

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Казанский государственный энергетический университет»

На правах рукописи

Нгуен Дык Ань

**РАЗРАБОТКА БЛОКОВ ПРОТОЧНОГО АНАЛИЗАТОРА И МЕТОДИК
ЭКСПРЕСС-КОНТРОЛЯ ХАРАКТЕРИСТИК НЕФТИ И
ГАЗОКОНДЕНСАТА МЕТОДОМ ПМР**

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, профессор,
Кашаев Рустем Султанхамитович

Казань – 2026

СОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	4
ВВЕДЕНИЕ	5
1. НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ НОВЫХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ БЛОКОВ И ЭЛЕМЕНТОВ СУЩЕСТВУЮЩИХ СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ	14
1.1. Параметры низкополевых магнитов.....	14
1.2. Характеристики радиочастотных импульсов в ПМР–методиках.....	17
1.3. Спиновая динамика во время переходных процессов в импульсах.....	20
1.4. Способы увеличения отношения сигнал/шум.....	22
1.5. Импульсные последовательности и эксперименты	24
1.6. Области применения низкополевых магнитных систем	26
1.7. Эксперименты и анализ	31
1.8. Выводы по главе 1 и постановка задачи	31
2. РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЯ МАГНИТА ХАЛЬБАХА ДЛЯ РЕЛАКСОМЕТРА И ПМР–АНАЛИЗАТОРА, СРЕДСТВО КОНТРОЛЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ, СХЕМОТЕХНИКА ЭЛЕКТРОННЫХ БЛОКОВ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ РЕЛАКСОМЕТРА	33
2.1. Магнит для ПМР–релаксометра в составе анализатора ПМРА–IV	33
2.2. Цифровой измеритель индукции магнитного поля	41
2.3. Разработка и испытания электронных блоков ПМР–релаксометра.....	43
2.4. Интерфейс программного обеспечения для настройки и анализа релаксометра ПМР–NPЗ.	77
2.5. Разработка стабилизатора температуры для магнита образцов с терморегулятором.....	80
2.6. Выводы по главе 2	85
3. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АНАЛИТИЧЕСКОГО И НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ ОБЪЕКТОВ КОНТРОЛЯ – АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ АНАЛИЗАТОР ПМРА–IV	88
3.1. Сравнение с лучшим зарубежным аналогом	90

3.2. Влияние на сигнал спин–эхо предварительного намагничивания потока измеряемой водо–нефтяной смеси	93
3.3. Описание конструкции анализатора ПМРА–IV	95
3.4. Области применения ПМРА–IV на цифровом месторождении	101
3.5. Экономические аспекты производства и применения ПМРА–IV	104
3.6. Выводы по главе 3	106
4. РАЗРАБОТКА МЕТОДИК ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ АНАЛИТИЧЕСКОГО И НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ ОБЪЕКТОВ КОНТРОЛЯ	109
4.1. Экспресс–контроль содержания асфальтенов в сырой нефти и газоконденсате месторождений Вьетнама методом ПМР	109
4.2. Анализ температурных зависимостей нефтей и газоконденсата Вьетнама методом ПМР–релаксометрии	113
4.3. Проект использования ПМРА–IV в промышленном Интернете вещей на цифровом месторождении	118
4.5. Интеллектуальный мониторинг и управление анализатором ПМРА–IV в составе системы интернета вещей	123
4.6. Интеллектуальное устройство для подключения релаксометра ПМР к веб–серверу в ПИВ	130
4.7. Выводы по главе 4	135
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	136
ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ	138
ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ	139
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	147
ПРИЛОЖЕНИЯ А	162
ПРИЛОЖЕНИЯ Б	168
ПРИЛОЖЕНИЯ В	170

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ЦМ	– Цифровое месторождение
ЯМР	– Ядерный магнитный резонанс
ПМР	– Протонный магнитный резонанс
СЭ	– Спиновое эхо
ПМРР	– протонная магнитно–резонансная релаксометрия
ФХС	– физико–химические свойства
НДС	– нефтяные дисперсные системы
Асф	– асфальтены
АСПО	– асфальтено–смолисто–парафиновые отложения
ПИВ	– промышленный интернет вещей
КПМГ	– последовательность Карра–Парселла–Мейбум–Гилла
ПЦС	– прямой цифровой синтез
ПЛИС	– программируемая логическая интегральная схема
ЦАП	– цифро–аналоговый преобразователь
АЦП	– аналого–цифровой преобразователь
FTW	– регистра управления частотой (<i>Frequency Tuning Word</i>)
POW	– регистра управления фазой (<i>Phase Offset Word</i>)
С/Ш	– отношение сигнал/шум
МШУ	– малошумящий усилитель
УНУ	– усилитель, управляемый напряжением
П/П	– приём/передача
РЧ	– радиочастотный
ВЧ	– высокочастотный
НПС	– низкополевые системы
МХ	– магнит Хальбаха
МСХ	– магнитная сборка Хальбаха
АГЗУ	– автоматизированная групповая замерная установка
УЭЦН	– установка электроцентробежного насоса

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности

В соответствии с приоритетами развития топливно-энергетического комплекса, отражёнными в «Энергетической стратегии России до 2050 года», особое внимание уделяется обеспечению технологического суверенитета и внедрению отечественных технологий, в том числе при разработке трудноизвлекаемых запасов углеводородов. В свою очередь, реализация положений распоряжения Правительства РФ №1632 от 28.08.2017 г. «Цифровая экономика Российской Федерации» обуславливает актуальность цифровизации нефтегазовой отрасли и формирования так называемых «цифровых месторождений» (ЦМ). Данная концепция предполагает интеграцию систем мониторинга и управления технологическими параметрами на основе больших данных, промышленного интернета вещей и цифровых моделей объектов. По оценкам отраслевых исследований, внедрение подобных решений может способствовать увеличению добычи нефти на 10–25% и снижению энергетических потерь до 8% [1].

Нефтегазовой промышленности Российской Федерации необходимо поднять уровень отечественных ЦМ до их мирового уровня *smart fields* в плане мониторинга нефти. Существующие методы контроля на нефтепромыслах не дают полной и оперативной информации по всей номенклатуре характеристик нефти из-за отсутствия универсальных современных неразрушающих образцов экспресс-анализаторов. Их контроль не является оперативным, инструментальные методики имеют значительные погрешности из-за непредставительного отбора проб, затрудненного меняющимися структурами потоков и инверсией фаз. Сложности возникают также из-за расположения нефтяных месторождений на огромных территориях при недостатке инфраструктуры, что требует максимальной автоматизации процессов контроля.

Основой ЦМ являются высокотехнологичные аппаратные средства для сбора данных по максимально широкой номенклатуре характеристик сырой нефти (СН), водонефтяных эмульсий, топливных смесей и сточных вод, и при этом

требуется снизить ошибки, достигающие $\pm 30\%$ при отборе проб. Нефтедобыча, подготовка и транспортировка нефти осуществляется в многофазных структурированных потоках. Поэтому на нефтепромыслах нужен проточный экспресс-анализатор для контроля физико-химических свойств (ФХС) и соотношения компонентов потоков СН, её дебита.

Формирование единой системы измерений на ИЦМ может быть осуществлено на базе неразрушающего, совмещающего в себе возможности нескольких анализаторов и выполняющего контроль сразу по нескольким ПМР-параметрам, что позволяет верифицировать данные, автоматического программно-измерительного проточного комплекса, использующего метод ядерного (протонного) магнитного резонанса (ПМР), основанного на принципах квантовой радиофизики. Уникальные возможности ЯМР связаны с отсутствием зависимости квантово-магнитных свойств ядер (протонов) от пространственной морфологии образца. И к счастью, параметры релаксации протонов разных фаз СН коррелируют со многими ФХС нефти. В связи с этим ЯМР широко используется для контроля в нефтяной индустрии *Dalitz* [2].

Нефти, различаясь химическим составом, с современных позиций, развитых научной школой З.И. Сюняева и его учениками, представляют нефтяные дисперсные системы (НДС) разного типа Сафиева [3], допускающие единый подход при их анализе.

Большой вклад в развитие теории и аппаратуры ядерного магнитного резонанса внесли отечественные ученые: профессора Чижик В.И., Вашман А.А., Пронин И.С., Волков В.Я., Калабин Г.А., Скирда В.Д. [4–8] и др. Но из-за отсутствия серийного выпуска отечественных ЯМР-анализаторов, основными их поставщиками являются зарубежные фирмы, что тормозит внедрение отечественных разработок и ведет к потере отечественного приоритета в приборостроении. Их конструктив и программное обеспечение практически недоступны модернизации, Наилучший зарубежный многофазный анализатор *MFMA-500* фирмы *Krohne* [9] не обеспечивает измерений всей номенклатуры характеристик, является слишком массивным и неуниверсальным по входному

диаметру. В проточном ПМР–анализаторе релаксометр ПМР является основным контрольно–управляющим блоком, в котором многое зависит от магнита, в котором располагается измерительный датчик.

Таким образом, актуальной является задача разработки усовершенствованного автоматического проточного анализатора для экспресс–контроля характеристик нефти и газоконденсата методом ПМР, обеспечивающего повышение точности, оперативности и универсальности измерений в условиях цифровых месторождений.

Методология и методы исследования

Объектом исследования являются процессы неразрушающего проточного экспресс–контроля физико–химических характеристик нефти и газоконденсата методом ПМР в условиях промышленной эксплуатации и цифрового мониторинга.

Предметом исследования являются аппаратно–программные, конструктивные, схемотехнические и алгоритмические решения, реализуемые в блоках автоматизированного проточного ПМР–анализатора, обеспечивающие повышение точности, информативности и автоматизации контроля физико–химических характеристик нефти и газоконденсата.

Целью работы является разработка аппаратно–методического обеспечения для автоматического экспресс–контроля характеристик нефти и газоконденсата путем создания и экспериментальной апробации проточного ПМР–анализатора, с улучшенными метрологическими характеристиками при промышленной эксплуатации.

Для этого надо решить следующие задачи:

1. Разработать и научно обосновать новую структуру постоянного магнита, обеспечивающую уменьшение габаритов и массы, повышение объема зоны однородности и стабильности магнитного поля в зазоре, а также увеличение отношения сигнал/шум (С/Ш) при измерениях;

2. Разработать программное обеспечение и схемотехнику электронных блоков релаксометра ПМР на основе современной элементной базы и прямого

цифрового синтеза, а также разработать измеритель индукции магнитного поля для повышения точности измерений и термостабилизатор для обеспечения температурной стабильности магнитного поля;

3. Разработать автоматический приборно–программный комплекс ПМРА–IV с автоматическим управлением блоками анализатора, цифровой обработкой сигналов;

4. Разработать усовершенствованный проточный модуль пробоотбора с внутренним байпасом и блоком управления пробоотборным патрубком, обеспечивающий повышение представительности пробы и устойчивости измерений в реальных условиях эксплуатации;

5. Провести апробацию разработанных методик и технических средств проточного ПМР–анализатора на образцах нефтей Поволжья, а также нефтей и газоконденсата Вьетнама с оценкой их физико–химических характеристик;

6. Предложить схему применения ПМРА–IV в системе промышленного Интернета вещей на цифровом месторождении.

Методы исследования

Для решения поставленных задач применялся теоретический анализ для обоснования конструкции и оптимизации параметров магнитов, датчиков и электронных блоков релаксометра ПМР в составе ПМРА–IV. Для численного моделирования магнитного поля электронных схем использовались программные средства: *ANSYS Maxwell*, *Proteus 8.7*, для обработки полученных данных *Advanced Grafer*. Методы проектирования и экспериментальных испытаний с использованием *Solid Works* и *Altium* применялись при разработке датчиков ПМР, электронных модулей и роботизированного пробоотборного устройства. Корректность работы узлов проверялась лабораторными испытаниями. Методы измерений и цифровой обработки сигналов реализованы в языке *C#* с использованием библиотеки *SciChart* для визуализации и *MySQL* для облачного хранения данных. Прикладные эксперименты проводились на образцах нефти месторождений России (Ромашкинское) и Вьетнама (*Bach Ho*, *Ca Ngu Vang*, газоконденсата *Tien Hai*).

Научная новизна работы

1. Научно обоснована и разработана многослойная магнитная структура Хальбаха (МСХ), обеспечивающая уменьшение габаритов и массы, а также повышение объема области однородности и стабильности магнитного поля в зазоре.

2. Разработан автоматический проточный анализатор ПМРА–IV, включающий усовершенствованные электронные блоки релаксометра, алгоритмы управления измерительным процессом и модуль пробоотбора с управляемым позиционированием, обеспечивающий повышение представительности пробы и достоверности измерений.

3. Разработаны и экспериментально подтверждены методики экспресс–контроля физико–химических характеристик нефти и газоконденсата на основе анализа параметров ПМР–релаксации, а также реализована интеграция анализатора в инфраструктуру промышленного Интернета вещей для дистанционного мониторинга и управления на цифровом месторождении.

Теоретическая значимость результатов работы заключается в развитии методических принципов построения аппаратной части проточного анализатора ПМРА–IV, включая расчет магнитной системы и модернизацию электронных блоков релаксометра с применением прямого цифрового синтеза. Обоснованы требования к чувствительности и температурной стабильности измерений, что расширяет возможности релаксометров ПМР для экспресс–контроля нефти и газоконденсата. Подтверждено влияние предварительного подмагничивания потока на повышение отношения сигнал/шум водной фазы в водонефтяных смесях.

Практическая значимость работы заключается в разработке:

1. Измерителя индукции магнитных полей, реализованного на основе линейного цифрового магнитного датчика, обеспечивающего расширенный диапазон измерений магнитной индукции, цифровую регистрацию и визуализацию измеренных параметров магнитных систем;

2. Усилительных трактов релаксометра ПМР, включая усилитель мощности передатчика и малошумящий, управляемый напряжением усилитель приёмника,

обеспечивающих параметры импульсов и чувствительности регистрации сигналов;

3. Автоматической системы дистанционного управления ПМРА–IV, реализованной на устройстве подключения к веб–серверу промышленного Интернета вещей, обеспечивающей интеграцию анализатора в структуру цифрового месторождения.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработана методика оптимизации магнитных систем проточного ПМР–анализатора на основе модели магнита Хальбаха, обеспечивающая уменьшение габаритов и массы и увеличение области однородности магнитного поля;

2. Разработана и экспериментально проверена архитектура релаксометра в составе проточного ПМР–анализатора ПМРА–IV, включающая модернизированные электронные блоки повышенной чувствительности и температурной стабильности;

3. Разработан и реализован автоматический проточный анализатор в режиме внутреннего байпаса с управлением режима измерений и пробоотборным модулем, обеспечивающий представительность пробы при анализе нефти и газоконденсата;

4. Разработаны и экспериментально апробированы методики экспресс–контроля характеристик нефти и газоконденсата месторождений Поволжья и Вьетнама с применением релаксометра ПМР и его интеграцией в структуру промышленного Интернета вещей для дистанционного мониторинга и управления на цифровом месторождении.

Соответствие паспорту специальности

Диссертационная работа соответствует научной специальности 2.2.8 – «Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды». Основные результаты исследования соответствуют следующим пунктам паспорта: 1 – Научное обоснование новых и совершенствование существующих методов, аппаратных средств и технологий контроля, диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды, способствующее повышению надёжности изделий и экологической безопасности

окружающей среды; 3 – Разработка, внедрение, испытания методов и приборов контроля, диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды, способствующих повышению надёжности изделий и экологической безопасности окружающей среды; 4 – Разработка методического, математического, программного, технического, приборного обеспечения для систем технического контроля и диагностирования материалов, изделий, веществ и природной среды, экологического мониторинга природных и техногенных объектов, способствующих увеличению эксплуатационного ресурса изделий и повышению экологической безопасности окружающей среды; 6 – Разработка математических моделей, алгоритмического и программно-технического обеспечения обработки результатов регистрации сигналов в приборах и средствах контроля и диагностики с целью автоматизации контроля и диагностики, подготовки их для внедрения в цифровые информационные технологии; 7 – Автоматизация технологий, приборов контроля и средств диагностирования, способствующая снижению трудоёмкости, увеличению оперативности и достоверности оценки эксплуатационного ресурса изделий, повышению уровня экологической безопасности окружающей среды.

Достоверность полученных результатов диссертации обеспечивается корректной постановкой задач, применением метода разработки схемотехники с использованием прямого цифрового синтеза, использованием современной интегральной элементной базы, согласованностью экспериментальных данных с расчетами и непротиворечивостью фундаментальным основам и результатами других авторов.

Личный вклад автора

Соискателем лично или при участии изготовлена конструкция ПМРА–IV с автоматической системой пробоотбора, схемотехника и конструкция релаксометра ПМР в составе ПМРА–IV с системой термостатирования, которые отражены в статьях и диссертации, под руководством д.т.н., профессора Кашаева Рустама Султанхамитовича.

Реализация и внедрение результатов работы

Результаты работы внедрены в деятельность по разработке проектов и производству на предприятиях ООО «ANAN» и ООО «ТХАНЬ ТАМ» во

Вьетнаме, а также на кафедре «Приборостроения и мехатроники» ФГБОУ ВО «КГЭУ» и используются в учебном процессе. Получены патенты РФ № 2808801 «Магнит»; №2813962 «Способ и устройство для определения скоростей потока (расхода) и концентрации воды в водо–нефтяных смесях»; № 2860172 «Стабилизатор температуры для магнита и образцов с терморегулятором» и три свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Апробация работы

Основные результаты работы представлялись и докладывались на следующих конференциях: International University Scientific Forum Practice Oriented Science: UAE–RUSSIA–INDIA, 2023 г; Международной научно–практической конференции «Мехатроника, автоматика и робототехника», Санкт–Петербург, 2023 г; Международной научной конференции «Теоретические и практические аспекты развития науки в современном мире», Санкт–Петербург, Март 2023 г; Международный научно–исследовательский конкурс «Исследовательская Инициатива», Петрозаводск, 2023 г; Международную научно–техническую конференцию «Технологический суверенитет и цифровая трансформация в энергетике» ТЭФ. Казань, 2024–2025 г; «Всероссийский Аспирантско–магистерский научный семинар». Казань, КГЭУ, 2024 г; Национальные научно–практические конференции «Приборостроение и автоматизированный электропривод в ТЭК и ЖКХ ». Казань, КГЭУ, 2022–2024г; Национальная научно–практическая конференция «Цифровые системы и модели: теория и практика проектирования, разработки и применения». Казань, КГЭУ, 2024 г; Международная молодежная научная конференция «Тинчуринские чтения» «Энергетика и цифровая трансформация». Казань, КГЭУ, 2024 – 2025 г; Международной научно–практической конференции "Инновационные, информационные и коммуникационные технологии" (ИНФО–2024). Сочи, 2024 г; Международная научно–практическая конференция: Механика и машиностроение. Наука и практика – Санкт–Петербург, 2024 г; Всероссийская научно–практическая конференция: Интеллектуальная энергетика. г. Томск, 2024г; Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук». г. Томск, 2025 г; 2025

International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russian Federation, 2025. По результатам получены дипломы и сертификаты конкурсов

Публикации результатов исследования.

По результатам выполненных исследований опубликовано 39 печатных работ, включая 3 статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международных базах данных SCOPUS/WoS (и приравненных к публикациям, входящим в перечень ВАК), 4 статьи в научных изданиях из перечня ВАК (К1, К2) по специальности диссертации, 3 статьи в прочих рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базе данных РИНЦ, 3 патента РФ, 3 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ, 23 публикации в сборниках международных и всероссийских конференций.

Объем и структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка литературы, включающего 137 наименований и 3 приложений. Содержит 183 страницы машинописного текста, 66 рисунков и 6 таблиц.

Благодарности

Автор выражает искреннюю и глубокую благодарность своему научному руководителю – доктору технических наук, профессору Рустем Султанхамитович Кашаев, за внимательное руководство на всех этапах постановки и решения научных задач, а также за ценные замечания и поддержку при решении сложных научных вопросов, возникавших в процессе выполнения диссертационной работы.

Автор также выражает искреннюю благодарность профессорско–преподавательскому составу и сотрудникам кафедры «Приборостроение и мехатроника», в частности заведующему кафедрой, доктору технических наук, доценту Олег Владимирович Козелков, за оказанную помощь, внимание и создание благоприятных условий для обучения и проведения научных исследований.

1. НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ НОВЫХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ БЛОКОВ И ЭЛЕМЕНТОВ СУЩЕСТВУЮЩИХ СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ

В главе рассмотрены научные и методические основы низкополевой ПМР–релаксометрии, выполнен системный анализ факторов, определяющих точность и стабильность измерений при использовании компактных магнитных систем и цифровых ЯМР–спектрометров. Проанализированы особенности формирования ЯМР–сигнала, влияние неоднородности полей B_0 и B_1 , переходных процессов ВЧ–импульсов и параметров резонансных контуров, их влияние на точность определения времен релаксации. Рассмотрены методики измерения T_1 и T_2 , методы повышения отношения С/Ш и цифровой обработки данных. Обоснованы области практического применения ЯМР, прежде всего в нефтяной промышленности, и показана связь релаксационных параметров с ФХС углеводородных систем. На основе проведённого анализа сформулированы ограничения существующих систем и обоснована необходимость модернизации электронных блоков релаксометра и конструкции магнитных систем.

