSeries = new XyDataSeries<double, double>();
    Graphic_5.DataSeries = new XyDataSeries<double, double>();
    Graphic_6.DataSeries = new XyDataSeries<double, double>();

    /*
    0  "Зависимость скорости потока от Асэ"
    1  "Зависимость расхода воды от Т2*"
    2  "Зависимость скорости потока от Т2*"
    3  "Зависимость концентрации воды от Т2*"
    4  "Концентрация воды в СКЖ по А1/Аст"

```

```

5  "Концентрация воды по населенности протонов"
6  "Плотность нефти от T2"
7  "Молекулярная масса нефти от R2в"
8  "Вязкость нефти от T2"
9  "Вязкость нефти от населенностей протонов"
10 "Температура застывания нефти от T2a"
11 "Температура застывания ДТ от T2a"
12 "КонцентрацияАСотT2a"
*/
switch (Dependences_list.SelectedIndex)
{
//Скорость потока от Асэ
case 0:
X_Scope3.VisibleRange = new DoubleRange(0.0, 260.0);
Y_Scope3.VisibleRange = new DoubleRange(0.0, 1.0);
Sensor_Scope3.XAxis.AxisTitle = "Асэ (y.e.)";
Sensor_Scope3.YAxis.AxisTitle = "Скорость потока V (м/с)";
tmp_line_1.SeriesName = "Вода";
tmp_line_2.SeriesName = "ВНЭ 90%, v<0.2 м/с";
tmp_line_3.SeriesName = "ВНЭ 90%, v>0.2 м/с";
tmp_line_4.SeriesName = "ВНЭ 25%, v<0.2 м/с";
tmp_line_5.SeriesName = "ВНЭ 25%, v>0.2 м/с";

for (double Ase = 0; Ase < 260; Ase++)
{
tmp_line_1.Append(Ase, Math.Log(Ase / 262) / -2.9);
tmp_line_2.Append(Ase, Math.Log(Ase / 255) / -7);
tmp_line_3.Append(Ase, Math.Log(Ase / 97.4) / -2.2);
tmp_line_4.Append(Ase, Math.Log(Ase / 220) / -0.46);
tmp_line_5.Append(Ase, Math.Log(Ase / 200) / -0.16);
}
Graphic_1.DataSeries = tmp_line_1;
Graphic_2.DataSeries = tmp_line_2;
Graphic_3.DataSeries = tmp_line_3;
Graphic_4.DataSeries = tmp_line_4;
Graphic_5.DataSeries = tmp_line_5;
break;
//Расход воды от T2*
case 1:
X_Scope3.VisibleRange = new DoubleRange(0.0, 2.0);
Y_Scope3.VisibleRange = new DoubleRange(0.0, 130.0);
Sensor_Scope3.XAxis.AxisTitle = "T2 (с)";
Sensor_Scope3.YAxis.AxisTitle = "Расход воды, Q";
tmp_line_1.SeriesName = "На малых расходах";
tmp_line_2.SeriesName = "На больших расходах";
for (double T2 = 0; T2 < 2; T2 += 0.005)
{
tmp_line_1.Append(T2, Math.Log(T2 / 1.81) / -0.041);
tmp_line_2.Append(T2, Math.Log(T2 / 0.376) / -0.0078);
}
Graphic_1.DataSeries = tmp_line_1;
Graphic_2.DataSeries = tmp_line_2;
break;

```

...

```

        ...
        //"Температура застывания ДТ от T2a"
case 11:
    X_Scope3.VisibleRange = new DoubleRange(1000.0, 1500.0);
    Y_Scope3.VisibleRange = new DoubleRange(-70.0, -40.0);
    Sensor_Scope3.XAxis.AxisTitle = "T2a (мс)";
    Sensor_Scope3.YAxis.AxisTitle = "Тдт.заст (*C)";
    tmp_line_1.SeriesName = "t застыванияДТ";
    for (double T2a = 1000; T2a < 1500; T2a += 0.05)
    {
        tmp_line_1.Append(T2a, 275-0.62*T2a+2.8*T2a*T2a/10000);
    }

    Graphic_1.DataSeries = tmp_line_1;
    break;
//"Концентрация АС от T2a"
case 12:
X_Scope3.VisibleRange = new DoubleRange(0.0, 1000.0);
    Y_Scope3.VisibleRange = new DoubleRange(0.0, 10.0);
    Sensor_Scope3.XAxis.AxisTitle = "T (мс)";
    Sensor_Scope3.YAxis.AxisTitle = "КонцентрацияАС (%)";

    tmp_line_1.SeriesName = "Для T2a";
    for (double T2a = 0; T2a < 1000; T2a += 0.5)
    {
        tmp_line_1.Append(T2a, -2.2 * Math.Log(T2a)+14.6);
    }
    Graphic_1.DataSeries = tmp_line_1;
    break;

    default:
break;
    }
}

//Расчет и отображение параметров нефти:
private void Bt_show_oil_params_Clk(object sender, RoutedEventArgs e)
{
    //Найдем T2*
    //Ответ будет в мсек.
    double T2a, T2b, T2c, A2a, A2b, A2c, P2a, P2b, P2c; //T2 -время
    //спин-спиновой релаксации, A2 -амплитуда спин-эхо, P2 -
    //населенности протонов.

    //С переводом из мс в сек.
    T2a = RelaxTimeA / 1000;
    T2b = RelaxTimeB / 1000;
    T2c = RelaxTimeC / 1000;
    A2a = AmplSE_A;
    A2b = AmplSE_B;
    A2c = AmplSE_C;

```

```

//Переведем из процентов в доли единицы
P2a = ProtonPopulationA / 100;
P2b = ProtonPopulationB / 100;
P2c = ProtonPopulationC / 100;
//=====Таблица 1=====//
double light_oil_density=(-220.133 * T2a * T2a)-18.855*T2a+885.72;
double heavy_oil_density = (Math.Log(T2a / 180.3) / (-0.0097));
double light_oil_molecular_mass = 116 * (1 / T2b) - 40.6;
double heavy_oil_molecular_mass = 4.75 * (1 / T2b) + 239;
double viscosity_from_R2a = 1.12 * (Math.Pow((1 / T2a), 1.25));
double viscosity_from_P2a = 1/(Math.Pow((P2a - 0.41) / 0.31, 5));
//Здесь возьмем T2a в миллисекундах-> T2a*=1000;
double resin_asphaltene_concentration=-2.2*Math.Log(T2a*1000)+
14.6;
tb_oil_params_1.Text = "Плотность тяжелой нефти: " +
Math.Round(heavy_oil_density, 2) + " кг/м3\n" + "Плотность легкой
нефти: " + Math.Round(light_oil_density, 2) + " кг/м3\n" + "ММ для
тяжелой нефти: " + Math.Round(heavy_oil_molecular_mass, 2) + "
а.е.м.\n" + "ММ для легкой нефти: " +
Math.Round(light_oil_molecular_mass, 2) + " а.е.м\n" + "Вязкость от
R2a: " + Math.Round(viscosity_from_R2a, 2) + " мПа*с\n"
+ "Вязкость от P2a: " + Math.Round(viscosity_from_P2a, 2) + "
мПа*с\n"
+ "C(a/c): " + Math.Round(resin_asphaltene_concentration, 2) +
"%\n";

//=====Таблица 2=====//
double Q_mal = (Math.Log(T2/1000 / 1.81) / -0.041);
double Q_bol = (Math.Log(T2/1000 / 0.376) / -0.0078);
double t_zast_oil = 762 / (T2a*1000) - 72.5;
double t_zast_dt = 275 - 0.62 * T2a * 1000 + 2.8 * T2a * T2a *
Math.Pow(10, 2) ;
tb_oil_params_2.Text = "Расход воды при малых объемах: " +
Math.Round(Q_mal, 2) + " м3/с\n"
+ "Расход воды при больших объемах: " + Math.Round(Q_bol, 2) + "
м3/с\n"
+ "Температура застывания нефти: " + Math.Round(t_zast_oil, 2) + "
°C\n"
+ "Температура застывания диз. топлива: " + Math.Round(t_zast_dt,
2) + " °C\n";
//=====Таблица 3=====//
double S_conc_oil = 5.84 - 0.83 * Math.Log(1 * T2a * 1000);
double S_conc_mazut = 3.41 - Math.Log(0.364 * T2a * 1000);
double S_conc_bitum = 2.72 - 0.45 * Math.Log(1 * T2a * 1000);
tb_oil_params_3.Text = "T2воды: " + Math.Round(T2_water, 2) + "
мс\n" + "T2нефти: " + Math.Round(T2_oil, 2) + " мс\n"
+ "T2*: " + Math.Round(T2_eff, 2) + " мс\n"
+ "Конц. Серы для нефти: " + Math.Round(S_conc_oil, 2) + "
%\n" + "Конц. серыдлямазута: " + Math.Round(S_conc_mazut, 2) + "
%\n"
+ "Конц. серыдлябитума: " + Math.Round(S_conc_bitum, 2) + "
%\n";
}

```

```

private void Load_Data()
{
    var lineDataA3 = new XyDataSeries<double, double>();
    var lineDataA4 = new XyDataSeries<double, double>();
    string path = String.Concat(Data_Dir, "/", Data_Name);
    System.IO.StreamReader file2 = new System.IO.StreamReader(path);
    string[] saved_measurements_config = new string[12];
    try
    {
        saved_measurements_config[0] = file2.ReadLine();
        saved_measurements_config[1] = file2.ReadLine();
        // Количество импульсов для замера
        saved_measurements_config[2] = file2.ReadLine();
        // Интервал для 90 - 180 градусных импульсов
        saved_measurements_config[3] = file2.ReadLine();
        // Длительность импульсов 180
        saved_measurements_config[4] = file2.ReadLine();
        // Длительность импульсов 90
        saved_measurements_config[5] = file2.ReadLine();
        // Частота
        saved_measurements_config[6] = file2.ReadLine();
        // Количество накоплений
        saved_measurements_config[7] = file2.ReadLine();
        // Коэффициент усиления
        saved_measurements_config[8] = file2.ReadLine();
        saved_measurements_config[9] = file2.ReadLine();
        saved_measurements_config[10] = file2.ReadLine();
        ImpulseCnt = Convert.ToInt16(saved_measurements_config[1]) - 1;
        Impulse90_180_value =
        Convert.ToDouble(saved_measurements_config[2]);
        Impulse_180_Width =
        Convert.ToDouble(saved_measurements_config[3]);