1.1. Параметры низкополевых магнитов

Максимальное магнитное поле для лабораторных релаксометров, достижимое постоянными магнитами в настоящее время составляет $10 \text{ мТ} \div 1 \text{ Т}$, что для протонов ^1H соответствует частотам магнитного резонанса $\nu_0 = 0,425 \div 42,5 \text{ МГц}$. Этот диапазон полей достаточен для анализа физико–химических свойств в технологических процессах на потоке в трубах диаметров 5–50 мм. Увеличение B_0 для повышения отношения сигнал/шум (С/Ш), ведет к росту габаритов и веса магнитов, затрат, а также снижению безопасности персонала.

В связи с этим существует растущий интерес к «низкополевому» ЯМР для контроля нефтехимпродуктов *Constantinesco* [10]. Лабораторные магниты, оперирующие при низких частотах $\nu_0 = 2 \text{ МГц}$ на ^1H предпочтительны для изучения петрофизики скальных нефть содержащих пород и почв *Mitchell* [11, 12].

Постоянные магниты могут быть открытыми к доступу в них или односторонними. Аналогичные магнитные системы были использованы для нефтескважинного каротажа *Allen* [13, 14] с применением малогабаритных постоянных магнитов, при котором датчик получает сигнал от объема пласта вблизи скважины *Allen* [14].

ЯМР инструменты – сложные системы, способные осуществлять такие разные измерения, как: анализ времен релаксации, протонный обмен и получение спектров в ЯМР–спектроскопии. Но это требует опытного оператора, что ограничивает промышленное применение ЯМР. Использование низкополевого ЯМР привело к развитию автоматизированных спектрометров, способных к само калибровке и разработке специализированных релаксометров.

Для мобильных измерительных ЯМР–систем важно выбрать оптимальное поле, габариты и свойства магнита. Продольные T_1 и поперечные T_2 времена релаксации используются как параметры для определения и повышения химической чувствительности в ЯМР–спектроскопии. Тщательный анализ данных особенно важен при низких полях из–за низкого отношения С/Ш.

При низкополевых измерениях подгонка временной зависимости сигнала и его разрешение дает более углубленную идентификацию химических компонент, чем традиционная Фурье–спектроскопия. Использование НП техники дает возможность снизить влияние неоднородности поля магнитов в гетерогенных образцах, например нефтеносных породах, нефтепродуктах или химических катализаторах. В большинстве случаев при применении НП релаксометров используются спины протонов 1H из–за их высокой естественной распространенности и значительного гиромангнитного отношения. Но гетероядерный ЯМР также возможен на ядрах ^{19}F , ^{23}Na , ^{13}C и ^{31}P .

Большее магнитное поле дает большее отношение С/Ш, улучшенное разрешение и меньшее время измерения. Но при промышленной реализации метода ЯМР высокие поля могут препятствовать детектированию ЯМР–сигнала из–за быстрой расфазировки спинового ансамбля *Mitchell* [15]. Поэтому низкополевые магниты являются разумным компромиссом для промышленного

применения в гетерогенных веществах и материалах. К их преимуществам относятся: отсутствие криогеники, сравнительно низкая цена; пониженные требования к безопасности из-за пониженного поля рассеяния магнита (для магнитов Хальбаха), легкость конструкции, включающее возможность открытого доступа к датчику в магните.

К недостаткам НП магнитов относятся пониженная стабильность поля, и температурные изменения в окружающей среде могут приводить к изменениям поля B_0 и сдвигу резонансной частоты ν_0 Лармора. Для этого НПМ обычно термостатируют при температурах выше комнатной (30^0 – 40^0 С). Небольшие температурные сдвиги неизбежны, но есть ряд способов их устранения использованием $NdFeB$ постоянных магнитных блоков *Haishi* [16]. Также может быть установлена система поддержания резонансной частоты с помощью катушек шиммирования на полюсах магнитов. Для данной массы магнита существует обратно-пропорциональная зависимость зазора между полюсами магнита (который определяет объем образца) и напряженностью поля магнита. Зазор может быть увеличен до 50 мм, что, однако, ведет к увеличению веса и габаритов лабораторных релаксометров. К счастью, изучение гетерогенных систем требует поля $B_0 < 100$ мТ ($\nu_0 < 4$ MHz) для увеличения интенсивности сигналов.

НП системы больше подходят для изучения образцов больших объемов, поскольку при низких частотах соленоид РЧ-катушки датчика при малых диаметрах имеет малую индуктивность и его трудно настроить, в то время, как соленоид большого диаметра имеет большую индуктивность и в настройке проще.

Полюсные постоянные магниты формируют обычно из керамического сплава $NdFeB$. Альтернативный вариант –самарий–кобальт ($SmCo$), обладающий меньшей температурной зависимостью. Такие магниты могут иметь конфигурацию цилиндрического магнита Хальбаха (MX) *Raich, Blumler* [17] с полем B_0 вдоль оси z . Образец в таком случае размещается в соленоиде РЧ катушки, которая генерирует поле B_1 вдоль оси y . Можно сконструировать MX, в котором направления поляризации каждого блока немного поворачивается

относительно предыдущего. При бесконечном числе блоков в МХ формируется однородное поле B_0 в направлении, перпендикулярном кольцу магнитов и с нулевым рассеянием поля. Идентичные кольца собираются в стопку для формирования цилиндрического магнита. Хотя идеально однородного поля при конечном числе блоков создать не удастся, тем не менее при тщательно собранной конструкции МХ его однородность близка к однородности магнита на основе дискового магнита.

Общая однородность поля зависит от выбора наиболее идентичных по полю блоков *Raich, Blumler* [17]. Магнит МХ для анализа кернов имеет поле от $B_0 = 50$ мТ ($\nu_0 = 0 - 2$ МГц) до $B_0 = 1$ Т ($\nu_0 = 42,5$ МГц) *Danieli* [18] *Küster* [19].

1.2. Характеристики радиочастотных импульсов в ПМР-методиках

Теоретическое описание спиновой динамики часто базируется на идеальном поведении их ансамбля, где спины испытывают воздействие осциллирующего поля с определенной амплитудой, длительностью и частотой. Однако, такая ситуация не выполняется в реальности и следует рассматривать неидеальные РЧ импульсы. Это особенно важно при низких полях, когда РЧ-импульс содержит мало циклов.

Спиновую систему образца возбуждают 90° -м импульсом (нутационный импульс), после выключения которого поведение M_x или M_y во времени описывается уравнением

$$M_{x,y}(t) = M_0 \exp\left(-\frac{t}{T_2}\right) \quad (1.1)$$

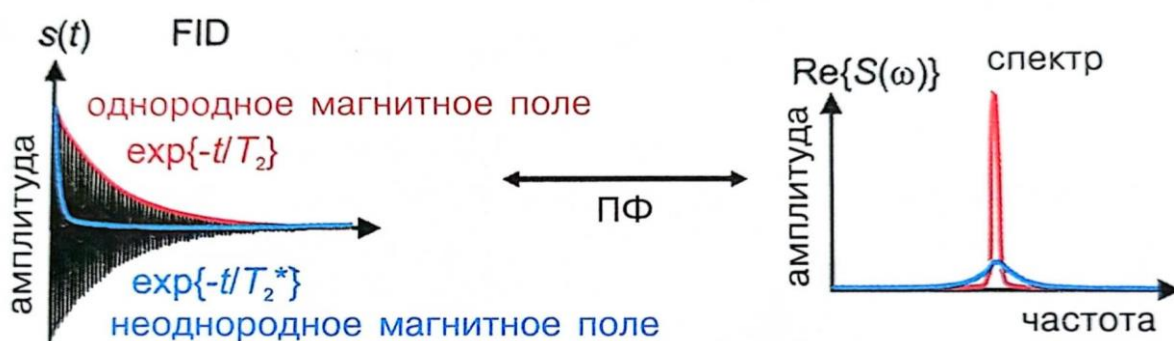


Рисунок 1.1. ССИ и его Фурье-преобразование.

Для спиновой системы, состоящей из магнитно эквивалентных ядер одного сорта, с Ларморовской частотой прецессии спинов: $\omega_L = -\gamma B_0$, и временами релаксации T_2 , спад сигнала свободной индукции (ССИ) (рис.1.1) после 90° -го импульса определяется суперпозицией отдельных экспонент.

В реальной ситуации поле H_0 обладает определенной неоднородностью в объеме образца, в результате чего ССИ происходит быстрее, чем с постоянной времени T_2 . Поэтому определение T_2 по форме ССИ можно осуществить только в том случае, когда есть уверенность, что $T_2^* \gg T_2$, где T_2^* – время, определяющее исчезновение намагниченности в плоскости xy за счет неоднородности поля H_0 в образце. Кроме того, трансляционная самодиффузия молекул образца в неоднородном поле не должна влиять на экспоненциальный спад сигнала свободной индукции. Для измерения T_2 в неоднородном поле H_0 может быть использована последовательность импульсов $90^\circ-t-180^\circ$ (метод спин-эхо (СЭ) Хана, рис.1.2). Изменение амплитуды сигнала СЭ в зависимости от интервала t в описывается прямой, коэффициент наклона которой дает значение T_2 .

$$\ln \frac{A_t}{A_0} = -\frac{2t}{T_2} \quad (1.2)$$

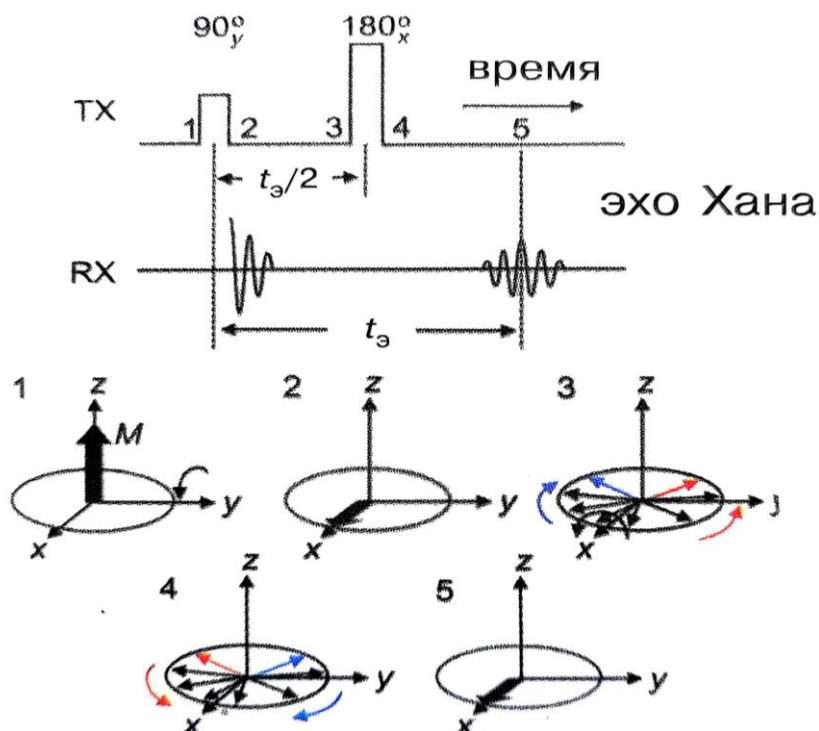


Рисунок 1.2. Эволюция намагниченности в методе Хана

При измерении T_2 каждая новая последовательность $90^\circ-t-180^\circ$ должна подаваться через интервал $T_0 \geq 5T_1$, чтобы перед каждым измерением спиновая система смогла возвратиться в состояние термодинамического равновесия. Метод Хана измерения T_2 позволяет измерять истинное значение T_2 только в том случае, когда за время $2t$ молекулы жидкости не перемещаются из одной области однородности в другую область H_0 , отличающуюся по величине от той, в которой эти молекулы находились в момент включения зондирующего импульса. В противном случае произойдет необратимая потеря фазовой памяти спиновых изохромат и огибающая сигналов спинового эха будет спадать до нуля быстрее по сравнению с ее спадом только от спин–спиновой релаксации.

Спины образца дадут импеданс полностью резистивный, если их угловая частота Лармора ω_L будет равна ω_0 , что не всегда точно достижимо. Более того, спины в пробе (как и в любой резонансной системе) будут иметь свободно–звонящую частоту ω_r , немного отличающуюся от ω_0 . Практически все РЧ импульсы имеют период свободного звона после прекращения действия импульса.

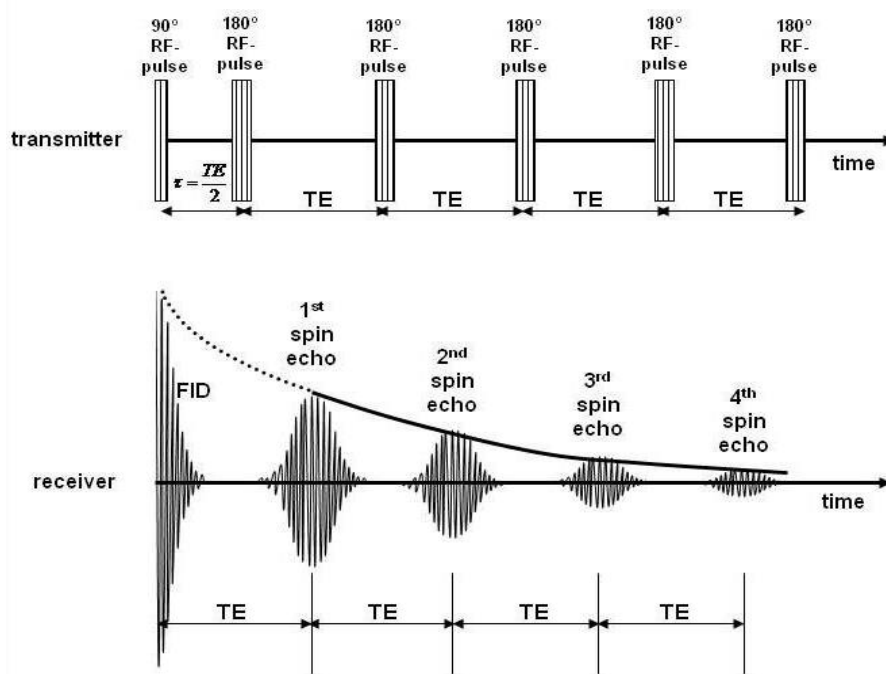


Рисунок 1. 3. Импульсы и формирование ССИ и спин–эхо в методе КПМГ

Последовательность Карра–Парселла–Мейбум–Гилла (КПМГ) [20, 21] (рис.1.3) особенно чувствительна к настройке импульсов *Vold* [22]. Длительности

переходных процессов примерно определяются соотношением $2Q/\omega_0$, отсюда в сильных полях (где типично добротность $Q \cong 100$ и большие ω_0) переходный процесс будет коротким по сравнению с длительностью РЧ импульса и его можно проигнорировать. Однако при низких полях (малых $Q \sim 10$ и ω_0) переходный процесс может быть существенной частью РЧ импульса.

1.3. Спиновая динамика во время переходных процессов в импульсах

Постоянный ток амплитудой I_0 приложенный к РЧ катушке с пробой приводит к воздействию переменного магнитного поля величиной B_1 . Если направить B_1 вдоль оси y (во вращающейся системе координат–ВСК), то спины будут вращаться вокруг оси y на углы $\gamma B_1 t_\omega$ с частотой прецессии $\omega_1 = -\gamma B_1$. Переходный отклик РЧ импульса будет генерировать меняющееся во времени магнитное поле в плоскости xz , и спины будут прецессировать вокруг меняющейся во времени оси. Полный эффект от неидеального РЧ импульса на спиновую динамику окажется сложным. На рис.4 представлен примера РЧ импульса.

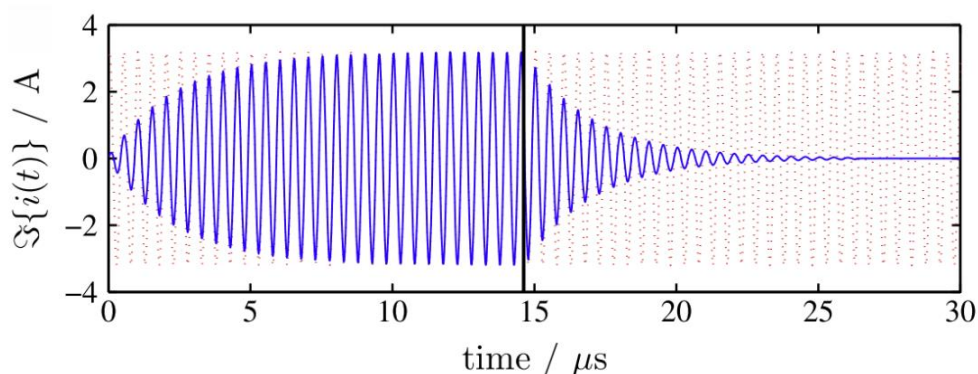


Рисунок 1.4. 90° -й импульс в поле катушки датчика добротностью $Q = 15$, $\omega_L = 2$ МГц с усилителя 500 Вт на катушке сопротивлением 50 Ом.

Переходное поведение намагниченности чувствительно к ошибкам настройки частоты в пробе на величину $\omega_p \sim 10$ кГц относительно частоты ω_L . Малый, но постоянный сдвиг угла фазы B_1 наблюдается в РЧ импульсе, вызванный разностью между управляющей частотой и ω_L . Это изменение фазы

смещает вектор намагниченности от оси x . Хотя они и малы, эти ошибки фазы будут накапливаться в многоимпульсных последовательностях КПМГ. Частота возбуждения обычно устанавливается при значении $\omega_d = \omega_L$, и хотя спины образцов с широкой линией спектра будут прецессировать в диапазоне резонансных частот, возбуждение будет неодинаковым по всему спиновому ансамблю. Поэтому важно, особенно в КПМГ– экспериментах устанавливать ω_d корректно.

Имеют также место осцилляционные биения компонент вектора намагниченности. Упрощенное моделирование не учитывает два связанных свойства: (1) спин–релаксацию с вне–резонансными спиновыми динамиками и (2) переходный отклик РЧ усилителя. В зависимости от времени отклика усилителя, передаваемый импульс может вызывать импульсные переходы. Эмпирически найдено, что улучшенная КПМГ серия получается либо с когерентными импульсами либо с трапецевидными. Низкочастотный датчик (с $\omega_0 < 5$ МГц) может быть улучшен использованием более совершенного РЧ контура *Hoult* [23], в частности –рулонной катушки с изменяемой шириной проводящей ленты. Комбинация пассивных компонентов контуров дает низкие добротности $Q \sim 3$ с С/Ш, характерным для высоких Q . В LCR контуре добротность Q может быть снижена повышением сопротивления катушки R (т.к. $Q = \omega_0 L/R$). Низкая Q контура дает более быстрый переходный отклик, который длится только 2 мкс, что существенно снижает время «параллелизации» после импульса с передатчика, и переходный процесс длится примерно Q циклов радиочастоты. На частоте $\omega_0 = 20$ МГц с $Q = 30$ переходный процесс составляет малую долю РЧ импульса в 2 мкс.

Цифровая фильтрация. В низкополевых экспериментах важно цифровое фильтрование, поскольку его применение позволяет существенно снизить шум и убрать артефакты базовой линии. Цифровая фильтрация позволяет подавлять сигналы от ядер ^{19}F , по частоте близкие к протонным. Детальное описание цифрового фильтрования дано в работе *Moskau* [24].

Процесс обработки аналогового сигнала, детектированного в РЧ датчике включает стадии: аналоговый сигнал усиливается и фильтруется используя

аналоговый электронный фильтр для устранения компонент и гармоник выше предела Найквиста резонансной частоты. Эта стадия фильтрации необходима для предотвращения наложения спектров в АЦП. Далее цифровой сигнал смешивается с \sin и \cos волновыми формами для получения комплексного сигнала. Цифровые умножители, в отличие от аналоговых умножителей, не вносят в сигнал ошибок усиления *Levitt* [25]. Цифровая фильтрация применяется до получения комплексного сигнала. Цифровые фильтры обычно формируются в виде цепочки фильтров, которые включаются с высокой скоростью считывания и применяют соответствующие уровни децимации – (разделения по степеням 10) *Moskau* [24]. Форма фильтра зависит от схемы приемника, но в целом описывается характеристиками, определяемыми конечной стадией фильтрации, которые в большинстве случаев программируемы. Большинство цифровых фильтров конструируются оперирующими на частоте Лармора.