        tb_Dialog.Text = "Анализобразца : " +
        saved_measurements_config[0] + "\n";
        tb_Dialog.Text += "Число 180 импульсов : " + ImpulseCnt +
        "\n";
        tb_Dialog.Text += "Интервал 90 -180, мкс : " +
        saved_measurements_config[2] + "us\n";
        tb_Dialog.Text += "Длительность 180 : " +
        saved_measurements_config[3] + "us\n";
        tb_Dialog.Text += "Длительность 90 : " +
        saved_measurements_config[4] + "us\n";
        tb_Dialog.Text += "Частота, МГц : " +
        saved_measurements_config[5] + " MHz\n";
        tb_Dialog.Text += "Число накоплений : " +
        saved_measurements_config[6] + "\n";
        tb_Dialog.Text += "Усиление : " +
        saved_measurements_config[7] + "\n";
        X_Scope.VisibleRange = new DoubleRange(0.0, ImpulseCnt * 1.0);
        X_Scope2.VisibleRange = new DoubleRange(0.0, ImpulseCnt * 1.0);
    }
    catch { }
}

```

```

for (int avg = 0; avg < ImpulseCnt; avg++)
{
    saved_measurements_config[11] = file2.ReadLine();
    ADC_AVG[avg] =
    Convert.ToDouble(saved_measurements_config[11]);
    ADC_Ln[avg] = Math.Log(ADC_AVG[avg]);
    lineDataA3.Append(avg, ADC_AVG[avg]);
    lineDataA4.Append(avg, ADC_Ln[avg]);
}
file2.Close();

Sensor_AVG.DataSeries = lineDataA3;
Sensor_Data3.DataSeries = lineDataA4;

}
catch (Exception ex)
{
    MessageBox.Show(ex.InnerException.ToString());
}
}

//Работа с сохранениями данных измерений:
private void Save_Data()
{
    string date = DateTime.Now.ToString("yyyy_M_dd_");
    string time = DateTime.Now.ToString("HH_mm_ss");
    string path = String.Concat(Data_Dir, "/", date, time, ".txt");
    //File.Delete(path);

    FileStream fs1 = new FileStream(path, FileMode.OpenOrCreate,
    FileAccess.Write);
    TextWriter tw = new StreamWriter(fs1);
    try
    {
        tw.WriteLine(date + time);
        for (int c = 0; c < (MC_Pulse_Value + 10); c++)
        {
            tw.WriteLine(string.Concat(Math.Round(ADC_AVG2[c], 2))); //
        }
        tw.Close();
    }
    catch (Exception ex)
    {
        MessageBox.Show(ex.InnerException.ToString());
    }
}

private void Export_JPG()
{
    string date = DateTime.Now.ToString("yyyy_M_dd_");
    string time = DateTime.Now.ToString("HH_mm_ss");

```

```

    // When true, enables higher resolution XamlRenderSurface as an
    intermediary.
    // Available in the SDK and Enterprise versions only
    bool useXamlRenderSurface = false;
    // When not null, exports to the size defined. When null, exports
    to the current size.
    System.Windows.Size exportedSize = new
System.Windows.Size(Sensor_Scope2.Width, Sensor_Scope2.Height);
    cmd_Dir.Content = string.Concat(Data_Dir, "/", date, time, ".bmp");
    // Assumes the SciChartSurface is on screen and currently visible
    // What you see is what will be exported to file
    Sensor_Scope2.ExportToFile(string.Concat(Data_Dir, "/", date,
time, ".bmp"), ExportType.Bmp, useXamlRenderSurface, exportedSize);
}

private void bt_Save_Click(object sender, RoutedEventArgs e)
{
    Save_Data();
    bt_Save.IsEnabled = false;
}

private void Bt_Load_Click(object sender, RoutedEventArgs e)
{
    var lineData = new XyDataSeries<double, double>();
    for (int i = 0; i < ImpulseCnt; i++)
    {
        lineData.Append(i, Sensor_Frame0[i]);
    }

    Sensor_Data2.DataSeries = lineData;
    Sensor_Data4.DataSeries = lineData;
    Sensor_Data5.DataSeries = lineData;
    Sensor_Data6.DataSeries = lineData;
    Sensor_Data7.DataSeries = lineData;