1.4. Способы увеличения отношения сигнал/шум

Низкое поле соответствует низкому С/Ш, хотя *Hoult* [26] аргументирует теоретическое значение С/Ш как зависящее от формы и конструкции РЧ датчика (как при передаче, так и при приеме) и силы статического поля.

Есть несколько шагов, которые могут быть использованы для максимизации С/Ш. По возможности надо применять наиболее сильное магнитное поле. Но есть исключение из этого правила: пористые среды, плотные композиты или системы с поверхностями газ/жидкость/твердое тело формируют внутренние градиенты из-за контраста магнитной проницаемости в разных фазах образца *Mitchell et.al.* [24]. Эти сильные внутренние градиенты пропорциональны B_0 и приводят к быстрому спаду магнитной индукции, что препятствует детектированию сигнала. Поэтому для таких образцов улучшение С/Ш может быть достигнуто при меньших значениях B_0 . Паразитное емкостное взаимодействие между датчиком и образцом может приводить к существенным изменениям в настройке датчика, особенно, если образец электропроводен, например высоко солевой. Контуры с низким Q довольно нечувствительны к изменениям состава образца.

Максимизация коэффициента заполнения катушки, т.е. чувствительного объема, также важна. Из-за цилиндрической формы катушек небольшие уменьшения радиуса приводят к сильным изменениям коэффициента заполнения. Желательно оставлять некоторый зазор между катушкой и образцом в непосредственной близости от обмотки катушки датчика.

Экранирование внешних РЧ источников также важно для повышения С/Ш. В лабораторных магнитных системах внешняя конструкция магнита работает как экран, но не снижает шум, поступающий по силовым кабелям – очевидным путем для РЧ шума и когерентной интерференции. Белый гауссов шум не проблема для экспериментатора: при нем С/Ш может быть улучшен увеличением числа накоплений N_s . Но интерференция, когерентная с приемником, будет суммироваться с той же скоростью, что и сигнал, и не усредняется накоплением. Более того, разделение сигнала и интерференции трудно сделать на стадии анализа. Поэтому надо убрать источники интерференции там, где это только возможно. В лабораторных условиях эти источники могут быть идентифицированы используя сетевой анализатор, настроенный на Ларморову частоту в виде простой измерительной катушки (виток медного провода). Источниками РЧ интерференции являются импульсные источники питания. Важно заземление ЯМР-оборудования, хотя в некоторых случаях это также может быть источником интерференции. Если земля здания особенно электромагнитно «шумная» по радиочастотам, питание оборудования должно быть подключено через изолирующий трансформатор. Аналогично, лабораторные *Ethernet* связи могут быть источниками интерференции и должны быть изолированы беспроводными или оптическими *Ethernet* коммутаторами. Все коаксиальные кабели должны быть экранированы и заземлены только с одного конца (желательно как можно ближе к магнитной системе); такой вид заземления предотвращает образование земляных петель. Другой путь проникновения шумов – температурные датчики на образце. Для измерения при температурах выше окружающей, электронные сенсоры и температурные датчики (термопары и термоэлементы) могут быть заменены температурно нечувствительными

волоконно–оптическими. Желательно и важно располагать их вдали от катушки датчика (предпочтительнее вне её). Заземление труб линий жидкостных потоков во время измерений также важно *Singer et. al.* [27], поскольку при потоке жидкости через полиэтиленовые трубки на них возникает статическое электричество, которое при накоплении может вызвать искру и взрыв.

1.5. Импульсные последовательности и эксперименты

1.5.1. Измерения времен релаксации

Анализ времен продольной T_1 и поперечных T_2 релаксаций – обычная техника используемая в низкополевом ЯМР. Распределения времен релаксации используют для характеристик компонентов жидкости, типа жидкостей и размеров пор.

Продольная релаксация. Восстановление намагниченности спинового ансамбля до равновесия определяется константой экспоненты – временем T_1 . Соответственно, наблюдаемый сигнал (намагниченность) M в момент τ_1 описывается уравнением:

$$A(\tau_C)/A_{eq}(\infty) = 1 - \exp(-\tau_1/T_1) \quad (1.3)$$

Процесс изменения намагниченности типично наблюдается либо через восстановление инверсии, либо методом насыщения *Vold* [28]. Уравнение (1.3) применяется для обоих методов. Восстановление инверсии начинается в спиновом ансамбле вначале ориентированном вдоль оси z , при полном насыщении спинового ансамбля, т.е., при нулевой намагниченности в x – y плоскости. Восстановление инверсии дает двойной динамический диапазон по амплитуде сигналов по сравнению с насыщением, но требует приложения хорошего 180° –го импульса. Кроме того, спиновый ансамбль предварительно должен находиться в равновесии вдоль оси $+z$ до действия инвертирующего импульса. Для гарантии данного условия время повторения цикла t_{RD} между импульсными сканами должно быть длительным и удовлетворять условию $t_{RD} \geq 5T_1$. Насыщения спинового ансамбля легче достичь когда B_0 и B_1 не равны или в образцах с широкими линиями, где насыщение осуществляется намного быстрее ($T_1 > T_2$).

Метод восстановления насыщения не требует длительных t_{RD} поскольку эффективное насыщение достигается независимо от начального состояния спин-системы. Быстрый метод double-shot измерений T_1 описан в *Chandrasekera* [29]. В настоящее время этот метод при низких полях не применяется из-за опоры намагниченности на малый угол наклона РЧ импульса, и поэтому из-за сниженного С/Ш.

Поперечная релаксация Амплитуда наблюдаемого ЯМР сигнала, следующего после 90° -го возбуждающего импульса спадает за время, за которое спиновый ансамбль теряет фазовую когерентность в x - y плоскости из-за локальных флуктуаций магнитных полей, возникающих от дипольных взаимодействий, неоднородностей фоновых магнитных полей и других членов ядерного спинового Гамильтониана. Наблюдаемый ССИ по методу *Hahn* [3] определяется экспоненциальной константой T_2 *Callaghan* [31] по ур.(1.4).

$$1/T_2' = (1/T_2) + \gamma\Delta B_0 \quad (1.4)$$

где ΔB_0 характеризует вариации поля, T_2' связана с полной шириной на половине высоты спектральной линии. Для однородных магнитов с промежуточными полями в жидкости $\Delta B_0 \approx 0$ и, соответственно время $T_2' = T_2$ определяется диполь-дипольными взаимодействиями. Но для низкополевых магнитов с плохой однородностью величина ΔB_0 велика и ССИ характеризуется $T_2' \ll T_2$. Аналогичная ситуация возникает для гетерогенных образцов, таких, как вода или нефть в пористой среде, поскольку неравенство (контраст) магнитной восприимчивости между жидкостью и твердой поверхностью искажает статическое магнитное поле.

Для измерений T_2 в неоднородных полях используются импульсные последовательности Хана [3] и Карра-Парселла-Мейбум-Гилла (КПМГ) [20, 21]. Огибающая максимумов спин-эхо в КПМГ описывается соотношением:

$$A(t_e)/A(0) = \exp(-nt_e/T_2) \quad (1.5)$$

Насыщающая комбинация 90° -м импульсов повторяется n_s раз. Начальная намагниченность M в момент $t_1 = 0$, будет $M(0) = A_{eq}$ или $M(0) = 0$. Спиновый ансамбль восстанавливается вдоль оси z за время t_1 , ансамбль спинов

опрашивается 90° -м возбуждающим импульсом, после чего амплитуда сигнала определяется через ССИ. При средних полях ССИ может быть представлен через Фурье спектр ЯМР. Повторяющиеся 180° -е рефокусирующие РЧ импульсы генерирует последовательность n спин-эхо. ССИ (вторую половину эхо) получают накоплением n 180° -х импульсов и Фурье преобразуют для получения спектра ЯМР. T_2 обратно пропорционально связано с шириной половины максимума ($FWHM$) спектральной линии соотношением:

$$1/T_2 = \gamma \Delta B_0 = \pi FWHM \quad (1.6)$$

Спин-эхо состоящее из двух ССИ «спина к спине» имеет максимум в момент времени $\tau_e = 2\tau_2$. Повторяя 180° -е импульсы, разделенные временем t_e , получается ряд спин-эхо КПМГ [20,21]. Огибающая СЭ описывается уравнением (1.5).

1.6. Области применения низкополевых магнитных систем

1.6.1. Анализ данных

Первые низкополевые (НП) спектрометры были аналоговыми. Качество данных не гарантировало точной обработки данных и экспериментаторы исследовали только амплитуды сигналов. Сейчас эти системы – сложные цифровые, и качественное временное разделение импульсов и цифровая фильтрация позволяет быстро обрабатывать данные.

Предобработка для оптимизации результатов. Существует несколько стадий начальной обработки при НП-эксперименте. Все ЯМР данные содержат фазовый сдвиг. Идеально фаза приемника должна совпадать с фазами резонансных спинов. Однако обычно канал приема сигналов спектрометра вносит малые (постоянные) фазовые сдвиги, которые могут быть отнесены к фильтрам и длине кабеля, и в этом случае говорят о доле сигнала вращающегося в квадрупольном канале. Полный фазовый сдвиг (угол) в радианах – это просто угол данных в комплексной плоскости. Фаза скорректированный сигнал поэтому получается перемножением получаемого сигнала с фазой вращения и эти коррекции могут быть применены к любым данным. В случае ССИ или КПМГ

фазовый угол получается от усреднения первых нескольких точек. Важность фазовой коррекции демонстрируется тем, что: величина КПМГ огибающей содержит ненулевую базовую линию, генерируемую шумом. Применяя фазовую коррекцию и подгонку реального канала средняя базовая линия становится равной 0 (белый Гауссовый шум), что дает при накоплении сигнала точные времена релаксации T_2 .

Когда время релаксации содержит мало компонент (1–3) то наиболее реальный путь подгонки этих данных – прямое среднеквадратичная подгонка к ожидаемой экспоненциальной функции. Альтернативный подход для анализа времен релаксации – экспоненциальная подгонка *Palmer* [32]. Эта подгонка полезна для мониторинга изменений свойств образца, особенно, когда данные неэкспоненциальные, такие как при градиенте поля *Boguszynsk* [33]. Если время релаксации содержит много компонент, лучше подгонять через распределение компонент. Такая ситуация имеет место в каплях эмульсий.

1.6.2. Интерпретация данных времен релаксации

Интерпретация данных времен релаксации часто используется в низкополевом измерении для определения некоторых свойства образца; например для определения поперечных связей в полимерах. В КПМГ огибающая подгоняется также для получения интенсивности сигнала, которая определяет (независимо от релаксации) число спинов, и поэтому интерпретируется, например, как объем жидкости. Количественные данные получают сравнением с интенсивностью калиброванного сигнала.

Распределение времен релаксации полезно когда С/Ш слабый. Если жидкость в контакте с твердой поверхностью, то спины в молекулах, адсорбированных на поверхности испытывают релаксацию из-за ограниченной молекулярной подвижности *Liu* [34]. В приближении быстрой диффузии спины хорошо перемешаны, наблюдаемое время релаксации будет:

$$\frac{1}{T_{1,2}} = \frac{1}{T_{1,2,bulk}} + \frac{1}{T_{1,2,soft}} \quad (1.7)$$

где $T_{1,2,bulk}$ – времена протонов объемной жидкости, а для спинов на поверхности $T_{1,2,suft} = \frac{1}{\rho_{1,2}} \times \frac{V}{S}$ где $\rho_{1,2}$ – поверхностный термин релаксивности, и S/V – отношение поверхности к объему. Для многих образцов вклад объемной релаксации в ур. (1.7) пренебрежим по сравнению с членом поверхностной релаксации и может быть проигнорирован.

1.6.3. ЯМР–каротаж

Низкополевой ЯМР играет две важные роли в добыче нефти и газа: скважинный каротаж дает доступ к “резервуар–размер” измерениям в жидких формациях, а лабораторные инструменты используются для проверки кернов пород взятых из нефтеносного пласта. Интерпретации ЯМР–каротажа поддерживаются лабораторными исследованиями, которые дают информацию о характеристиках жидкостей, свойствах пород и формируют базу для внедрения новых методов восстановления нефтеотдачи перед односкважинными пилотными экспериментами

Наиболее успешным коммерческим применением ЯМР *ex situ* является каротаж скважин в нефтяной промышленности [35,36].

Скважинный каротаж используется в трех случаях:

– *Использование.* Новая скважина (обычно необорудованная) будет подвергнута каротажу для определяя типа формации, содержания жидкости и физических свойств породы (пористости, проницаемости) в зависимости от глубины скважины. Эти параметры будут использованы *Mitchell* [11] для определения коммерческой выгоды добычи продукции скважины и дает оценки ее объема. Керны породы исследуются в лаборатории для получения дополнительной информации, которая недоступна при каротаже и подтверждают данные, полученные в ходе движения датчика в скважине.

– *Пилотирование.* Это относительно новая концепция, когда отдельная скважина при восстановлении нефтеотдачи предоставляет быстрый, дешевый метод по внедрению новых методов восстановления нефтеносности. Факторы

нефтевосстановления измеренные методом ЯМР показали, что они совпадают с методом когерентной диэлектрики и с обычными [37, 38] химическими тестами.

– *Мониторинг*. Скважина используется для мониторинга транспорта нефти и газа через формацию для оценки полных продуктивных объемов и времени жизни резервуара. Данные получаются из времен T_2 методом КПМГ [39, 40]. Распределение T_2 имеет потенциал для получения информации, касающейся как жидкости, так и породы. Полная интегральная область под распределением пропорциональна пористости формации, что особенно ценно, поскольку пористость, получаемая из ЯМР не зависит от литологии пород и параметров [41], которые влияют на другие методы каротажа. Обычно анализируют T_2 позиционируя т.н. T_2 cut-offs через распределение для разделения областей воды, капиллярно связанной с породой *Straley* [42] и мобильной воды, которая относится к пористости, в которой возможна диффузия (воды, нефти, газа) *Straley* [43].

1.6.4. Характеризация углеводородов

Разделение сигналов нефти и воды в объемных жидких образцах является простым и возможно из одномерных распределений времени релаксации [44–46]. Рассмотрим вопрос идентификации компонент сырой нефти используя диффузию *Freed* [45] или релаксацию *Freed* [46]. Рассмотрим смесь алканов сырой нефти, где n -й алкан имеет длину (число атомов углерода) $N_n > 2$. Коэффициент диффузии n -го алкана по *Stokes*:

$$D = X \bar{N}^{-\Xi} N_n^{-\zeta} \quad (1.8)$$

При комнатных условиях, смеси алканов будут описываться ур.(1.8) с эмпирически определенным пре-фактором $X = 3,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$ и показателями $\Xi \approx 1,73$ и $\zeta \approx 0,7$. Если распределение коэффициентов диффузии было определено, то компонент D_n будет ассоциироваться с алканом с длиной цепочки:

$$N_n = X^{\frac{1}{\Xi+\zeta}} \left\langle D^{\frac{1}{\zeta}} \right\rangle^{\frac{\Xi}{\Xi+\zeta}} D_n^{-\frac{1}{\zeta}} \quad (1.9)$$

где $D^{1/\zeta}$ – это $(1/\zeta)$ -й момент измеренного распределения

$$f(\log_{10} N) = \xi f(\log_{10} D) \text{ так что } \left\langle D^{\frac{1}{\xi}} \right\rangle \equiv \int d \log_{10} D f(\log_{10} D) D^{\frac{1}{\xi}} \quad (1.10)$$

Распределение длин цепей алканов получается из распределения коэффициентов диффузии просто из выражения:

$$f(\log_{10} N) = \xi f(\log_{10} D) \quad (1.11)$$

Также существует приближительный закон масштабирования для скоростей продольной и поперечной релаксации. Допуская, что вязкость $\eta < 100$ сР (основанная на том, что частоты движений в легких нефтях >100 МГц так что T_1 и T_2 частотно независимы при низких полях) тогда по *Freed* [47] имеем;

$$T_{2,n} = Y \bar{N}^{-\Upsilon} N_n^{-\nu} \quad (1.12)$$

При эмпирическом префакторе $Y = 672$ с и значениях показателей экспонент $\Upsilon = 1,25$ и $\nu = 1,24$ Van der Tuuk [48] распределение времен релаксации будет иметь компоненты $T_{2,n}$ ассоциированные с длинами цепочек алканов

$$N_n = Y^{\frac{1}{\Upsilon+\nu}} \left\langle T_2^{\frac{1}{\nu}} \right\rangle^{\frac{\Upsilon}{\Upsilon+\nu}} T_{2,n}^{-\frac{1}{\nu}} \quad (1.13)$$

$$\text{Где: } \left\langle T_2^{\frac{1}{\nu}} \right\rangle = \int d \log_{10} T_2 f(\log_{10} T_2) T_2^{\frac{1}{\nu}} \quad (1.14)$$

$$\text{с их распределением: } f(\log_{10} N) = \nu f(\log_{10} T_2) \quad (1.15)$$

Пре-факторы в уравнениях зависят от давления и температуры. Хотя сырая нефть содержит сложные смеси органических молекул (ненасыщенных, разветвленных или циклических), правила масштабирования применимы и к легким нефтям. Объединенный обзор представлен в *Freed, Hurliman* [49]. *Chen et al.* [50] нашли, что T_2 лучше коррелирует с плотностью, чем вязкость в тяжелых нефтях. В другой работе был использован многовариантный анализ для проведения надежного предсказания вязкости нефти на основе времен T_2 в широком диапазоне молекулярных масс или тяжелых компонент, таких как асфальтены и смолы, что будет усложнять анализ. Изучение асфальтенов в низких полях представлено в работе *Zielinski* [51]. Релаксация и диффузия в тяжелых нефтях представлены в работах *LaTorraca* и *Honorato* [52, 53] и в

эмульгированных сырых нефтях для определения их стабильности, седиментации и коалесценции *Van der Tuuk* [54]. Мы отметим, что хотя наша дискуссия была сфокусирована на легких нефтях, есть много примеров в литературе по низким полям о применении НП ЯМР к необычным тяжелым нефтям, как битумы *Wen* [55, 56] и [57–59].

1.7. Эксперименты и анализ

Эксперименты, рутинные в высоких полях, такие, как nD -спектроскопические корреляции, картирование скоростей, возможно будут наблюдаемы и при низких полях. Лабораторные приборы на частоту $\nu_0 = 45\text{--}60$ МГц с хорошим разрешением позволяют мониторить потоки и реакции. Эти приборы были использованы для контроля реакций используя ЯМР, ближнюю ИК и Раман спектроскопию *Nordon / Vargas* [60–62].

Можно ожидать, что следующие существенные усовершенствования НП-систем будут в обработке данных. Два примера: 1. *Bayesian* анализ, использующий предварительные знания о системе и модели данных для предсказаний наиболее вероятных параметров до процесса измерений или при зашумленных данных. 2. Сжатая чувствительность (СЧ) – модификация *Fourier* преобразования, извлекающего выгоду из того факта, что ЯМР данные, трансформированные в некоторую другую форму обычно редко встречаются.

1.8. Выводы по главе 1 и постановка задачи

Последние возможности полностью цифровых спектрометров позволяют проводить сложные эксперименты на постоянных магнитах, что сильно увеличило область их промышленных применений с использованием лабораторных приборов. Цифровая фильтрация – последнее дополнение к низкополевой технике ЯМР, позволяющая добиться снижения шумов. Развивается стратегия максимализации *С/Ш*. Предобработка для усовершенствования анализа данных и интерпретации временной подгонки спектроскопических данных, является более перспективной, чем обычное Фурье-преобразование в промежуточных полях.

Много достижений в низкополевом ЯМР были стимулированы нефтяным каротажем и анализом кернов, и видны еще много достижений в этой области промышленности.

Увеличение поля B_0 спектрометров и релаксометров для повышения отношения С/Ш ведет к росту габаритов и веса магнитов. В связи с этим существует растущий интерес к «низкополевому» ЯМР на основе НП магнитов Хальбаха для контроля нефти и нефтехимпродуктов. Но в пористых средах или системах с поверхностями газ/жидкость/твердое тело формируются внутренние градиенты из-за контраста магнитной проницаемости в разных фазах образца. Эти градиенты пропорциональны B_0 , и поэтому более высокие поля будут создавать большие неоднородности статического B_0 , что приводит к быстрому спаду магнитной индукции и «мертвое» время датчика, что препятствует детектированию сигнала.

НП магнитные системы больше подходят для изучения образцов больших объемов (т.е. диаметров катушки, достаточных для её заполнения вязкими и полутвердыми образцами и тяжелыми нефтями, классифицированными как битумы), поскольку соленоид большого диаметра имеет большую индуктивность и проще в настройке. Магниты до сих пор ограничены температурным сдвигом, приводящим к большим изменениям поля B_0 (порядка 100 ppm) за несколько часов. Небольшие уменьшения радиуса приводят к сильным изменениям коэффициента заполнения и желательно оставить некоторое пространство между катушкой и образцом как локальные B_1 вблизи обмотки катушки датчика.