    ImpulseCnt2 = 0;
    ImpulseCnt3 = 0;
    ImpulseCnt4 = 0;

    step_bt1 = 1;
    step_bt2 = 1;

    RelaxTimeA = 0.0;
    RelaxTimeB = 0.0;
    RelaxTimeC = 0.0;
    AmplSE_A = 0.0;
    AmplSE_B = 0.0;
    AmplSE_C = 0.0;
    ProtonPopulationA = 0.0;
    ProtonPopulationB = 0.0;
    ProtonPopulationC = 0.0;

```



```

    tb_se_amplitudes.Text = "Амплитуда СЭ \nAa = " +
Math.Round(AmplSE_A, 2) + "\nAb = " + Math.Round(AmplSE_B, 2) +
"\nAc = " + Math.Round(AmplSE_C, 2);
    tb_relax_times.Text = "Время релаксации \nT2a = " +
Math.Round(RelaxTimeA, 2) + "ms\nT2b = " + Math.Round(RelaxTimeB, 2)
+ "ms\nT2c = " + Math.Round(RelaxTimeC, 2) + "ms";
    tb_proton_populations.Text = "Населенность \n P2a = " +
Math.Round(ProtonPopulationA, 2) + "%\n P2b = " +
Math.Round(ProtonPopulationB, 2) + "%\n P2c = " +
Math.Round(ProtonPopulationC, 2) + "%";
    Load_Data();
    Line1_s.X1 = ImpulseCnt / 3;
    Line2_s.X1 = 0;}

//Управление интерфейсом программы:
private void PC_Freq_MouseWheel(object sender,
System.Windows.Input.MouseWheelEventArgs e)
{
    if (e.Delta < 0) if (Freq > 5000) Freq = Freq - 50;
    if (e.Delta > 0) if (Freq < 20000) Freq = Freq + 50;
    PC_Freq.Text = string.Format("{0:0.00#}", Freq / 1000.0);
}

private void bt_add1_Click(object sender, RoutedEventArgs e)
{
    if (Freq < 20000) Freq = Freq + 1;
    PC_Freq.Text= string.Format("{0:0.00#}", Freq / 1000.0);
}

private void bt_add10_Click(object sender, RoutedEventArgs e)
{
    if (Freq < 20000) Freq = Freq + 50;
    PC_Freq.Text = string.Format("{0:0.00#}", Freq / 1000.0);
}

private void bt_sub1_Click(object sender, RoutedEventArgs e)
{
    if (Freq > 5000) Freq= Freq - 1;
    PC_Freq.Text = string.Format("{0:0.00#}", Freq / 1000.0);
}

private void bt_sub10_Click(object sender, RoutedEventArgs e)
{
    if (Freq > 5000) Freq = Freq - 50;
    PC_Freq.Text = string.Format("{0:0.00#}", Freq / 1000.0);
}

private void bt_sub_b_Click(object sender, RoutedEventArgs e)
{
    if(Slider_CHb.Value >2) Slider_CHb.Value -= 1;
}

```

```

private void bt_add_b_Click(object sender, RoutedEventArgs e)
{
    if (Slider_CHb.Value < 255) Slider_CHb.Value += 1;
}

private void bt_sub_90_Click(object sender, RoutedEventArgs e)
{
    if (Slider_T90.Value >10) Slider_T90.Value -= 1;
}
private void bt_add_90_Click(object sender, RoutedEventArgs e)
{
    if (Slider_T90.Value < 150) Slider_T90.Value += 1;
}
private void bt_sub_180_Click(object sender, RoutedEventArgs e)
{
    if (Slider_T180.Value > 10) Slider_T180.Value -= 1;
}

private void bt_add_180_Click(object sender, RoutedEventArgs e)
{
    if (Slider_T180.Value < 200) Slider_T180.Value += 1;
}

private void bt_sub_MC_Click(object sender, RoutedEventArgs e)
{
    if (Slider_MC_Time.Value > 1) Slider_MC_Time.Value -= 1;
}

private void bt_add_MC_Click(object sender, RoutedEventArgs e)
{
    if (Slider_MC_Time.Value < 5010) Slider_MC_Time.Value += 1;
}

private void bt_sub_Pulse_Click(object sender, RoutedEventArgs e)
{
    if (Slider_MC_Pulse.Value > 1) Slider_MC_Pulse.Value -= 1;
}

private void bt_add_Pulse_Click(object sender, RoutedEventArgs e)
{
    if (Slider_MC_Pulse.Value < 10000) Slider_MC_Pulse.Value += 1;
}
private void Slider_CHb_ValueChanged(object sender,
RoutedPropertyChangedEventArgs<double> e)
{
    cmd_CHb.Content = string.Format("{0:0.0#}",
Math.Round(Slider_CHb.Value,0)*5.0/255.0);
    CHB_Value = Convert.ToUInt16(Slider_CHb.Value);
}

```