Значения T_2 лучше коррелируют с плотностью, чем с вязкостью в тяжелых нефтях. Спины в молекулах, адсорбированные на поверхности (например ядра структурных единиц SSE) испытывают укороченную релаксацию T_2 из-за ограниченной молекулярной подвижности. Данные получают из времен T_2 методом КПМГ. В методике КПМГ огибающая используется также для получения интенсивности сигнала, которая определяет число спинов

В настоящее время диапазон полей НМ магнитов достаточен для мониторинга химико-технологических процессов в трубах диаметров 5–50 мм.

2. РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЯ МАГНИТА ХАЛЬБАХА ДЛЯ РЕЛАКСОМЕТРА И ПМР–АНАЛИЗАТОРА, СРЕДСТВО КОНТРОЛЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ, СХЕМОТЕХНИКА ЭЛЕКТРОННЫХ БЛОКОВ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ РЕЛАКСОМЕТРА

2.1. Магнит для ПМР–релаксометра в составе анализатора ПМРА–IV

Одним из наиболее сложных и важных элементов ПМР–анализатора и ПМР–релаксометра является магнит, в котором размещается датчик с ВЧ–катушкой. Магнит характеризуется индукцией магнитного поля и её однородностью в магнитном зазоре, определяющие измерительную погрешность [63, 64]. В НП релаксометрах магнитная система формируется из постоянных магнитов, изготовленных из сплавов $NdFeB$, которые обеспечивают создание магнитного поля существенно большей величины по сравнению с традиционными магнитами, выполненными из твёрдых магнитных сплавов, которые оказываются чрезмерно тяжёлыми для портативных релаксометров [65].

Новая магнитная структура – магнитная сборка Халбаха (МСХ), разработанная на основе большого числа идентичных постоянных магнитов, расположенных по определённым правилам с целью повышения плотности потока магнитного поля, была предложена *Klaus Halbach* [66] (рис. 2.1а).

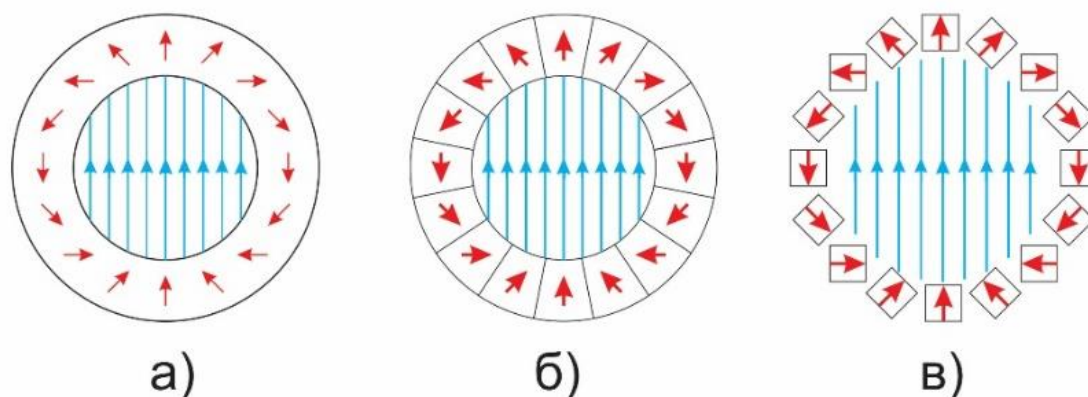


Рисунок 2.1. Модель структуры МСХ

а) идеальная модель; б), в) модели МСХ, собранные из идентичных магнитов

На основе данного принципа другие конструкции МСХ были предложены

[67–71], в которых используются идентичные дискретные магниты различной формы (квадратной, круглой, шестиугольной) (рис. 2.1б, в). Эти конструкции получили широкое применение при создании магнитных систем ПМР–релаксометров и анализаторов. МСХ обладают рядом преимуществ, таких как малые габаритные размеры и масса при высокой плотности магнитного поля в зазоре между двумя полюсами, низкий уровень рассеяния магнитного поля во внешнее пространство. Они применяются в конструкции различных устройств для экспресс–контроля состава жидкостей, полимеров и твёрдых тел (*Anferjva, Hanspeter, Blümich*, Свинин, Кашаев, Темников) [67–72].

В идеальной структуре МСХ (рис. 2.1а) плотность стационарного магнитного поля в центре структуры описывается выражением:

$$B_0 = B_r \frac{r_{\text{внеш}}}{r_{\text{внут}}} \quad (2.1)$$

где: B_r – остаточная намагниченность используемого магнитного материала; $r_{\text{внеш}}$ и $r_{\text{внут}}$ – внешний и внутренний радиусы структуры МСХ.

Однако на практике создание идеальной МСХ является невозможным из–за необходимости набора бесконечного из множества магнитных элементов одинаковых геометрических размеров. Плотность магнитного поля этих элементов должна быть полностью идентичной, что также недостижимо даже в случае одной производственной партии. Вследствие этого неоднородность магнитного поля в МСХ, как правило, оказывается достаточно высокой, если не проведена оптимизация числа магнитных элементов и условий их установки.

Техническая цель, поставленная в данной диссертации, заключается в проектировании и разработке МСХ, обеспечивающей компромисс между стоимостью, габаритами и массой при достижении высокой плотности и однородности магнитного поля внутри рабочего зазора. Магнитное цилиндрическое внутреннее пространство, предназначенное для размещения в нем ПМР–датчика и других вспомогательных устройств, должно иметь диаметр не менее 30 мм, необходимый для установки в нем либо ампул с образцами, либо трубки для протока жидкости.

МСХ, как правило, формируется из числа $n \geq 4$ одинаковых постоянных магнитов, расположенных по окружности, с целью аппроксимации формы и распределения направления намагниченности идеальной структуры МСХ. В зависимости от количества n магнитных элементов направление намагниченности каждого магнита определяется углами α_i и β_i (рис. 2.2).

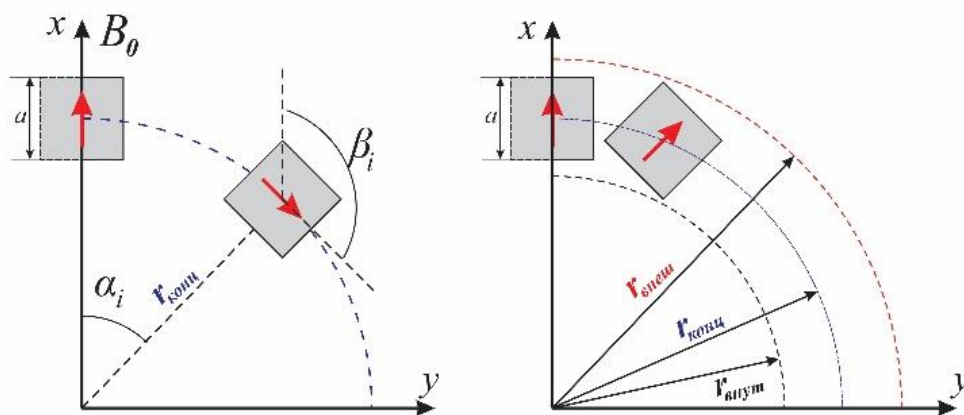


Рисунок 2. 2. Конструктивные особенности структуры МСХ

Для i -го магнита значения этих углов задаются следующими выражениями:

$$\alpha_i = \frac{2\pi * i}{n} \quad (2.2)$$

$$\beta_i = 2\alpha_i \quad (2.3)$$

Данные n магнитов лишь аппроксимируют кольцевую форму, и в структуре МСХ значения внутреннего и внешнего радиусов, входящих в формулу (2.1), определяются соотношениями:

$$r_{\text{внеш}} = r_{\text{конц}} * (1 + \sqrt{2} * \Xi(n)) \quad (2.4)$$

$$r_{\text{внут}} = r_{\text{конц}} * (1 - \sqrt{2} * \Xi(n)) \quad (2.5)$$

$$\text{где: } \Xi(n) = \frac{\cos\left(\frac{2\pi}{n}\right) - \sin\left(\frac{2\pi}{n}\right) - \sqrt{2} * \sin\left(\frac{\pi}{4} - \frac{4\pi}{n}\right)}{2\cos\left(\frac{\pi}{4} - \frac{4\pi}{n}\right) + \sqrt{2}} \quad (2.6)$$

Радиус окружности, проходящей через центры элементов будет:

$$r_{\text{конц}} = \frac{r_{\text{внут}} + r_{\text{внеш}}}{2} \quad (2.7)$$

Для увеличения плотности магнитного поля в рабочем пространстве МСХ магнитные элементы должны располагаться как можно ближе друг к другу.

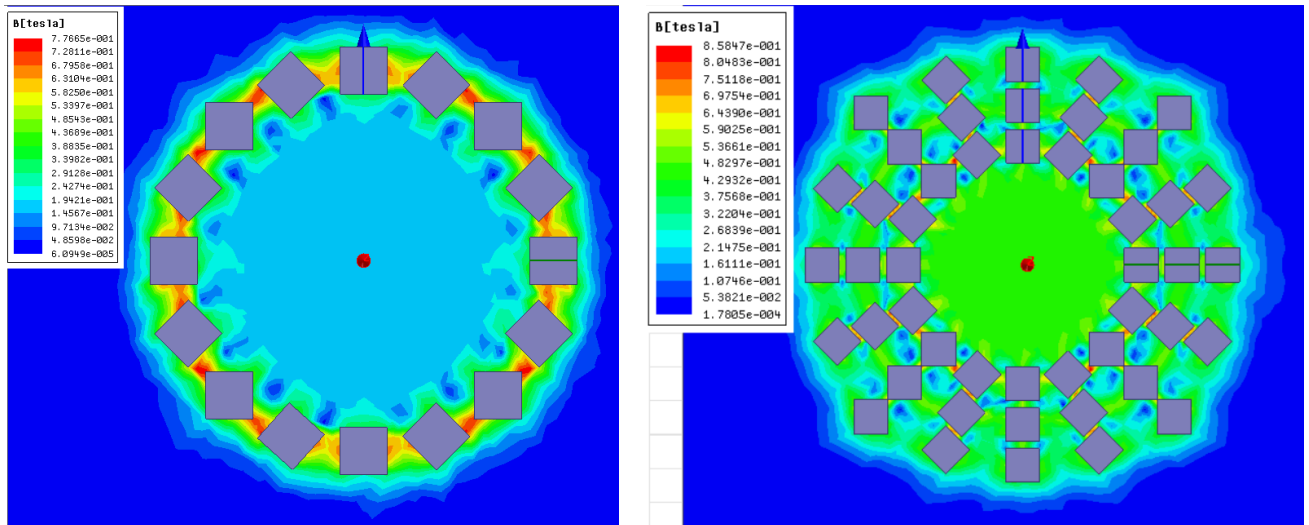


Рисунок 2. 3. Моделирование структуры однокольцевого и трехкольцевого коаксиального биполярного МСХ в *ANSYS Maxwell*.

Для повышения плотности магнитного поля было выполнено моделирование структуры МСХ в программном пакете *ANSYS Maxwell*, что позволило добиться существенного увеличения плотности магнитного поля (рис. 2.3). Расположение нескольких слоев МСХ также обеспечивает значительное повышение плотности магнитного поля и его однородности. Однако для сохранения приемлемых габаритных размеров и массы необходимо рассчитать оптимальную высоту конструкции из нескольких слоёв МСХ, в первую очередь распределение плотности магнитного поля МСХ вдоль вертикальной оси z . Значение плотности магнитного поля в рабочем объеме вдоль z определяется выражением:

$$B_{xy}(z) = \frac{r_{\text{конц}}^5}{\left(r_{\text{конц}}^2 + (z - z_0)^2\right)^{\frac{5}{2}}} B_{xy}(0) \quad (2.8)$$

где: z – высота многослойного МСХ, измеренная от центра.

В многослойной структуре МСХ плотность магнитного поля достигает максимального значения в центре конструкции и постепенно уменьшается в обе стороны вдоль вертикальной оси z . Для определения высоты L многослойной

структуры МСХ уравнение (2.8) интегрируется в пределах $z_0 = \pm L/2$. В этом случае коэффициент ослабления f_L магнитного поля в центре магнита при $z = 0$ определяется следующим выражением:

$$f_L = \int_{-L/2}^{L/2} B_{xy}(z=0, z_0) = \frac{L(L^2 - 6r_{\text{конц}}^2)}{(L^2 + 4r_{\text{конц}}^2)^{3/2}} \quad (2.9)$$

В центре структуры $f_L = 0$. Таким образом, оптимальная высота многослойной структуры МСХ определяется по формуле:

$$L = r_{\text{конц}} * \sqrt{6} \quad (2.10)$$

Размещение прокладок между слоями МСХ позволяет существенно улучшить однородность магнитного поля вдоль z [100]. Размер прокладки между двумя слоями МСХ определяется суммарной плотностью магнитного поля в центре B_{xy}^{Σ} , создаваемой двумя слоями, расположенными на расстоянии d друг от друга. Плотность магнитного поля B_{xy}^{Σ} в центральной точке между двумя слоями МСХ определяется следующим выражением:

$$B_{xy}^{\Sigma}(0,0,z) = \frac{r_{\text{конц}}^5}{\left(r_{\text{конц}}^2 + \left(z + \frac{d}{2}\right)^2\right)^{5/2}} B_{xy}(0,0,0) + \frac{r_{\text{конц}}^5}{\left(r_{\text{конц}}^2 + \left(z - \frac{d}{2}\right)^2\right)^{5/2}} B_{xy}(0,0,0) \quad (2.11)$$

Для достижения наилучшей однородности магнитного поля вторая производная функции плотности магнитного поля B_{xy}^{Σ} должна быть равна нулю при

$z = 0$, т.е. определяться из следующим выражением:

$$\frac{\partial(B_{xy}^{\Sigma})^2}{\partial z^2} = 5r_{\text{конц}}^2 B_{xy} \left[\frac{6\left(z + \frac{d}{2}\right) - r_{\text{конц}}^2}{\left(r_{\text{конц}}^2 + \left(z + \frac{d}{2}\right)^2\right)^{9/2}} + \frac{6\left(z - \frac{d}{2}\right) - r_{\text{конц}}^2}{\left(r_{\text{конц}}^2 + \left(z - \frac{d}{2}\right)^2\right)^{9/2}} \right] = 0 \quad (2.12)$$

Значения L и d позволяют определить количество слоёв МСХ, а также оптимальные габаритные размеры и массу всей многослойной структуры МСХ при сохранении максимальной однородности магнитного поля в рабочем зазоре. На основе расчёта оптимальных параметров магнита в качестве окончательного

варианта была выбрана конструкция магнита, состоящая из 10 слоёв МСХ, при этом каждый слой МСХ включает три коаксиальных кольца с 16 магнитными элементами *NdFeB* марки *N35* размером $10 \times 10 \times 10$ мм в каждом кольце. Данная конструкция была принята взамен исходного варианта МСХ, состоявшего из 10 слоёв [63]. Магнитные элементы расположены в соответствии с правилами, обеспечивающими формирование однородного и интенсивного поперечного магнитного поля внутри магнитной сборки, что позволяет размещать радиочастотные катушки ПМР–релаксометра внутри магнитной системы [73].

Каркас для размещения магнитных элементов, а также прокладки между слоями кольцевых магнитных структур в экспериментальном образце были спроектированы с использованием программного обеспечения *Solid Works*. Данный специализированный программный комплекс обеспечивает возможность точного трёхмерного проектирования деталей, предназначенных для последующего изготовления методом *3D*–печати и лазерной резки с высокой точностью (рис. 2.4).

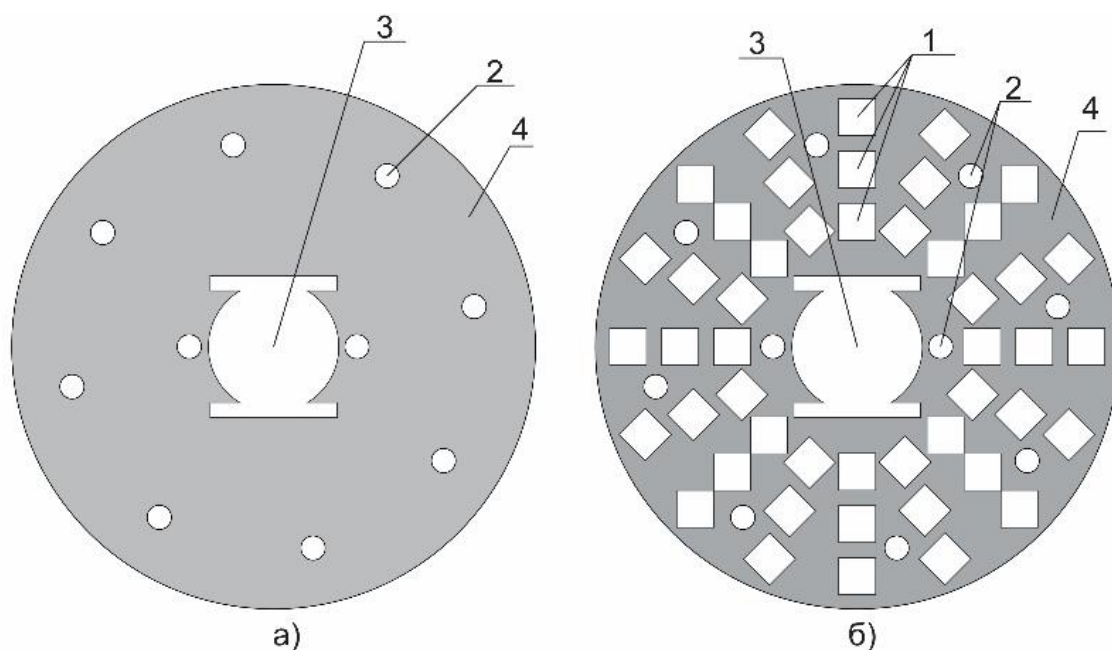


Рисунок 2. 4. Конструкция каркаса и прокладок для МСХ

а) прокладка между слоями МСХ; б) каркас для магнитов в слоях МСХ. 1 – отверстия для установки магнитов; 2 – отверстия для установки соединительных винтов между слоями; 3 – центральный зазор МСХ с двумя пазами для установки полос из мягкого железа с высокой магнитной проницаемостью; 4 – каркас.

В качестве материала для изготовления каркаса для установки магнитных элементов, а также прокладок между слоями МСХ, было выбрано акриловое стекло. Данный материал обеспечивает простоту обработки с использованием лазерной резки, и при этом обладает достаточной механической прочностью, низким коэффициентом теплового расширения и невысокой стоимостью. Каркас выполнен с квадратными отверстиями (1) для установки магнитов, восемью отверстиями для соединительных винтов между слоями и двумя отверстиями для соединения слоёв МСХ. В центральном зазоре каркаса предусмотрены два узких паза размером 35×4 мм для размещения пластин из мягкого железа с высокой магнитной проницаемостью, предназначенных для улучшения однородности магнитного поля в рабочем зазоре.

Для снижения погрешностей в процессе изготовления каркаса магнита из акрилового стекла две пластины толщиной 5 мм были склеены между собой, что позволило уменьшить отклонения при лазерной резке в продольном направлении. Прокладка имеет конструкцию, аналогичную каркасу, но без квадратных отверстий для магнитов. Магнит с 10 слоями МСХ формируется путём осевого складывания слоёв с размещением прокладок между соседними слоями МСХ (рис. 2.5).

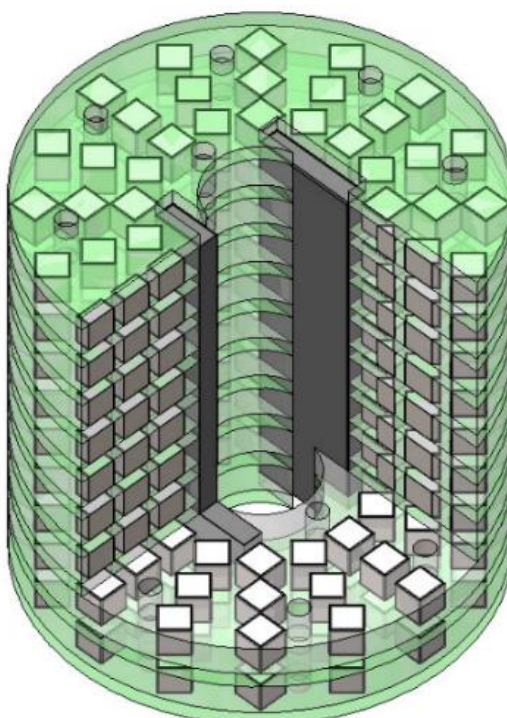


Рисунок 2. 5. Магнит МСХ с 10 слоями, уложенными в осевом направлении

Результаты проведённых экспериментальных исследований показали, что толщина центральной прокладки составляет 5 мм, тогда как толщина остальных прокладок равна 3 мм. Кроме того, для устранения влияния ослабления магнитного поля в верхней и нижней частях МСХ сверху и снизу были размещены три слоя МСХ без прокладок. В качестве пассивного средства повышения однородности магнитного поля использовались пластины из кремнистой стали с высокой магнитной проницаемостью ($\mu_0 = 8000-10000$), разрезанные на элементы размером 120×35 мм, при этом поверхности реза были тщательно отшлифованы для устранения возможных дефектов. Пластины кремнистой стали были плотно соединены между собой по аналогии с сердечником трансформатора и установлены в предварительно подготовленные пазы каркаса.

Слои МСХ и прокладки между ними были жёстко зафиксированы с использованием латунных резьбовых стержней, что позволило исключить возможность магнитных возмущений и образования зазоров между слоями. После завершения сборки многослойная магнитная сборка Халбаха имеет габаритные размеры (длина \times ширина \times высота) $14 \times 14 \times 12$ см и массу 4,5 кг.



Рисунок 2. 6. Неоднородность магнитного поля в рабочем зазоре МСХ вдоль оси z (вертикальное направление)

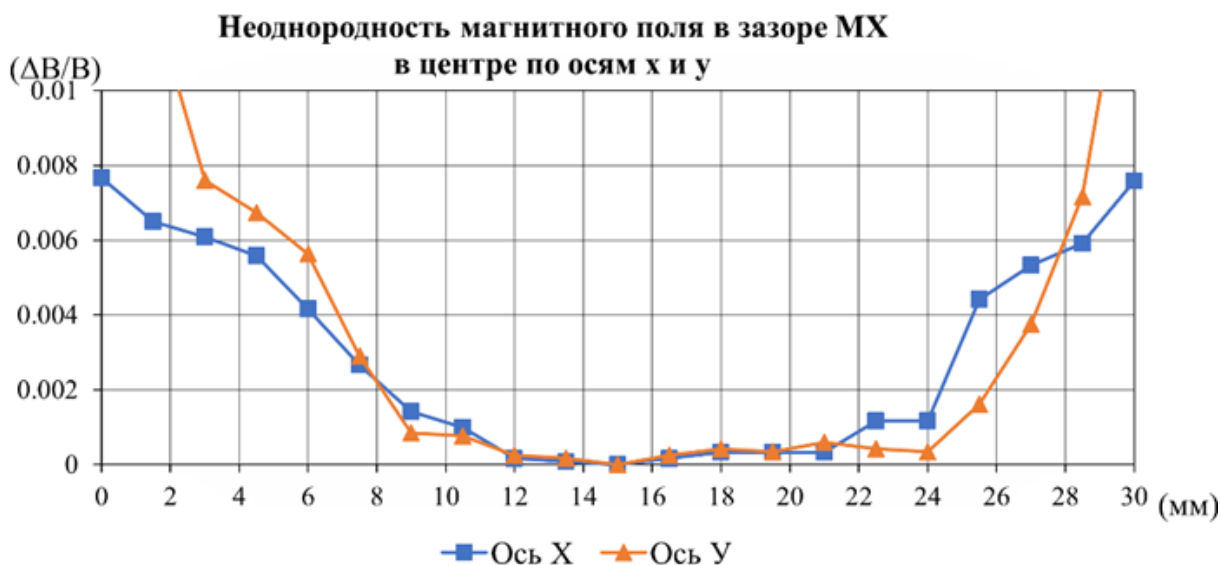


Рисунок 2. 7. Неоднородность магнитного поля в рабочем зазоре МСХ вдоль осей x и y

По результатам измерений магнитного поля вдоль оси z в центре рабочего зазора получено значение индукции магнитного поля $B_0 = 0,3068$ Тл, что соответствует резонансной частоте ядер водорода 1H , равной $\nu_0 = 13,036$ МГц. При использовании описанных выше решений по улучшению однородности магнитного поля достигнута однородность $\Delta B/B_0 = 1500$ ppm в объёме $1,6 \times 1,6 \times 2,0 = 5,12$ см³ (рис. 2.6 и 2.7) или $\Delta B/B_0 = 260$ ppm/см³.

Очевидно, что разработанная многослойная магнитная сборка Халбаха обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционными дипольными магнитами, а также с другими магнитными структурами, основанными на МСХ.

2.2. Цифровой измеритель индукции магнитного поля

Для измерения магнитного поля в рабочем зазоре МСХ был разработан и изготовлен цифровой измеритель магнитного поля с использованием линейный датчик магнитного поля, основанный на эффекте Холла. Типичным представителем таких датчиков является датчик *SS49E (AN49SE)*. Однако этот датчик имеет диапазон измерений всего от 0 до 0,125 Тл, что не позволяет использовать его для измерения магнитного поля в МСХ с более высокими значениями магнитной индукции.

В настоящей работе используется линейный датчик Холла, интегрированный в микросхему *AD22151YRZ*. Выходной сигнал датчика представляет собой напряжение, пропорциональное величине магнитного поля, приложенного перпендикулярно к верхней поверхности корпуса микросхемы. Преобразователь может быть сконфигурирован таким образом, чтобы обеспечивать заданный коэффициент усиления сигнала в соответствии с требованиями конкретного применения. Выходное напряжение может быть настроено для работы как в полностью биполярном (обратимом), так и в полностью униполярном режиме измерения магнитного поля. При входном напряжении питания 5 В и коэффициенте преобразования выходного сигнала датчика, равном 0,4 мВ/Тл, максимальный диапазон измерений достигает 0 –1,25 Тл.

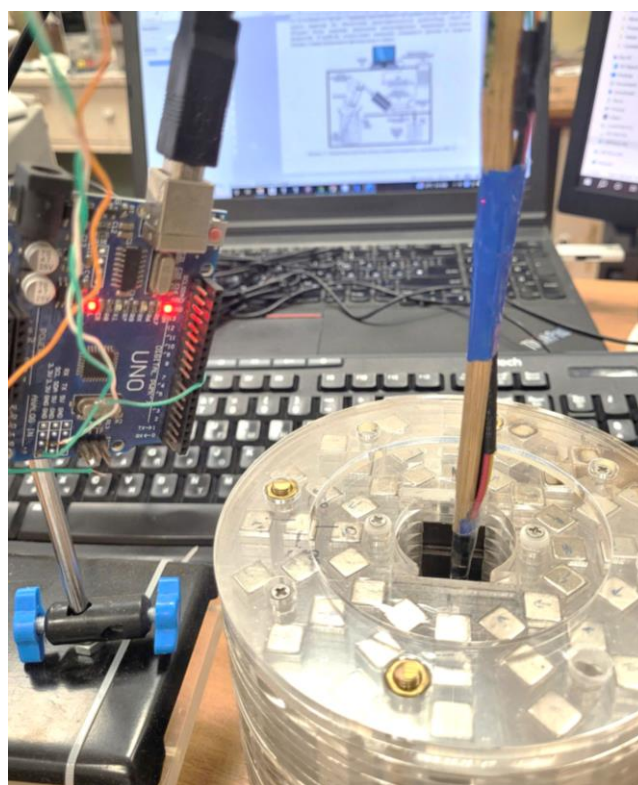


Рисунок 2. 8. Общий вид датчика и методика его использования для измерений

Программное обеспечение для считывания значений магнитного поля с датчика *AD22151YRZ* реализовано с использованием микроконтроллерной платформы *Arduino Uno/Nano*. Микроконтроллер *ATMega328*, применяемый в *Arduino Uno/Nano*, оснащён 10–разрядным аналого–цифровым преобразователем с

частотой считывания до 10 Кбит/с. Измерительный зонд и плата *Arduino* закреплены на регулируемом по высоте штативе рис. 2.8. Полученные данные обрабатываются и отображаются на экране персонального компьютера посредством *USB*-соединения.

Продольное распределение значений B_0 многослойной магнитной сборки Халбаха представлено на рис. 2.9.

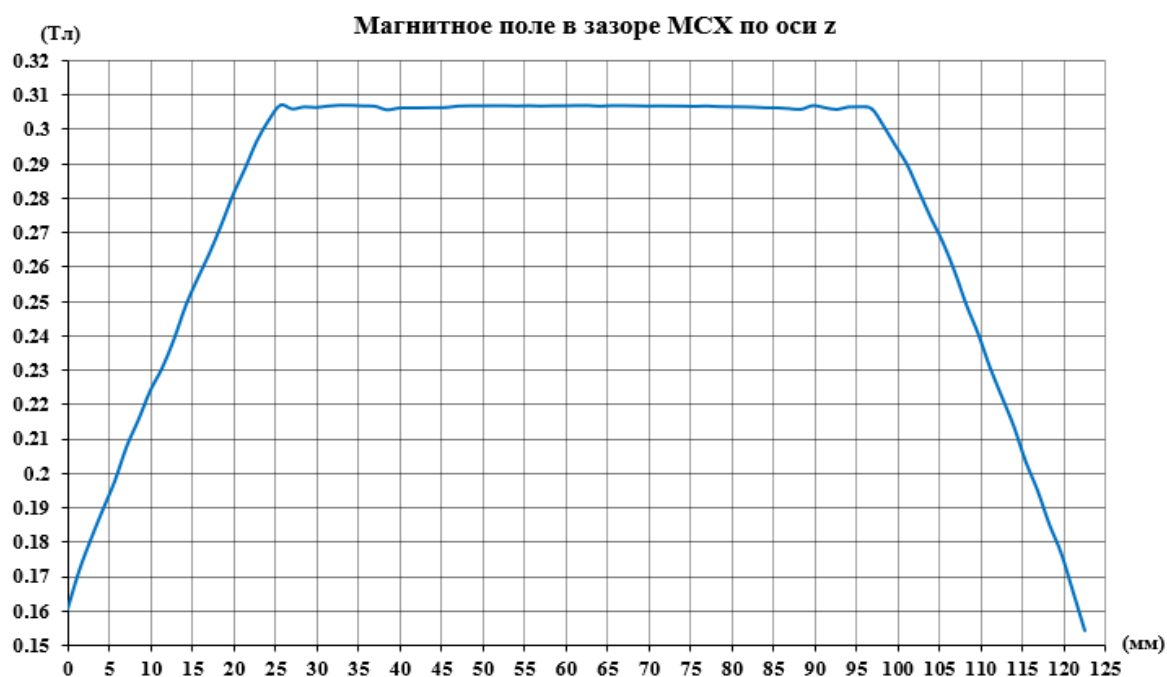


Рисунок 2. 9. Результаты измерения магнитного поля вдоль оси z (вертикальное направление) в центре магнита

2.3. Разработка и испытания электронных блоков ПМР–релаксометра

2.3.1. Метод прямого цифрового синтеза и генератор сигналов для портативного ПМР–релаксометра

Одним из ключевых требований в промышленных приложениях является возможность точного формирования, удобного управления и быстрого перестраивания сигналов различных форм и частот. Независимо от того, требуется ли приёмо–передающему тракту источник частоты с высокой гибкостью, низким фазовым шумом и высокими динамическими характеристиками, либо промышленная система предъявляет требования к быстрому, простому и экономически эффективному формированию перестраиваемых сигналов при

сохранении фазовой непрерывности, данный критерий проектирования является определяющим для цифрового синтеза частоты.

Прямой цифровой синтез (ПЦС) представляет собой метод формирования выходного сигнала с гибко управляемыми частотой и фазой с использованием цифровых средств обработки данных, синхронизированных с фиксированным и высокоточным тактовым источником [74]. В архитектуре ПЦС опорная или системная тактовая частота масштабируется с помощью коэффициента, задаваемого программируемым двоичным словом настройки частоты. Как правило, длина слова настройки составляет от 24 до 48 бит, что позволяет реализовать ПЦС с исключительно высокой разрешающей способностью по частоте выходного сигнала (рис. 2.10).

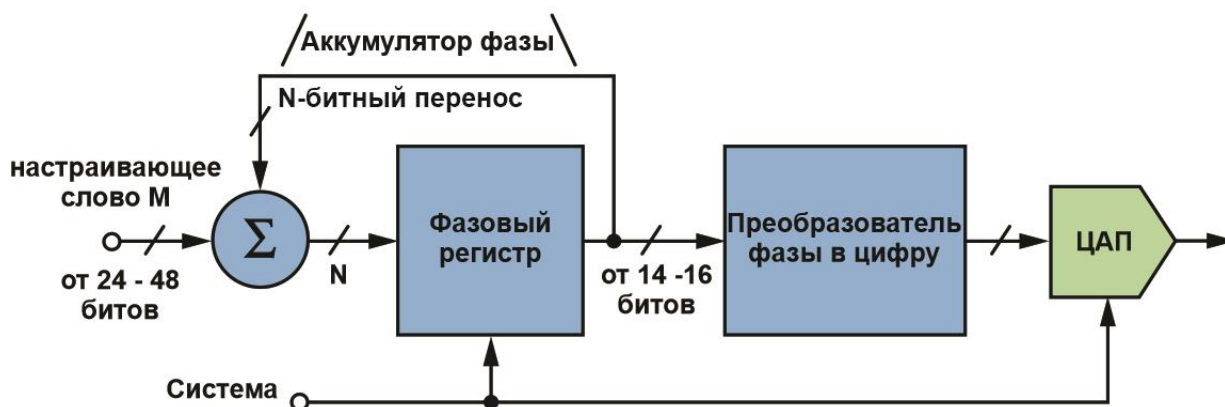


Рисунок 2.10. Функциональная блок-схема системы ПЦС

Как показано на рис. 2.10, основными функциональными узлами ПЦС являются [74]: фазовый аккумулятор, формирующий цифровое значение, соответствующее фазовому углу выходного сигнала; преобразователь фаза-амплитуда, формирующий мгновенное цифровое значение амплитуды при заданном фазовом угле; а также цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), осуществляющий преобразование цифрового значения в дискретно отсчётный аналоговый сигнал. Для синусоидального выходного сигнала преобразователь фаза-амплитуда, как правило, реализуется в виде таблицы синусоидальных значений (рис. 2.11).

Фазовый аккумулятор вычисляет значение N , определяющее выходную

частоту f_{OUT} по отношению к тактовой частоте f_C в соответствии с выражением:

$$f_{OUT} = \frac{N}{2^M} * f_C \quad (2.13)$$

где M – разрядность слова настройки частоты (от 24 до 48 бит), N – числовое значение, соответствующее минимальному приращению фазы на выходе фазового аккумулятора. На рис. 2.11 представлена типовая архитектура ПЦС и тракт формирования сигнала с использованием ЦАП.

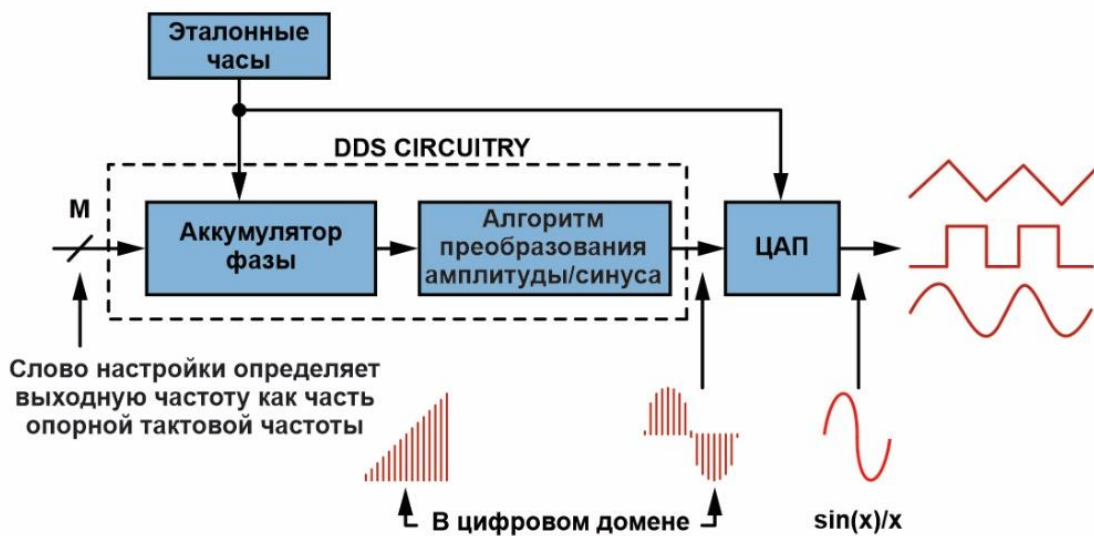


Рисунок 2. 11. Типовая архитектура ПЦС и тракт формирования сигнала с использованием ЦАП

Поскольку изменение значения N приводит к мгновенному изменению фазы и частоты выходного сигнала, система ПЦС является по своей природе фазонепрерывной, что представляет собой важное преимущество во многих практических приложениях. В отличие от аналоговых систем, таких как фазовые автоподстройки частоты (ФАЧ), ПЦС не требует времени установления. ЦАП обычно представляет собой высокопроизводительный узел, специально разработанный для совместной работы с ядром ПЦС (фазовым аккумулятором и преобразователем фаза–амплитуда). В большинстве случаев ПЦС и ЦАП интегрированы в одном кристалле. Независимо от степени интеграции, ЦАП является необходимым элементом для формирования аналогового сигнала

высокой чистоты. Он преобразует цифровую синусоидальную форму сигнала в аналоговую и может обеспечивать как одноктактный, так и дифференциальный выход.

В настоящее время при построении генераторов сигналов на основе ПЦС широко используются как специализированные интегральные ПЦС –микросхемы, так и ПЦС –решения, реализованные на базе ПЛИС в сочетании с внешними ЦАП. Специализированные интегральные ПЦС –чипы объединяют в себе ядро ПЦС, высокоскоростной цифро–аналоговый преобразователь и вспомогательные функциональные блоки, формируя законченный синтезатор и генератор сигналов, легко программируемый с использованием микроконтроллеров или ПЛИС.

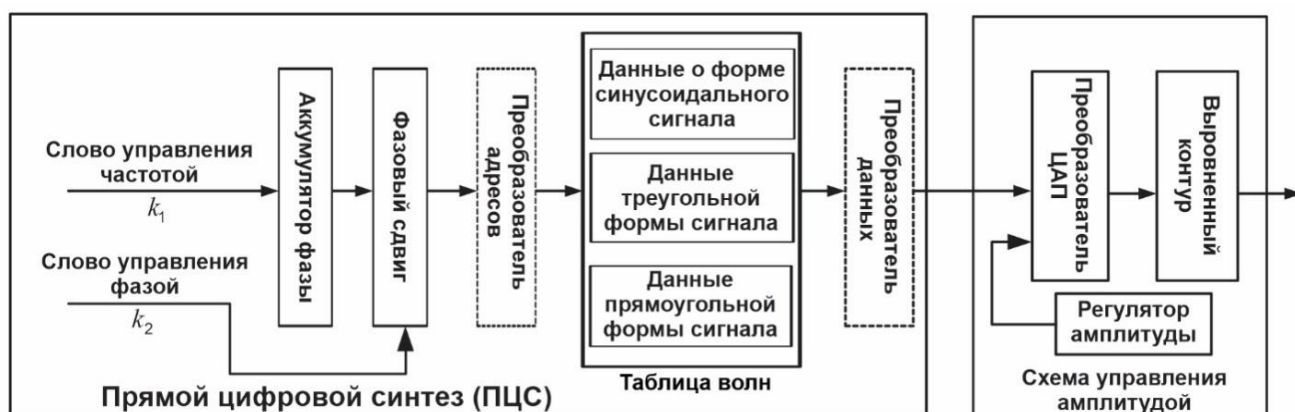


Рисунок 2. 12. Блок–схема генератора сигналов на базе ПЛИС

В ПЦС – системах на базе ПЛИС (рис. 2.12) программируемые логические элементы используются для формирования цифровых массивов данных, содержащих информацию о фазе и частоте выходного сигнала. Эти данные подаются на ЦАП и последующий фильтрующий тракт, где сигнал преобразуется и усиливается. Для оценки преимуществ и недостатков различных методов формирования сигналов выполнено сравнение интегральных ПЦС–решений и ПЦС, реализованных на базе ПЛИС. В качестве альтернативного метода формирования сигналов также рассмотрена аналоговая ФАЧ, результаты сравнения приведены в табл. 2.1.