```

private void Slider_T90_ValueChanged(object sender,
RoutedPropertyChangedEventArgs<double> e)
{
    cmd_T90.Content = string.Format("{0:0.0#}us",
Math.Round(Slider_T90.Value,0)/10.0);
    T90_Value = Convert.ToUInt16(Slider_T90.Value);
}

private void Slider_T180_ValueChanged(object sender,
RoutedPropertyChangedEventArgs<double> e)
{
    cmd_T180.Content = string.Format("{0:0.0#}us",
Math.Round(Slider_T180.Value,0) / 10.0);
    T180_Value = Convert.ToUInt16(Slider_T180.Value);
    Impulse_180_Width = T180_Value / 10.0;
}

private void Slider_MC_Time_ValueChanged(object sender,
RoutedPropertyChangedEventArgs<double> e)
{
    cmd_MC_Time2.Content = string.Format("{0:0.0#}s",
Math.Round(Slider_MC_Time.Value, 0) / 10.0);
    Max_Time_Config2 = Convert.ToUInt16(Slider_MC_Time.Value);
}

private void Slider_MC_Pulse_MouseWheel(object sender,
System.Windows.Input.MouseWheelEventArgs e)
{
    if (e.Delta < 0) if (Slider_MC_Pulse.Value > 6)
Slider_MC_Pulse.Value -= 5;
    if (e.Delta > 0) if (Slider_MC_Pulse.Value < 9995)
Slider_MC_Pulse.Value += 5;
}

private void Slider_MC_Pulse_ValueChanged(object sender,
RoutedPropertyChangedEventArgs<double> e)
{
    cmd_MC_Pulse.Content =
string.Concat(Math.Round(Slider_MC_Pulse.Value,0));
    MC_Pulse_Value = Convert.ToUInt16(Slider_MC_Pulse.Value);
    X_Scope.VisibleRange = new DoubleRange(0.0, MC_Pulse_Value);
    X_Scope2.VisibleRange = new DoubleRange(0.0, MC_Pulse_Value);
}

private void Slider_T_ValueChanged(object sender,
RoutedPropertyChangedEventArgs<double> e)
{
    if(Slider_T.Value<20) cmd_T.Content =
string.Concat(Math.Round(Slider_T.Value, 0)*50,"us");
    else if (Slider_T.Value >= 20) cmd_T.Content =
string.Concat(Math.Round(Slider_T.Value, 0) / 20, "ms");
    Toff_Value = Convert.ToUInt16(Slider_T.Value);

    Impulse90_180_value = Toff_Value * 50.0;
}

```

```

private void bt_add_MC2_Click(object sender, RoutedEventArgs e)
{
    Slider_MC2_time2.Value++;
    if (Slider_MC2_time2.Value < 10) cmd_nghi.Content =
string.Concat(Math.Round(Slider_MC2_time2.Value, 0) * 100, "ms");
    else if (Slider_MC2_time2.Value >= 10) cmd_nghi.Content =
string.Concat(Math.Round(Slider_MC2_time2.Value, 0) / 10, "s");
}

private void bt_sub_MC2_Click(object sender, RoutedEventArgs e)
{
    Slider_MC2_time2.Value--;
    if (Slider_MC2_time2.Value < 10) cmd_nghi.Content =
string.Concat(Math.Round(Slider_MC2_time2.Value, 0) * 100, "ms");
    else if (Slider_MC2_time2.Value >= 10) cmd_nghi.Content =
string.Concat(Math.Round(Slider_MC2_time2.Value, 0) / 10, "s");
}

private void bt_exit_Click(object sender, RoutedEventArgs e)
{ try
    {
        mySerialPort.Close();
        Send_Comport.Stop();
        t1.Abort();
        t2.Abort();
        t3.Abort();
        t4.Abort();
        t5.Abort();
    }
    catch { }
    System.Environment.Exit(1);
}

private void Slider_T_MouseWheel(object sender,
System.Windows.Input.MouseWheelEventArgs e)
{ if (e.Delta < 0) if (Slider_T.Value > 5) Slider_T.Value -= 5;
  if (e.Delta > 0) if (Slider_T.Value < 95) Slider_T.Value += 5;
}

private void Slider_MC_Time_MouseWheel(object sender,
System.Windows.Input.MouseWheelEventArgs e)
{ if (e.Delta < 0) if (Slider_MC_Time.Value > 7)
Slider_MC_Time.Value -= 5;
  if (e.Delta > 0) if (Slider_MC_Time.Value <
(Slider_MC_Time.Maximum-6)) Slider_MC_Time.Value += 5;
}

private void Slider_T90_MouseWheel(object sender,
System.Windows.Input.MouseWheelEventArgs e)
{if (e.Delta < 0) if (Slider_T90.Value > 15) Slider_T90.Value -= 5;
  if (e.Delta > 0) if (Slider_T90.Value < 145) Slider_T90.Value += 5;
}

```