Таблица 2. 1. Сравнение метода ФАЧ с другими методами формирования сигналов

	ФАЧ	ПЛИС+ЦАП	ПЦС
Потребляемая мощность	Средняя	Средняя	Низкий
Спектральная чистота	Высокая	Средне-высокая	Средняя
Спектральные характеристики	Высокая	Средне-высокая	Средняя
Требования к мощности системы	Высокая	Высокая	Низкая
Цифровая настройка частоты	Нет	Да	Да
Настройка времени отклика	Высокая	Низкая	Низкая
Размер решения/площадь	Средняя	Высокая	Низкая
Гибкость формы сигнала	Низкая	Средняя	Высокая
Стоимость	Средний	Высокая	Низкая
Повторное использование дизайна	Средний	Низкая	Высокая
Сложность реализации	Средний	Высокая	Низкая

Фазовая автоподстройка частоты ФАЧ представляет собой замкнутую систему обратной связи, включающую фазовый детектор, делитель частоты и генератор, управляемый напряжением. Ограниченные возможности точной и быстрой перестройки частоты и формы выходного сигнала, а также относительно медленная динамическая характеристика снижают пригодность ФАЧ для приложений, требующих высокой частотной гибкости, быстрого фазового управления и частотной модуляции. ПЦС-системы, реализованные на базе программируемой логики ПЛИС в сочетании с ЦАП, также обладают рядом недостатков, включая повышенные требования к качеству электропитания, более высокое энергопотребление, большие габариты, а также высокую стоимость аппаратной и программной разработки. Благодаря преимуществам по габаритам, энергопотреблению и стоимости, а также простоте программирования и гибкости управления формой сигнала, интегральные ПЦС-микросхемы получили широкое распространение в генераторах высокочастотных сигналов портативных устройств протонного магнитного резонанса.

Генератор радиочастотного сигнала предназначен для формирования

синусоидального сигнала с частотой, равной частоте ядерного магнитного резонанса, в ПМР–релаксометрах типа ПМР–NP1 и ПМР–NP2, разработанных Кашаев Р.С. с коллегами [75, 76]. В данных устройствах в качестве генератора ВЧ–сигнала используются интегральные ПЦС–микросхемы AD9850/AD9851 компании Analog Devices. На рис. 2.13 представлена базовая структура портативного релаксометра ПМР–NP1.

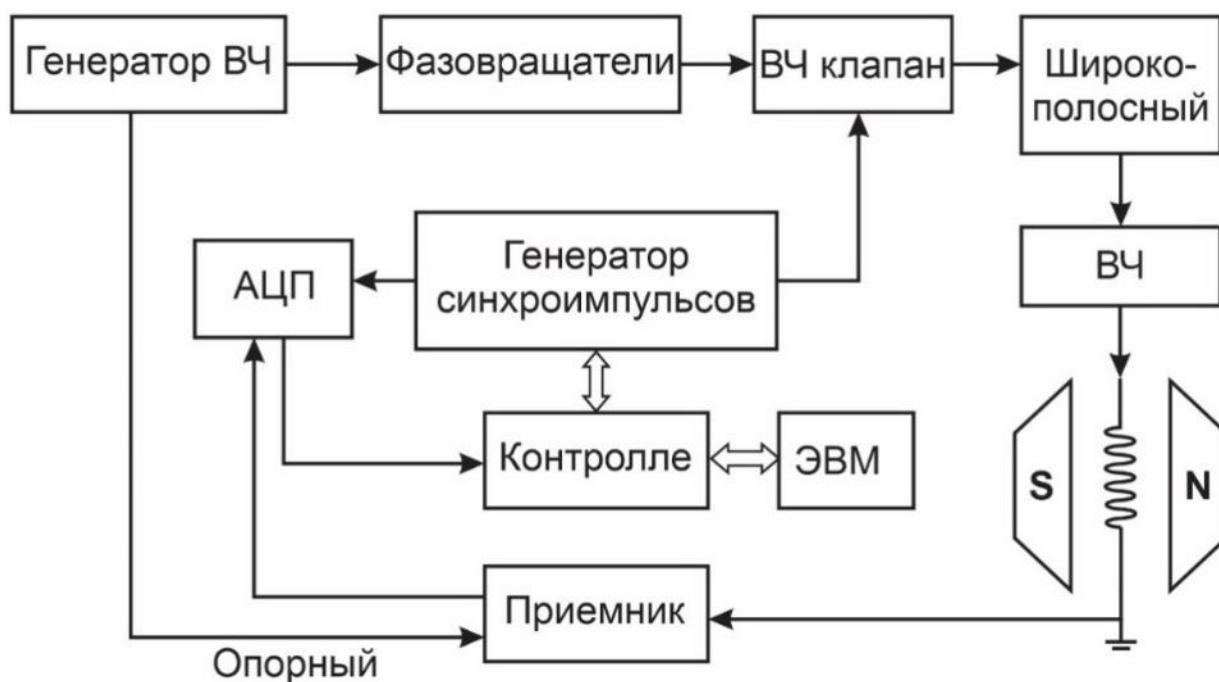


Рисунок 2. 13. Блок–схема устройства релаксометра ПМР–NP1

В конструкции ПМР–релаксометра ПМР–NP3 для формирования синусоидального сигнала применяется микросхема AD9854 (рис. 2.14), представляющая собой интегральный генератор ПЦС с двумя независимыми каналами, синхронизированными от общего системного тактового сигнала. Такая архитектура обеспечивает одновременное формирование двух синусоидальных сигналов с высокой частотной стабильностью и точно управляемым фазовым сдвигом, что удовлетворяет ключевому требованию измерительной системы – поддержанию фазовой синхронности между сигналами возбуждения и приёма.

Каждый ПЦС–канал микросхемы AD9854 построен на основе следующих основных функциональных блоков: регистра управления частотой (*Frequency Tuning Word, FTW*) с 48–разрядным фазовым аккумулятором, обеспечивающего

исключительно высокое разрешение по частоте и фазонепрерывное изменение выходной частоты; регистра управления фазой (*Phase Offset Word, POW*), позволяющего независимо задавать фазовый сдвиг малыми дискретными шагами и тем самым обеспечивать высокоточную фазовую корреляцию между двумя каналами; цифрового умножителя амплитуды, реализующего управление уровнем выходного сигнала полностью в цифровой области, что позволяет оптимизировать уровень мощности и согласовать его с динамическим диапазоном последующих каскадов обработки; а также встроенного высокоскоростного 14-разрядного ЦАП, обеспечивающего формирование аналогового сигнала с низким уровнем искажений и высокой степенью синхронизации между каналами.

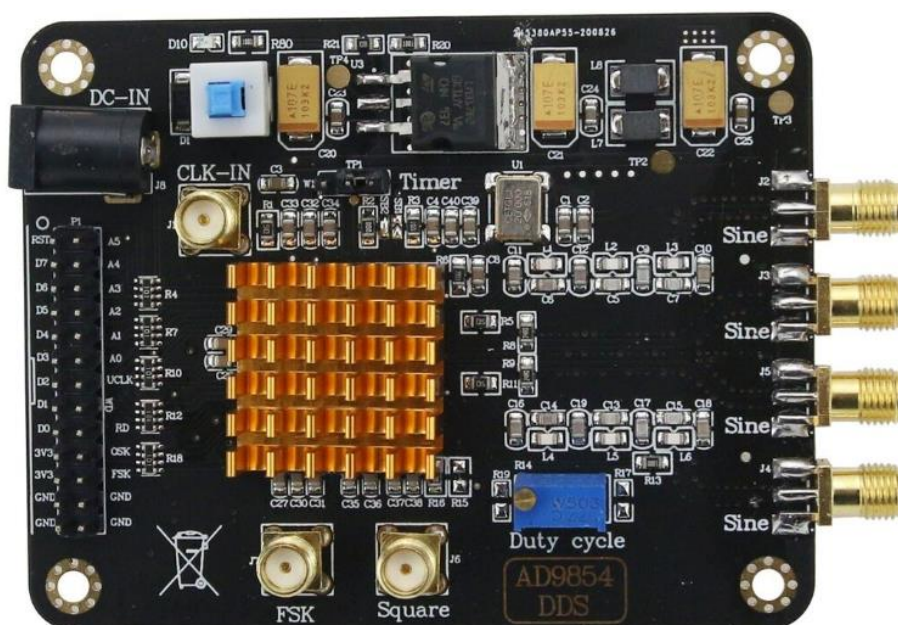


Рисунок 2. 14. Высокочастотный синусоидальный генератор *AD9854*

Благодаря высокой степени интеграции всех функциональных узлов ПЦС микросхема *AD9854* обеспечивает не только гибкое управление параметрами частоты, фазы и амплитуды, но и позволяет существенно упростить аппаратную реализацию генератора, одновременно повышая спектральную стабильность выходных сигналов. В связи с этим *AD9854* является оптимальным выбором для ПМР-релаксометра ПМР-*NP3*, в котором требуется формирование двух фазосинхронных синусоидальных сигналов с точно задаваемым фазовым сдвигом.

2.3.2. Разработка цифровой схемы обработки сигналов и усовершенствованного формирователя импульсных последовательностей ПМР–релаксометра ПМР–NP3

Протонная магнитно–резонансная релаксометрия (ПМРР) является важным разделом ВЧ спектроскопии, обеспечивающим возможность анализа многофазных систем в различных средах [15,76,77]. Архитектура и функциональные возможности современного ПМР–релаксометра в значительной степени определяются стабильностью и точностью тонкой частотной настройки резонансного ВЧ–генератора, а также гибкостью схем управления высокочастотными импульсными последовательностями [78]. В связи с этим способность к высокоточной синтезации импульсов, управлению фазо–частотными параметрами в реальном времени и высокоскоростной обработке принимаемого сигнала является фактором эффективности измерительной системы.

Цифровая схема обработки сигналов является центральным функциональным узлом релаксометра и предназначена для формирования управляющих сигналов для остальных блоков устройства, обработки принимаемых сигналов, считывания данных с аналого–цифровых и цифро–аналоговых преобразователей, а также для организации интерфейса обмена данными с персональным компьютером. В ПМР–релаксометрах ПМР–NP1 и ПМР–NP2 данный узел был реализован на базе ПЛИС. Однако указанные устройства имеют значительный срок эксплуатации, а применяемые в них ПЛИС относятся к ранним поколениям и характеризуются ограниченными функциональными возможностями и сравнительно низкой производительностью, что приводит к ряду эксплуатационных ограничений и затрудняет дальнейшую модернизацию системы.

Так в ПМР–релаксометре ПМР–NP1 для связи с персональным компьютером использовался параллельный интерфейс *LPT*, а программное обеспечение было разработано для операционных систем *Windows 98/XP*, которые в настоящее время не поддерживаются современными вычислительными

платформами. В релаксометре ПМР–*NP2*, несмотря на то что он был разработан относительно недавно (около пяти лет назад) и использует ПЛИС *EP2C5T144C8*, данный тип ПЛИС поддерживает лишь последовательный интерфейс *Serial* (*COM*–порт). В результате для работы с современными компьютерами требуется применение преобразователей *COM–USB*, характеризующихся сравнительно низкой скоростью передачи данных (до ~ 1 Мбит/с). Указанные ограничения обуславливают необходимость замены цифровой схемы обработки сигналов при разработке нового поколения ПМР–релаксометров.

Для устранения перечисленных недостатков в ПМР–релаксометре ПМР–*NP3* была разработана новая цифровая схема обработки сигналов, реализованная на базе ПЛИС–платформы *Z–turn* с использованием микросхемы *Zynq–7020* компании *Xilinx*. Архитектура *Zynq–7020* объединяет в одном кристалле высокопроизводительную ПЛИС–логику и двухъядерный процессор *ARM Cortex–A9* с тактовой частотой 667 МГц. Платформа дополнительно оснащена 512 МБ оперативной памяти *DDR3*, встроенной памятью *Flash eMMC* объёмом 4 ГБ, памятью *Flash QSPI* объёмом 16 МБ, а также современными интерфейсами ввода–вывода, включая *Ethernet 10/100/1000* Мбит/с, *USB OTG*, *JTAG* и отладочный интерфейс *UART*. Данная конфигурация обеспечивает существенное повышение вычислительной производительности, позволяет формировать управляющие сигналы с высокой временной разрешающей способностью и реализовать высокоскоростной и стабильный обмен данными с персональным компьютером.

Блок–схема ПМР–релаксометра ПМР–*NP3*, представленная на рис. 2.15, иллюстрирует тракт формирования и прохождения импульсной последовательности КПМГ, синтезируемой формирователем импульсных последовательностей, связанным с ПЛИС. Сформированная последовательность проходит через полосовой фильтр (5–20 МГц), далее через буферный усилитель и усилитель мощности и передаётся на ПМР–датчик посредством $\lambda/4$ переключатель приём/передача. Индуцированный сигнал спин–эхо принимается, усиливается и оцифровывается с использованием аналого–цифрового преобразователя (АЦП), после чего поступает в ПЛИС и передаётся на

персональный компьютер по интерфейсу *Ethernet*, что обеспечивает высокую скорость и стабильность приёма измерительных данных.

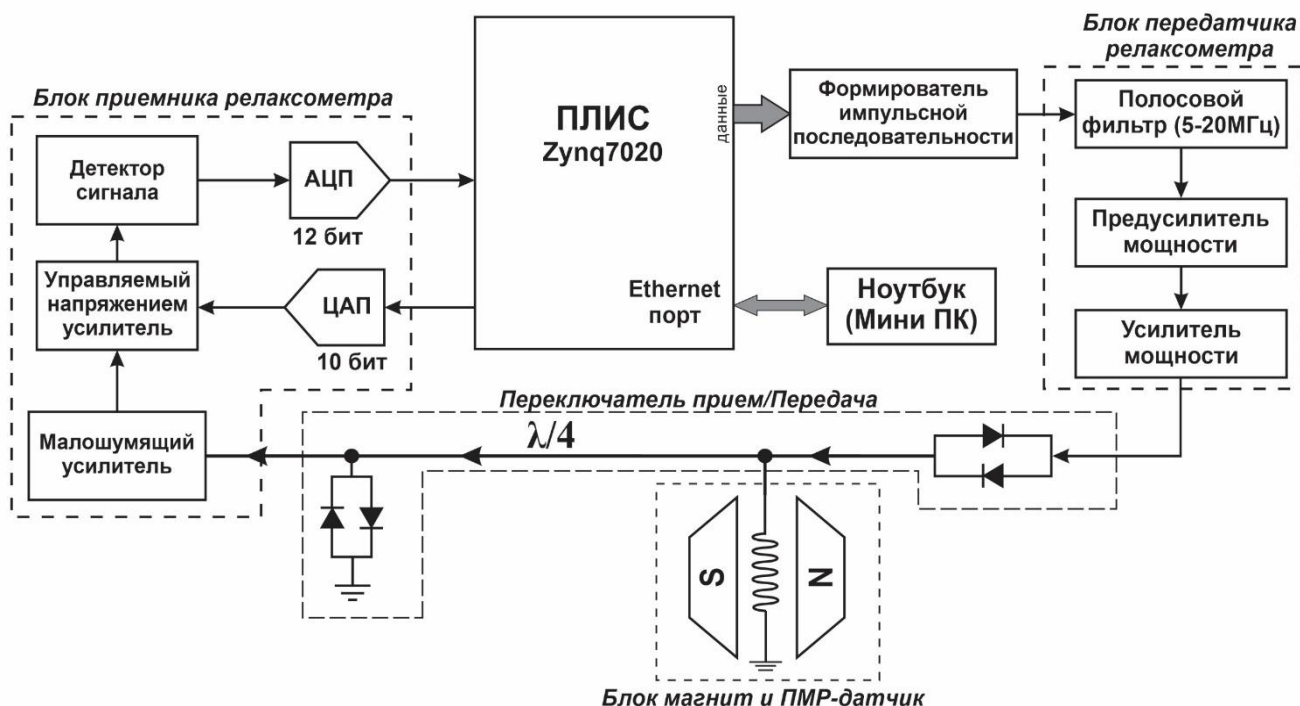


Рисунок 2. 15. Функционально–блоковая схема ПМР–релаксометра ПМР–NP3

Формирователь импульсных последовательностей является ключевым узлом, обеспечивающим генерацию последовательностей КПМГ с параметрами, программно задаваемыми пользователем. Генератор тактовых импульсов формирует последовательность КПМГ, включающую один ВЧ–импульс поворота на 90° , за которым следует серия импульсов поворота на 180° , между которыми регистрируются сигналы спин–эхо. В релаксометре ПМР–NP1 формирователь импульсных последовательностей включал фазовращатель, синхронный генератор импульсов и высокочастотный ключ. Фазовращатель использовался для формирования второго сигнала со сдвигом фазы 90° перед подачей на ВЧ–ключ. Ограничением данного подхода являлась невозможность точного управления фазовым углом, поскольку он в значительной степени зависел от номинала и временной нестабильности ёмкости конденсаторов.

В ПМР–релаксометре ПМР–NP2 в качестве синхронного сигнала использовался синусоидальный сигнал от частотного синтезатора

AD9850/AD9851, при этом внутри ПЛИС применялись умножители частоты, повышающие её в четыре раза для формирования требуемых фазовых соотношений. Данный метод обеспечивал более точную установку фазового угла, однако синусоидальный сигнал после обработки в логических схемах представлял собой лишь аппроксимированную форму. Кроме того, модуляция синусоидального сигнала осуществлялась только в пределах каждого полупериода перед их объединением с помощью логического элемента И для формирования полного высокочастотного импульса.

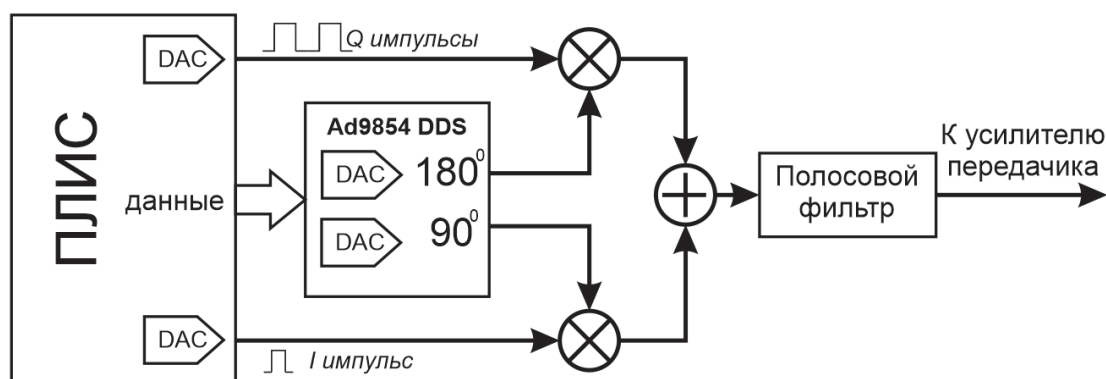


Рисунок 2. 16. Блок–схема формирователя импульсных последовательностей с использованием смесителей

Исходная структура формирователя импульсных последовательностей КППМГ представлена на рис. 2.16. Управляющие данные передавались с ПЛИС на ПЦС–микросхему *AD9854*, формирующую два синусоидальных сигнала на резонансной частоте с фазовым сдвигом 90° на двух выходах. Два высокочастотных синусоидальных сигнала с фазами 90° и 180° подвергались квадратурной амплитудной модуляции (КАМ–*QAM*) с использованием импульсов *I* и *Q* на смесителях, после чего фильтровались и усиливались по мощности. В дальнейшем были предприняты попытки усовершенствования данной схемы путём замены смесителей на высокоскоростные ВЧ–переключатели. Однако такой подход приводил к дополнительным потерям сигнала и усложнению схемотехники вследствие необходимости введения дополнительных буферных усилительных каскадов для компенсации затухания.

В усовершенствованной конфигурации функция формирования импульсной

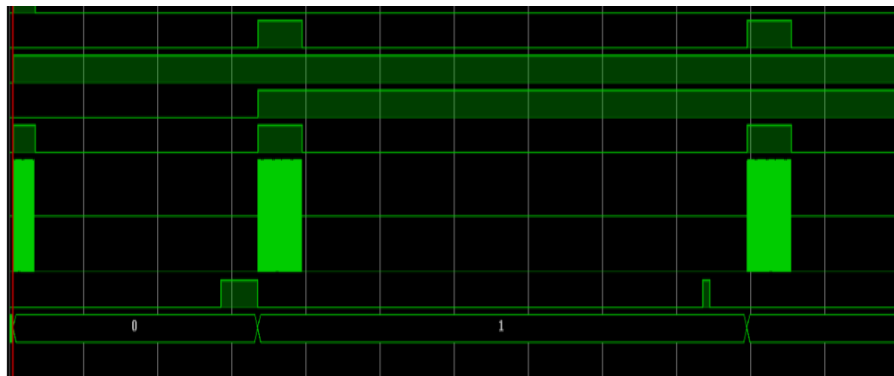
последовательности КПМГ была полностью перенесена из аналоговой области в цифровую и интегрирована непосредственно в ПЦС–микросхему *AD9854*. Вместо генерации двух несущих на резонансной частоте с фазовыми сдвигами 90° и 180° и последующей модуляции с использованием смесителей или высокоскоростных ВЧ–переключателей, сопровождающейся потерями и усложнением схемы, управляющая программа ПЛИС осуществляет прямую запись управляющих данных во внутренние регистры *AD9854*, обеспечивая синтез каждого импульса КПМГ непосредственно в ядре ПЦС.