```

private void Slider_T180_MouseWheel(object sender,
System.Windows.Input.MouseWheelEventArgs e)
{
    if (e.Delta < 0) if (Slider_T180.Value > 15) Slider_T180.Value -= 5;
    if (e.Delta > 0) if (Slider_T180.Value < 195) Slider_T180.Value += 5;
}

private void Slider_CHb_MouseWheel(object sender,
System.Windows.Input.MouseWheelEventArgs e)
{
    if (e.Delta < 0) if (Slider_CHb.Value > 7) Slider_CHb.Value -= 5;
    if (e.Delta > 0) if (Slider_CHb.Value < 248) Slider_CHb.Value += 5;
}

private void cb_History_SelectionChanged(object sender,
SelectionChangedEventArgs e)
{
    Data_Name = cb_History.SelectedItem.ToString(); //Text;
}

private void Sensor_Scope2_MouseEnter(object sender,
System.Windows.Input.MouseEventEventArgs e)
{
    Line1_s.Visibility = Visibility.Visible;
    Line2_s.Visibility = Visibility.Visible;
}

private void Sensor_Scope2_MouseLeave(object sender,
System.Windows.Input.MouseEventEventArgs e)
{
    Line1_s.Visibility = Visibility.Hidden;
    Line2_s.Visibility = Visibility.Hidden;
}

private void Line1_s_MouseEnter(object sender,
System.Windows.Input.MouseEventEventArgs e)
{
    Line1_s_active = 1;
}

private void Line1_s_MouseLeave(object sender,
System.Windows.Input.MouseEventEventArgs e)
{
    if (Line1_s_active == 1)
    {
        Line1_s_active = 0;
        double buf1 = Convert.ToDouble(Line1_s.X1);
        Line1_s.X1 = Math.Round(buf1, 0);
        Show_Line_1n2_Table.Text = "LineA_ms = " + Line1_s.X1 +
"\nLineB_ms = " + Line2_s.X1 + "\nLineC_ms = " + Line3_s.X1;
    }
}

```

```

private void Line2_s_MouseEnter(object sender,
System.Windows.Input.MouseEventArgs e)
{
    Line2_s_active = 1;
}

private void Line2_s_MouseLeave(object sender,
System.Windows.Input.MouseEventArgs e)
{
    if (Line2_s_active == 1)
    {
        Line2_s_active = 0;
        double buf2 = Convert.ToDouble(Line2_s.X1);
        Line2_s.X1 = Math.Round(buf2, 0);
        Show_Line_1n2_Table.Text = "LineA_ms = " + Line1_s.X1 +
"\nLineB_ms = " + Line2_s.X1 + "\nLineC_ms = " + Line3_s.X1;
    }
}

private void Line3_s_MouseEnter(object sender,
System.Windows.Input.MouseEventArgs e)
{
    Line3_s_active = 1;
}

private void Line3_s_MouseLeave(object sender,
System.Windows.Input.MouseEventArgs e)
{
    if (Line3_s_active == 1)
    {
        Line3_s_active = 0;
        double buf2 = Convert.ToDouble(Line3_s.X1);
        Line3_s.X1 = Math.Round(buf2, 0);
        Show_Line_1n2_Table.Text = "LineA_ms = " + Line1_s.X1 +
"\nLineB_ms = " + Line2_s.X1 + "\nLineC_ms = " + Line3_s.X1;
    }
}

private void bt_Dir_Click(object sender, RoutedEventArgs e)
{
    Process.Start(Data_Dir);
}

private void Slider_ADC_MouseWheel(object sender,
System.Windows.Input.MouseWheelEventArgs e)
{
    {if (e.Delta < 0) if (Slider_ADC.Value > 2) Slider_ADC.Value -= 1;
    if (e.Delta > 0) if (Slider_ADC.Value < 255) Slider_ADC.Value+=1;
    }
}

private void PC_Online_Unchecked(object sender, RoutedEventArgs e)
{
    continuous_mode = 0;
}

private void PC_Online_Checked(object sender, RoutedEventArgs e)
{
    continuous_mode = 1;
}

```

```

private void bt_sub_T_Click(object sender, RoutedEventArgs e)
{
    if (Slider_T.Value > 1) Slider_T.Value -= 1;
}

private void bt_add_T_Click(object sender, RoutedEventArgs e)
{
    if (Slider_T.Value < 100) Slider_T.Value += 1;
}

private void bt_sub_ADC_Click(object sender, RoutedEventArgs e)
{
    if (Slider_ADC.Value > 1) Slider_ADC.Value -= 1;
}

private void bt_add_ADC_Click(object sender, RoutedEventArgs e)
{
    if (Slider_ADC.Value < 255) Slider_ADC.Value += 1;
}

private void Slider_ADC_ValueChanged(object sender,
RoutedPropertyChangedEventArgs<double> e)
{
    Savings_ADC = (int) Slider_ADC.Value;
    if(error_fix==1) cmd_ADC.Content =
string.Concat(Math.Round(Slider_ADC.Value, 0));
    //X_Scope.VisibleRange = new DoubleRange(0.0, 600.0);
}
}
}