Резонансная частота f_0 задаётся посредством регистра *FTW* 48 бит, что позволяет устанавливать частоту с разрешением лучше 0,1 Гц даже при работе встроенного ЦАП *AD9854* с тактовой частотой 180 *MSPS*. Фаза каждого импульса задаётся путём записи значений в два регистра *POW* (по 14 бит каждый), при этом ПЛИС передаёт управляющие данные по 8–битной параллельной шине *AD9854* и активирует сигнал *I/O_UPDATE*, обеспечивая мгновенное обновление фазовых параметров в фазонепрерывном режиме. В момент начала каждого импульса поворота на 90° или 180° ПЛИС записывает соответствующее значение *POW* (например, 0° , 90° , 180° и т.д.) в *AD9854*, что гарантирует точную установку фазы непосредственно на фронте импульса.

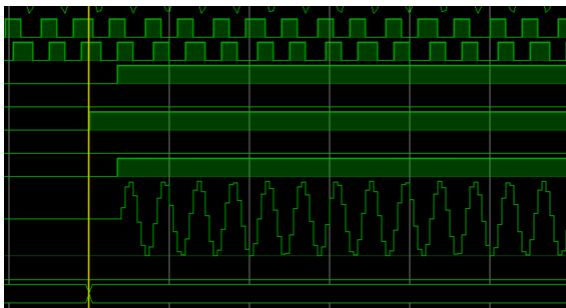
Формирование огибающей импульсов осуществляется за счёт управления регистрами цифрового умножителя амплитуды (*digital multiplier*, 12 бит), что позволяет устанавливать амплитуду сигнала равной нулю в паузах между импульсами и переводить её в номинальное значение в интервалах излучения импульсов без использования каких–либо аналоговых модуляторов.

Высокоскоростное управление указанными процессами обеспечивается ПЛИС *Xilinx Zynq–7020*, программируемая логика которого может функционировать на частотах 100–200 МГц, обеспечивая временное разрешение управляющих сигналов менее 10 нс. Пропускная способность 8–битной параллельной шины *AD9854* полностью удовлетворяется производительностью *Zynq–7020*, что позволяет обновлять значения *FTW*, *POW* и коэффициенты амплитуды в течение нескольких тактовых циклов. Это полностью соответствует

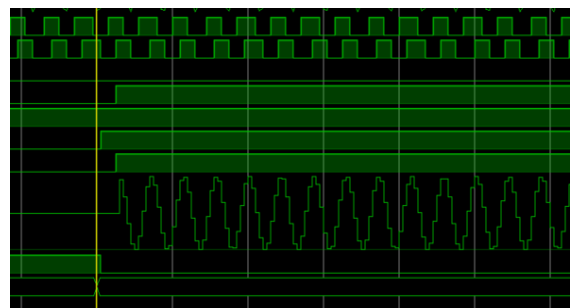
требованиям формирования импульсных последовательностей КПМГ с межэховыми интервалами на уровне микросекунд.



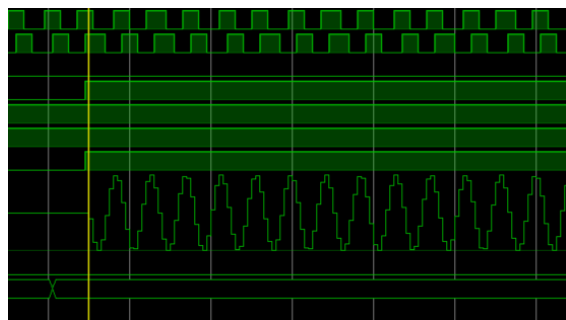
а) импульсная последовательность КПМГ



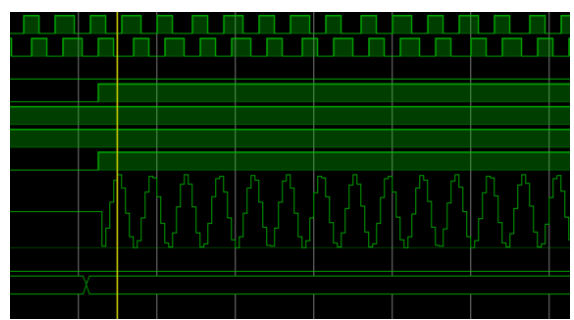
б) Импульс 90^0



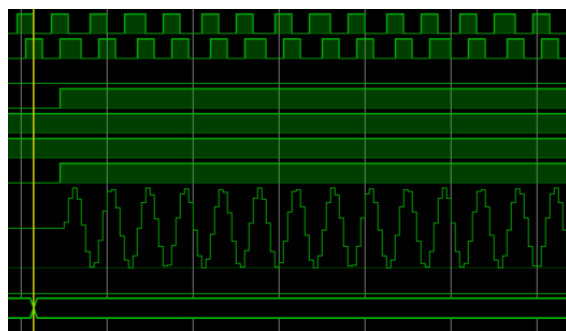
в) Импульс 180^0-1



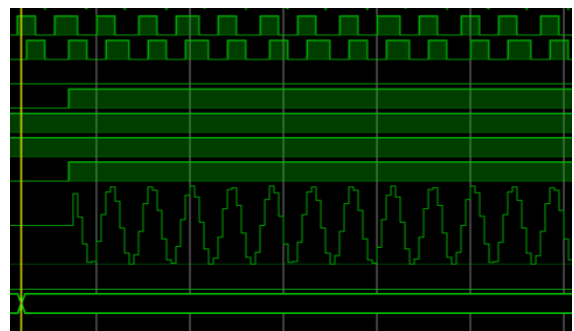
г) Импульс 180^0-2



д) Импульс 180^0-3



е) Импульс 180^0-4



ж) Импульс 180^0-5

Рисунок 2. 17. Временные диаграммы импульсной последовательности КПМГ

Благодаря сочетанию гибкости архитектуры ПЛИС и высокой точности цифрового синтеза сигналов, реализуемой в *AD9854*, разработанный формирователь импульсных последовательностей обеспечивает высокую фазовую и амплитудную стабильность, существенно упрощает ВЧ-часть устройства, снижает потери сигнала и повышает надёжность ПМР-релаксометра при проведении измерений релаксометрии.

2.3.3. Полосовой фильтр, предусилитель и усилитель мощности

Системы протонного магнитного резонанса разрабатываются с использованием компактных технологий обработки сигналов, однако в портативных ПМР-системах габаритные размеры устройства в значительной степени определяются размерами высокочастотного усилителя мощности. Данный усилитель необходим для возбуждения ПМР-датчика и, как правило, реализуется в классах *A* или *AB*.

Портативные ПМР-системы обычно питаются от автономных источников энергии, при этом энергетическая эффективность традиционных линейных усилителей класса *A* является низкой и на практике, как правило, не превышает 50% [79,80], что представляет собой существенное ограничение для мобильных применений. Усилители мощности класса *AB* обеспечивают компромисс между коэффициентом полезного действия (обычно не более 70%) и относительной простотой схемотехнической реализации, монтажа и эксплуатации. В то же время современные усилители класса *D* позволяют значительно повысить энергоэффективность и обеспечивают значения КПД на уровне 80–90% [81–83].

Однако применение усилителей класса *D* сопряжено с рядом принципиальных трудностей. Такие усилители используют метод широтно-импульсной модуляции (ШИМ) для управления парами *MOSFET*-транзисторов в мостовой конфигурации (рис. 2.18), за счёт чего осуществляется усиление сигнала.

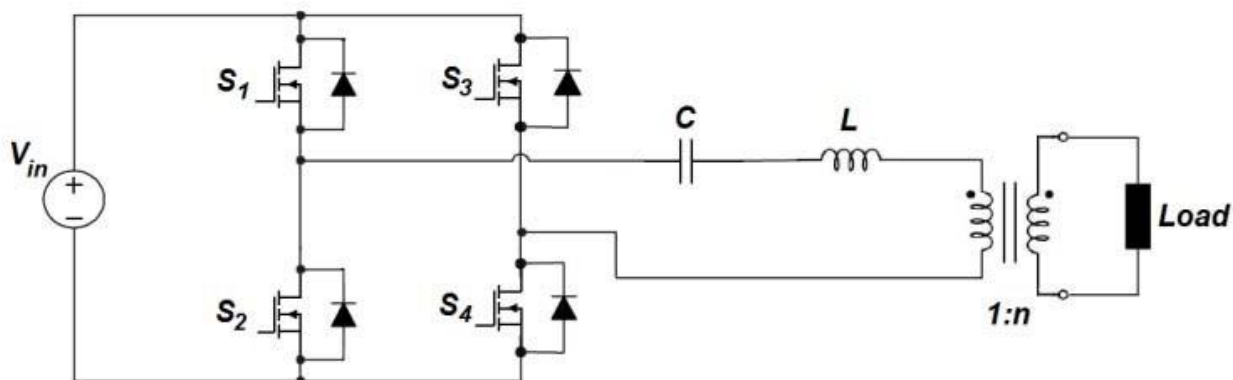


Рисунок 2. 18. Упрощённая принципиальная схема резонансного ВЧ-усилителя мощности класса D

Это требует разработки отдельного контроллера для усилительного каскада, а также специализированных драйверных схем управления $MOSFET$, работающих синхронно с ПЛИС в процессе формирования импульсных последовательностей КПМГ. В результате существенно усложняется архитектура портативного релаксометра и возрастает стоимость его разработки. Кроме того, использование ШИМ для управления высокочастотной коммутацией $MOSFET$ потенциально приводит к возникновению помех и искажений сигнала при недостаточно тщательной и аккуратной схемотехнической проработке.

Первая версия усилителя мощности класса AB , разработанная в рамках данной работы, обеспечивала выходную мощность порядка 10 Вт [113]. Коэффициент усиления схемы достигал 26 дБ при напряжении питания 12 В и выходном сопротивлении 50 Ом. Усилитель мощности 10 Вт имел габаритные размеры 4×7 см (рис. 2.19).

Усилитель выполнен по двухкаскадной $push-pull$ архитектуре класса AB . Между каскадами применено трансформаторное сопряжение, обеспечивающее гальваническую развязку и согласование импедансов (рис. 2.20). Первый каскад предварительного усиления реализован на двух $MOSFET$ -транзисторах $Q3$ и $Q6$ типа $BS170$, второй каскад усиления мощности – на двух силовых $MOSFET$ -транзисторах $Q4$ и $Q5$ типа $IRF510$, работающих в $push-pull$ режиме класса AB .

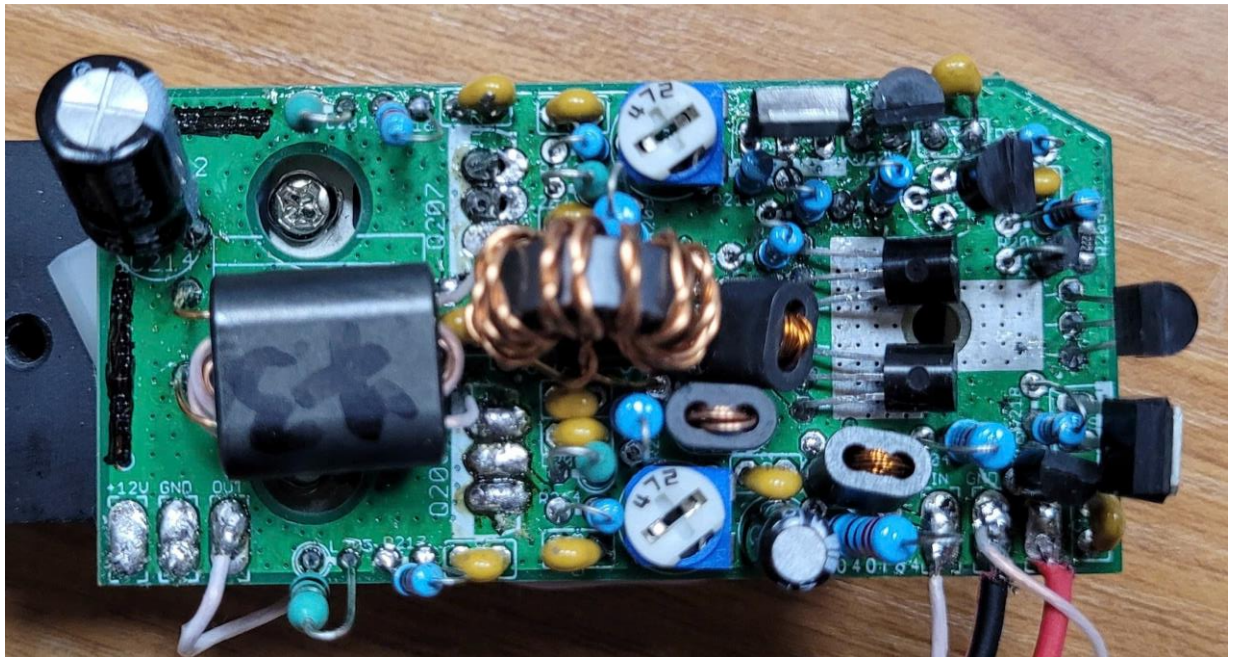


Рисунок 2. 19. Усилитель мощности выходной мощностью 10 Вт (первая версия)

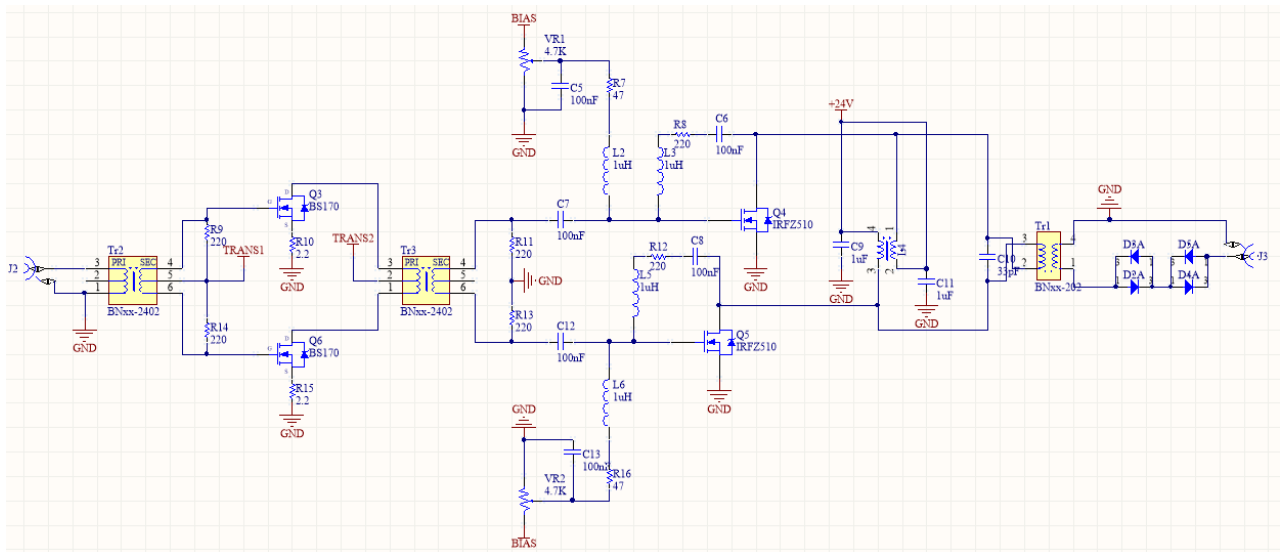


Рисунок 2. 20. Принципиальная электрическая схема усилителя мощности 10 Вт (первая версия)

Несмотря на то что транзисторы *IRF510* способны работать в диапазоне ВЧ до частот порядка 30 МГц, их применение в основном ориентировано на режимы непрерывного синусоидального сигнала (*CC-CW*) либо простые амплитудно-модулированные сигналы, в которых как несущая, так и модулирующий сигнал имеют синусоидальную форму. В случае же импульсных ВЧ-сигналов КАМ, характерных для импульсных последовательностей КПМГ, использование

усилителей такого типа приводит к возникновению нежелательных эффектов.



Рисунок 2. 21. Искажение формы импульса поворота на 180° на фронтах при использовании усилителя мощности на универсальных *MOSFET*–транзисторах

На рис. 2.21 приведён импульс поворота на 180° длительностью 10 мкс, измеренный на выходе усилителя мощности при отсутствии ПМР–датчика. Время нарастания импульса (*ring-up*) достигает порядка 1 мкс, а время затухания импульса (*ring-down*) – до 1,5 мкс. Эти значения составляют значительную долю длительности импульса, что приводит к серьёзному искажению его формы и нарушению условий корректного поворота спиновой намагниченности, в результате чего сигнал спин–эхо существенно ослабляется либо полностью подавляется.

Основные причины указанных искажений обусловлены внутренними ограничениями *MOSFET*–транзисторов *BS170* и *IRF510* при работе в ВЧ–режиме: значительные паразитные ёмкости C_{gs} и C_{gd} , ограничивающие скорость переключения; длительное время хранения заряда, препятствующее полному закрытию транзисторов по окончании импульса; дрейф рабочей точки во времени, вызывающий амплитудные и фазовые искажения; а также выраженная нелинейность характеристик, затрудняющая обработку быстрых амплитудно–фазовых изменений, характерных для последовательностей КПМГ. Таким образом, усилители мощности, построенные на универсальных *MOSFET*–транзисторах, не способны обеспечить требуемую крутизну фронтов импульсов, мгновенную линейность и фазовую стабильность, необходимые для задач ПМР–

релаксометрии.

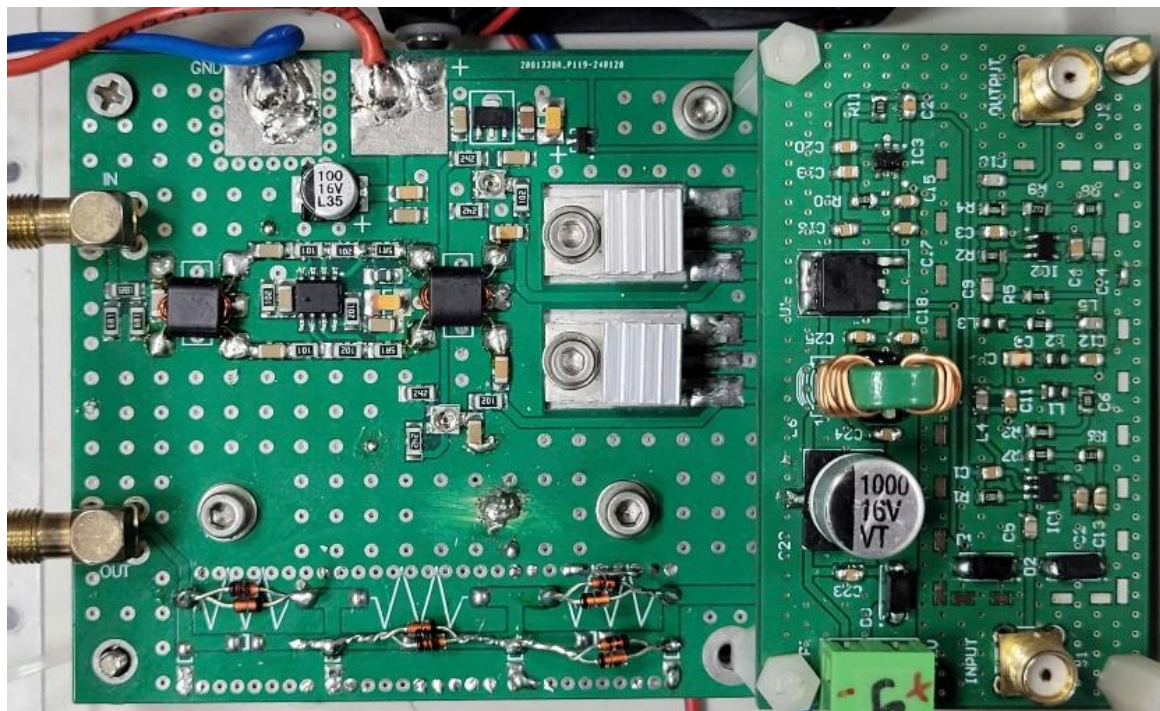


Рисунок 2. 22. Полосовой фильтр, предварительный усилитель и усилитель мощности (окончательная версия)

Указанные ограничения обуславливают необходимость замены данных транзисторов на специализированные ВЧ-компоненты, такие как *RD16HNF1*, *MRF150* или транзисторы серии *BLF*, которые характеризуются малой входной ёмкостью, высокой скоростью переключения и устойчивой работой с импульсными ВЧ-сигналами с быстро изменяющейся огибающей, что в большей степени соответствует требованиям портативных ПМР-релаксометров.