// Вспомогательные функции:
private void T2_PreviewTextInput(object sender,
System.Windows.Input.TextCompositionEventArgs e)
{
    bool isValid = false;
    TextBox textBox = sender as TextBox;
    if (e.Text == ".")
    {
        // Проверяем, что в текстовом поле еще нет точки и значение еще
        входит в диапазон от 1 до 100
        if (!textBox.Text.Contains(".") &&
            double.TryParse(textBox.Text + e.Text, out double result) &&
            result >= 0 && result <= 2000)
        {
            isValid = true;
        }
    }
    else
    {
        // Проверяем, что введенный символ является числом и значение с
        учетом ввода этого символа
        if (double.TryParse(textBox.Text + e.Text, out double result) &&
            result >= 0 && result <= 2000) { isValid = true; }
    }
    e.Handled = !isValid;
}

```

```

private void bt_tim_Click(object sender, RoutedEventArgs e)
{
    cb_History.Items.Clear();
    string[] files = Directory.GetFiles(Data_Dir, "*.txt",
SearchOption.AllDirectories);
    foreach (string file in files)
    {
        cb_History.Items.Add(Path.GetFileName(file));
    }

    if (cb_History.Items.Count >= 1)
    {
        cb_History.SelectedIndex = 0;
        Bt_Load.IsEnabled = true;
        Data_Name = cb_History.SelectedItem.ToString(); //.Text;
    }
    else
    {
        Bt_Load.IsEnabled = false;
    }
}

private void Window_Closed(object sender, EventArgs e)
{ if (Connect_ok == 1)
    { try
        {mySerialPort.Close();
        Send_Comport.Stop();
        t5.Abort();}
        catch{ }
    }
    try{
        t1.Abort();
        t2.Abort();
        t3.Abort();
        t4.Abort();}
        catch{ }
    }

private void PC_Ket_noi_Unchecked(object sender, RoutedEventArgs e)
{ PC_Comport.IsEnabled = true;
  bt_find.IsEnabled = true;
  Receiver_ENA = 0;

  try
  { mySerialPort.Close();
    Send_Comport.Stop();
    t1.Abort();
    t2.Abort();
    t3.Abort();
    t4.Abort();
    t5.Abort();}
    catch { }
  }

```



```

ExpRegression.cs:
using System;
...
using MathNet.Numerics.LinearRegression;

namespace Dieu_Che
{
    public class ExpRegression
    {
        public double[] Exponential(double[] x, double[] y)
        {
            double[] y_hat = Generate.Map(y, Math.Log);
            double[] p_hat = Fit.LinearCombination(x, y_hat,
                DirectRegressionMethod.QR, t => 1.0, t => t);
            return new[] { Math.Exp(p_hat[0]), p_hat[1] };
        }
    }
}

```

Приложение В

Акты внедрения основных результатов диссертационной работы

ИНТЕГРАЛ+

НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ФИРМА

20029, Республика Татарстан,
г. Казань, улица Сибирский Тракт,
дом 34, корпус 02, офис 75
integralplus.ru

УТВЕРЖДАЮ

Директор организации

ООО «Интеграл Плюс»

Д.О. Валов

2025 г.



АКТ

о внедрении результатов

кандидатской диссертационной работы

Арсланова Амира Динаровича

Комиссия в составе:

Председатель - руководитель направления «Струна-5» ООО «Интеграл Плюс» Гараев Тимур Ирекович;

Член комиссии – Медведев Сергей Анатольевич, начальник радиомонтажного цеха ООО «Интеграл Плюс»;

Член комиссии - Москов Нурмухаммад Рустам угли, наладчик РЭАиП ООО «Интеграл Плюс»;

Эксперт – зав. кафедрой «Приборостроение и мехатроника» ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», д.т.н. Козелков Олег Владимирович;

Эксперт – проф. кафедры «Приборостроение и мехатроника» ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», д.т.н. Кашаев Рустем Султанхамитович

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Арсланова Амира Динаровича «Разработка новых методов и программно-технического обеспечения автоматизации измерений, диагностики состояния узлов и средств повышения надежности ПМР-анализатора нефти», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.8, использованы в процессе пусконаладочных работ, а также при диагностике радиоэлектронного оборудования, производимого ООО «Интеграл Плюс» в рамках направления «Струна-5».

Заключение: разработанные Арслановым А.Д. в рамках работы над диссертацией на соискание степени к.т.н. по специальности 2.2.8 средства диагностики и методы повышения надежности работы электронного оборудования были испытаны комиссией предприятия ООО «Интеграл Плюс» с участием приглашенных экспертов и признаны целесообразными к применению в рамках работы направления «Струна-5». Методики, предложенные в работе «Разработка новых методов и программно-технического обеспечения автоматизации измерений, диагностики состояния узлов и средств повышения надежности ПМР-анализатора нефти», внедрены в рабочий процесс при производстве и обслуживании радиоэлектронного оборудования РСПИ «Струна-5».

Председатель комиссии:

Руководитель направления «Струна-5» ООО «Интеграл Плюс»

Гараев Т.И./

Члены комиссии:

Начальник радиомонтажного цеха ООО «Интеграл Плюс»

Наладчик РЭАиП ООО «Интеграл Плюс»

Медведев С.А./

Москов Н. Рустам угли

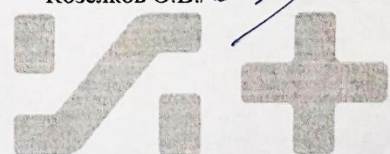
Приглашенные эксперты:

Профессор каф. «ПМ» ФГБОУ ВО «КГЭУ», д.т.н.

Зав. каф., доцент каф. «ПМ» ФГБОУ ВО «КГЭУ», д.т.н.

Кашаев Р.С./

Козелков О.В./



Окончание приложения В

Утверждаю:
Первый проректор-
проректор по УР

Леонтьев А.В.

9 апреля 2025



**Акт
внедрения**

в научно-исследовательскую деятельность
и образовательный процесс ФГБОУ ВО «КГЭУ»

Настоящий акт составлен о том, что нижеуказанная:
Методика автоматизации обработки результатов измерений релаксметра ПМР,

Автор(ы) Арсланов Амир Динарович, Кашаев Рустем Султанхамитович,
Козелков Олег Владимирович

Внедрена с 1 февраля 2025 г. в учебный процесс кафедры
«Приборостроение и мехатроника» в виде методических материалов для
выполнения работ по образовательной программе 12.03.01 «Приборостроение»
дисциплина «Методы и средства обработки результатов измерений и
исследований», подготовки бакалавриат.

Руководитель ООП

[Signature]

Козелков О.В.

Первый автор

[Signature]

Арсланов А.Д.

Второй автор

[Signature]

Кашаев Р.С.

Третий автор

[Signature]

Козелков О.В.

Приложение Г

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024682954

**Программа автоматизированного контроля и обработки
сигналов при исследованиях характеристик нефти
методом протонной магнитно-резонансной
релаксометрии для системы экспресс контроля
проточного ПМР-анализатора**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования «Казанский
государственный энергетический университет» (RU)*

Авторы: *Арсланов Амир Динарович (RU), Кашаев Рустем
Султанхамитович (RU), Козелков Олег Владимирович (RU),
Нгуен Дык Ань (VN), Галиев Азат Булатович (RU)*

Заявка № **2024681562**

Дата поступления **19 сентября 2024 г.**

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **01 октября 2024 г.**



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

документ подписан электронной подписью
Сертификат 0692670001000164040670bca2036
(Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**)
Действителен с 10.07.2004 по 03.10.2025

Ю.С. Зубов

Окончание приложения Г

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024615694

Программа визуализации зависимостей характеристик нефти от параметров протонной магнитной резонансной релаксометрии для системы контроля проточного ПМР-анализатора

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет» (RU)*

Авторы: *Арсланов Амир Динарович (RU), Кашаев Рустем Султанхамитович (RU), Козелков Олег Владимирович (RU), Нгуен Дык Ань (RU), Галиев Азат Булатович (RU)*



Заявка № 2024613804

Дата поступления 27 февраля 2024 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 12 марта 2024 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 429b6a0f91813b64ba196b83e73e4aa7
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 18.05.2025 по 02.08.2024

Ю.С. Зубов

Приложение Д

Сертификаты об участии в конференциях:



Продолжение приложения Д



Окончание приложения Д



СЕРТИФИКАТ УЧАСТНИКА

настоящий сертификат подтверждает, что

Арсланов Амир Динарович

принял(а) участие в IX Национальной научно-практической конференции
«ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД В ТОПЛИВНО-
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ И ЖИЛИЩНО-КОММУНАЛЬНОМ ХОЗЯЙСТВЕ»
посвященной 55-летию КГЭУ

Проректор по развитию и инновациям
ФГБОУ ВО «КГЭУ»



И.Г. Ахметова

7-8 декабря 2023 г., Казань



КАЗАНСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

СЕРТИФИКАТ УЧАСТНИКА

настоящий сертификат подтверждает, что

Арсланов Амир Динарович

принял(а) участие в Национальной научно-практической конференции
«ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД В ТОПЛИВНО-
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ И ЖИЛИЩНО-КОММУНАЛЬНОМ ХОЗЯЙСТВЕ»

Проректор по развитию и инновациям
ФГБОУ ВО «КГЭУ»



И.Г. Ахметова

12-13 декабря 2024 г., Казань

Приложение Е

Дипломы, полученные в результате выступлений по работе:



Продолжение приложения Е



IX Национальная научно-практическая конференция
«Приборостроение и автоматизированный электропривод
в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве»,
посвященная 55-летию КГУ

ДИПЛОМ

II степени

НАГРАЖДАЕТСЯ

Арсланов Амир Динарович

Проректор
по развитию и инновациям



Ахметова И.Г.

7-8 декабря 2023 г., Казань

КГУ

Продолжение приложения Е



Окончание приложения Е