Окончательная версия усилителя мощности была разработана на двухслойной печатной плате размерами 120×80 мм, при этом все электронные компоненты размещены компактно на верхнем слое платы (рис. 2.22). Поверхность платы снабжена системой заземляющих переходных отверстий (*via*) для подавления помех и улучшения электромагнитной совместимости. Выходная мощность усилителя достигает 43 дБм, что соответствует максимальной входной мощности 4 дБм при входном и выходном сопротивлениях 50 Ом. В выходном тракте предусмотрена возможность установки низкочастотного фильтра с частотой среза f_C , соответствующей рабочему диапазону усилителя, вплоть до 50 МГц. Печатная плата усилителя установлена на алюминиевый радиатор,

обеспечивающий стабильный тепловой режим при длительной работе.

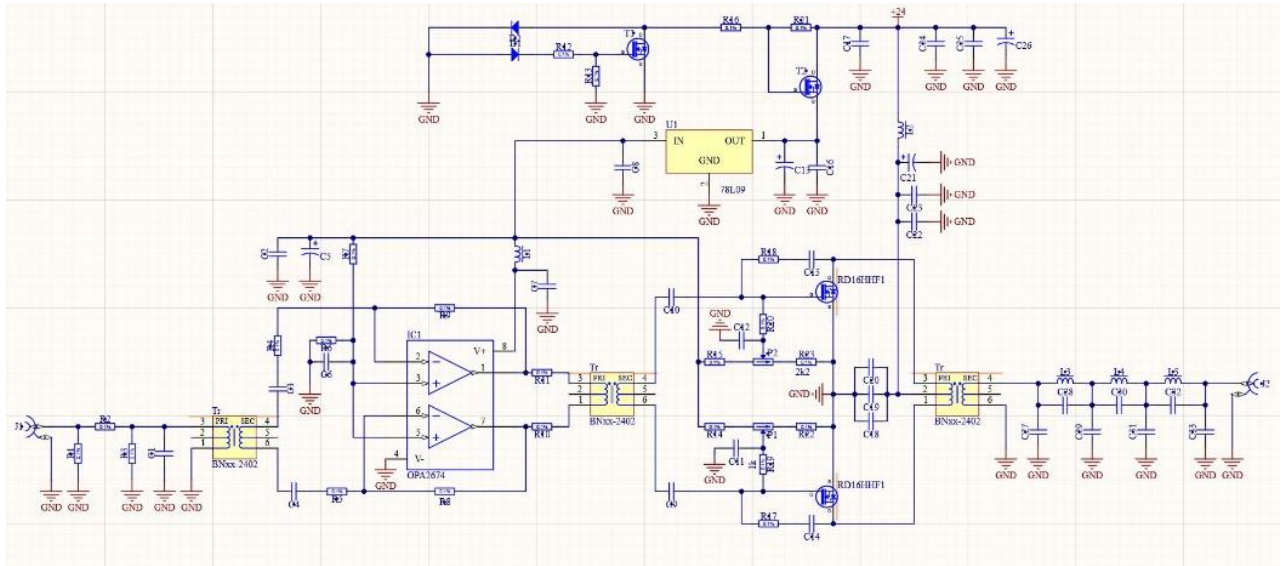


Рисунок 2. 23. Принципиальная схема усилителя мощности (окончательная версия)

Принципиальная электрическая схема усилителя представлена на рис. 2.23. Усилитель выполнен в классе *AB* и включает два каскада усиления с трансформаторным сопряжением для гальванической развязки и согласования импедансов. На входе схемы установлен П-образный аттенуатор на 6 дБ, предназначенный для защиты входного каскада. Трансформатор *Tr1* обеспечивает развязку входа с первым усилительным каскадом. Первый каскад предварительного усиления выполнен в виде дифференциального усилителя на двух операционных усилителях, интегрированных в микросхему *OPA2674*. Коэффициент усиления данного каскада задаётся резисторами *R6*, *R7* и *R8*, *R9*.

Выходной каскад усиления мощности реализован на двух *MOSFET*-транзисторах *RD16HHF1*, включённых в *push-pull* конфигурации класса *AB*. Транзисторы *RD16HHF1* специально разработаны для ВЧ-приложений и обеспечивают стабильную работу на частотах до 60 МГц. Для оптимизации режима работы на затворы каждого *MOSFET* подаётся предварительное напряжение смещения V_{BIAS} в диапазоне 3,2–3,6 В, обеспечивающее их перевод в режим готовности. В рассматриваемой конструкции напряжение V_{BIAS} установлено на уровне 3,4 В с помощью подстроечных резисторов *P1* и *P2*, что позволяет

обеспечить надёжную и долговременную работу транзисторов *RD16HNF1*.

Непосредственно после формирователя импульсных последовательностей в тракте возбуждения установлен полосовой фильтр, предназначенный для обеспечения чистого и стабильного спектра ВЧ-сигнала, подаваемого на последующие усилительные каскады. Поскольку импульсная последовательность КПМГ, формируемая ПЦС, характеризуется крайне быстрыми фронтами включения и выключения импульсов поворота на 90° и 180° , спектр сигнала содержит не только основную составляющую на резонансной частоте f_0 , но и значительное количество внеполосных гармонических компонентов. При непосредственной подаче таких сигналов на усилитель мощности возможны смещение рабочей точки *MOSFET*-транзисторов, возникновение нелинейных искажений, рост фазового шума и даже развитие паразитных колебаний. В связи с этим полосовой фильтр и предусилитель были спроектированы и реализованы совместно на одной печатной плате (рис. 2.24, 2.25).



Рисунок 2. 24. Полосовой фильтр и предусилитель для импульсной последовательности КПМГ

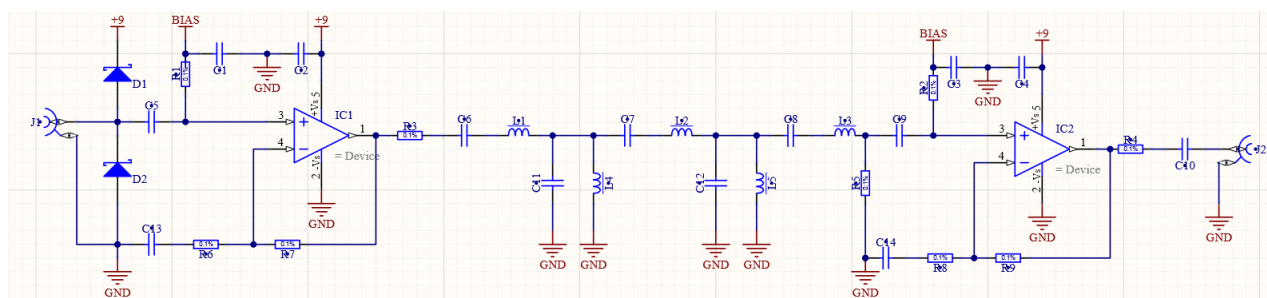


Рисунок 2. 25. Принципиальная электрическая схема полосового фильтра и предусилитель

Полосовой фильтр в диапазоне 5–20 МГц разработан по четырёхзвенной конфигурации Баттерворта и с согласованием входного и выходного сопротивлений, и установлен между двумя каскадами буферного усилителя. Первый предусилитель каскад (*IC1*) выполняет функцию полной изоляции последующей нагрузки от источника сигнала ПЦС, что позволяет исключить влияние динамических изменений импеданса фильтра и усилителя мощности на выходной сигнал микросхемы *AD9854*. Благодаря работе в линейном режиме с малым коэффициентом усиления и высоким входным сопротивлением буферный каскад обеспечивает передачу импульсной последовательности КПМГ на резонансной частоте с минимальными искажениями и высокой фазовой стабильностью.

Для импульсных ВЧ–сигналов характерно наличие значительного числа нежелательных высокочастотных гармонических составляющих в спектре. Применение полосового фильтра Butterworth позволяет эффективно подавить данные компоненты до подачи сигнала на каскад усиления мощности, предотвращая возникновение нелинейных искажений, перегрузки и паразитной генерации в последующих каскадах. Кроме того, фильтр спроектирован с обеспечением согласования на сопротивление 50 Ом между буферным каскадом и усилителем мощности, что позволяет минимизировать вносимые потери и повысить эффективность передачи энергии.

Второй предусилитель каскад (*IC2*) установлен непосредственно после полосового фильтра и предназначен для восстановления амплитуды сигнала после прохождения фильтрующей цепи, а также для дополнительной изоляции фильтра от усилителя мощности ВЧ. Данный каскад обеспечивает отсутствие обратного влияния динамической нагрузки усилителя мощности на амплитудно–частотную характеристику фильтра и формирует уровень сигнала, достаточный для возбуждения усилителя мощности в режиме работы с импульсной последовательностью КПМГ. Наличие двух буферных каскадов, размещённых до и после полосового фильтра, позволяет сохранить точную форму и фазу импульсов поворота на 90° и 180°, а также обеспечить линейность работы всего

передающего тракта. Это является необходимым условием для получения спин-эхо сигналов высокого качества в экспериментах ПМР-релаксометрии.

Типичная длительность импульсов, используемых в ПМР-экспериментах, составляет от 2 до 10 мкс (*Eidmann* [84]). На рис. 2.26 показан импульс поворота на 180° на резонансной нагрузке 50 Ом с пиковым напряжением ± 150 В.

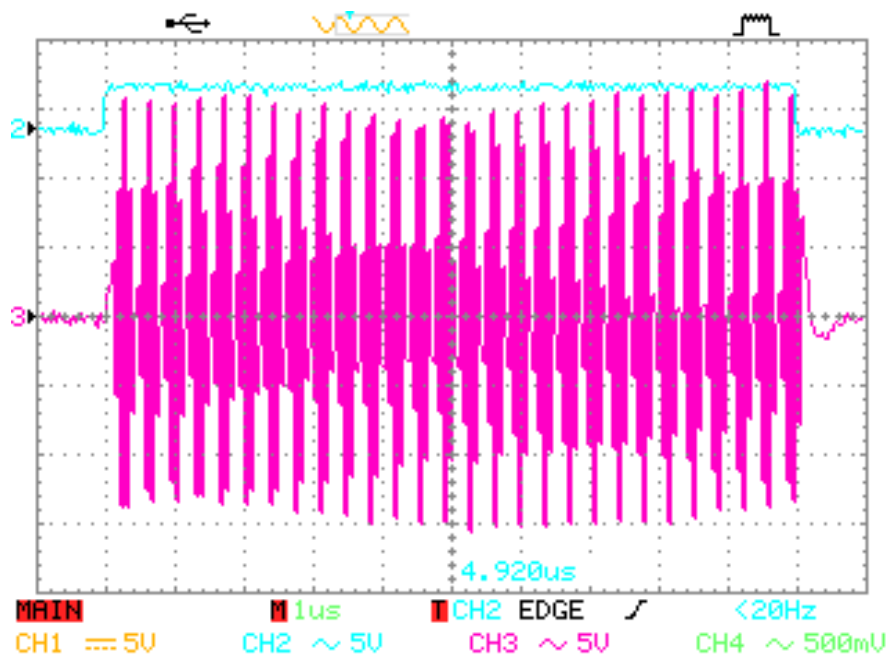


Рисунок 2. 26. Импульс поворота на 180° на резонансной нагрузке после усилителя мощности. Вдоль вертикальной оси: каждый шаг (1 квадрат) соответствует 50 В, умноженным на коэффициент 10 на щупе; Вдоль горизонтальной оси: каждый шаг (1 квадрат) соответствует 1 мкс.

Как правило, усилители, работающие на резонансную нагрузку, подвержены эффекту увеличения времени нарастания и спада импульсов. Это обусловлено как типом *MOSFET*-транзисторов, используемых в качестве элементов усиления мощности, так и величиной коэффициента качества Q ПМР-датчика. Однако разработанный усилительный тракт обеспечивает малые значения времени *ring-up* и *ring-down* (не превышающие 250 нс) даже при работе с датчиками, обладающими высоким коэффициентом качества.

Типичная импульсная последовательность ПМР включает импульс поворота на 90° , за которым следует импульс поворота на 180° через определённый временной интервал, что соответствует классической спин-эхо

последовательности Хана (*Hahn, Callaghan*, [30, 31]). Однако в экспериментах по измерению времени поперечной релаксации T_2 широко используется импульсная последовательность КПМГ, формирующая серию эхосигналов за счёт применения последовательности импульсов поворота на 180° после начального импульса на 90° . При этом импульсы на 180° имеют амплитуду, вдвое превышающую амплитуду импульса на 90° , либо удвоенную длительность.

На рис. 2.27 представлена импульсная последовательность КПМГ, в которой импульсы поворота на 180° имеют длительность, вдвое превышающую длительность импульса на 90° . Постоянное напряжение питания усилителя мощности составляет 23,4 В, при этом пикового напряжения выходного сигнала на датчике ПМР достигает ± 150 В.

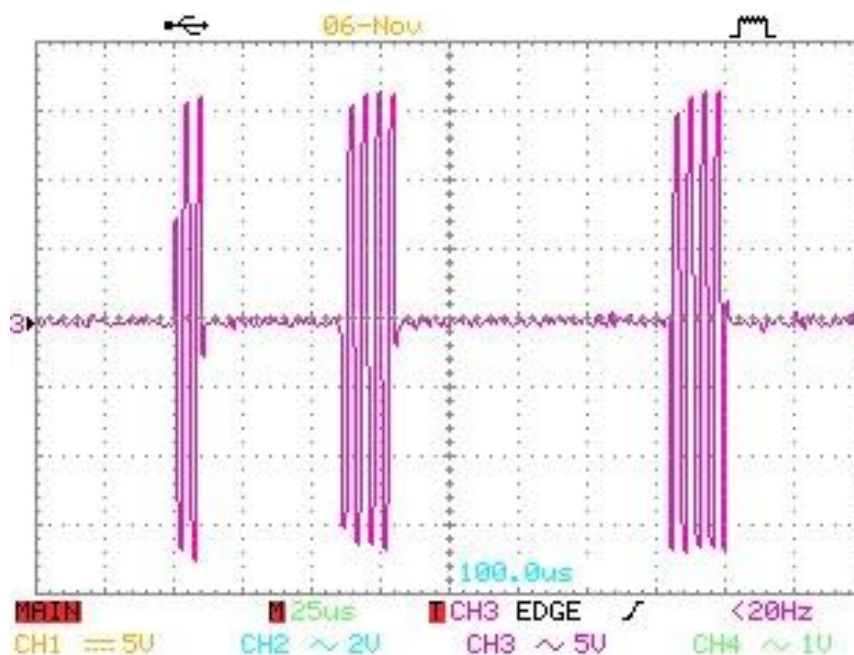


Рисунок 2. 27. Импульсная последовательность КПМГ на резонансной нагрузке после усилителя мощности. Вдоль вертикальной оси: каждый шаг (1 квадрат) соответствует 50 В, умноженным на коэффициент $\times 10$ на щупе; Вдоль горизонтальной оси: каждый шаг (1 квадрат) соответствует 25 мкс.

Измеренное значение потребляемого тока усилителя составляет 0,6 А. На основании данных параметров можно оценить коэффициент полезного действия разработанного усилителя мощности класса AB , который составляет около 64 %. Таким образом, разработанный усилитель класса AB обеспечивает достаточный

уровень выходной мощности для формирования импульсных последовательностей КПМГ, необходимых для ПМР–экспериментов в портативных релаксометрах, при оптимальном сочетании габаритных размеров, энергетической эффективности, схемотехнической простоты и качества формируемого сигнала.

2.3.4. Разработка усовершенствованных усилительных каскадов и схемы детектирования сигнала для приёмника ПМР–релаксометра

Наряду с передатчиком, приёмник является ключевым компонентом приёмно–измерительной системы ПМР–релаксометра. Задача приёмника заключается в усилении сигнала спин–эхо с очень малой амплитудой (10–100 мкВ) до уровня напряжения, подходящего для работы схемы детектирования (1–1,5 В), при резонансной частоте ν_0 и полосе пропускания около 100–300 кГц. Эта схема усиления требует высокого коэффициента усиления, возможности гибкой регулировки усиления, а также высокой помехоустойчивости к электромагнитным помехам и искажениям, возникающим при модуляции и усилении сигнала [85].

Схема приёмника в ПМР–релаксометрах ПМР–*NP1* и ПМР–*NP2* [76] является типичным примером усиления сверхмалых сигналов на основе дифференциальной пары *MOSFET BF998* и базовых пассивных компонентов. Схема включает четыре каскада усиления, соединённых через трансформаторы с обмотками на высокочастотных ферритовых сердечниках, при этом два усилительных элемента в среднем каскаде используют второй затвор (*Gate 2*) для регулировки коэффициента усиления с помощью управляющего напряжения. Для снижения шума на сигнале спин–эхо, подстроечные конденсаторы устанавливаются параллельно с первичной обмоткой трансформатора, образуя *LC*–фильтры, настроенные на резонансную частоту ν_0 . Эта структура значительно подавляет внеполосные помехи, искажающие полезный сигнал.

Однако попытки воспроизвести и повторно реализовать эту схему усиления сталкиваются с трудностями, связанными с выбором подходящих компонентов, сложностью сборки и настройкой резонансных *LC*–контуров. Кроме того,

MOSFET BF998 и ферритовые сердечники имеют значительный разброс параметров между экземплярами и сильно зависят от рабочих условий, что делает калибровку более сложной.

Для решения этой проблемы были выбраны интегральные микросхемы для малошумящих усилителей (МШУ) и управляемого напряжением усилителя (УНУ). Преимущества интегральных микросхем заключаются в упрощении структуры схемы, гибкости изменения конструкции и расширении полосы пропускания для различных приложений.

Первые эксперименты с малошумящим усилителем (МШУ) на основе двухканальной операционной микросхемы *OPA2134* [86] показали, что микросхема имеет хорошие шумовые характеристики и линейную обработку сигналов в низкочастотных приложениях. Моделирование в средах *Proteus* и *Multisim* показало, что микросхема может использоваться для построения МШУ (рис. 2.28). Однако практические испытания показали, что *OPA2134* не соответствует требованиям для работы в резонансном диапазоне $\nu_0 = 10\text{--}15$ МГц. Это объясняется ограниченной полосой пропускания, низкой скоростью переключения и неудовлетворительными шумовыми характеристиками для ВЧ-приложений. Кроме того, высокое входное сопротивление *OPA2134* не совместимо с 50 Ом импедансной системой приёмника ПМР-релаксометра. Поэтому этот вариант был отклонён.

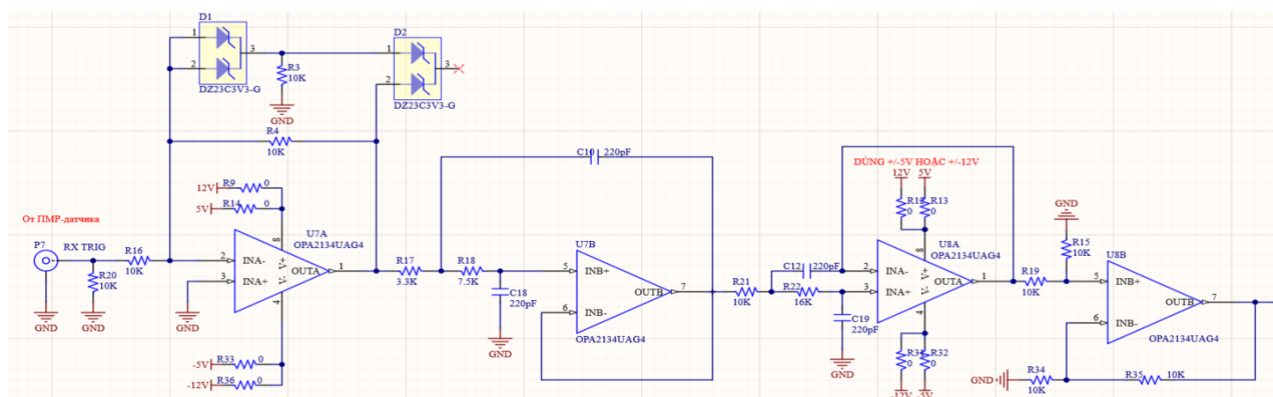


Рисунок 2. 28. Принципиальная схема МШУ на основе *OPA2134*

В качестве окончательного решения для входного каскада приёмного тракта был выбран монолитный малошумящий усилитель (ММШУ) *MAR-6+*,

разработанный компанией *Mini-Circuits*.

Этот усилитель предназначен для диапазона частот 0–2 ГГц и обеспечивает необходимые характеристики стабильности для приложений усиления ВЧ-сигналов. Микросхема *MAR-6+* имеет номинальный коэффициент усиления порядка +20 дБ, типичный коэффициент шума 3 дБ, стандартизированные входные и выходные импедансы 50 Ом и высокую стабильность благодаря встроенной внутренней обратной связи. Эти особенности позволяют значительно снизить зависимость характеристик схемы от погрешностей пассивных компонентов и внешних факторов, а также значительно упростить процесс внедрения и настройки по сравнению с дискретными *MOSFET* или операционными усилителями. Принципиальная схема МШУ на основе *MAR-6+* представлена на рис. 2.29.

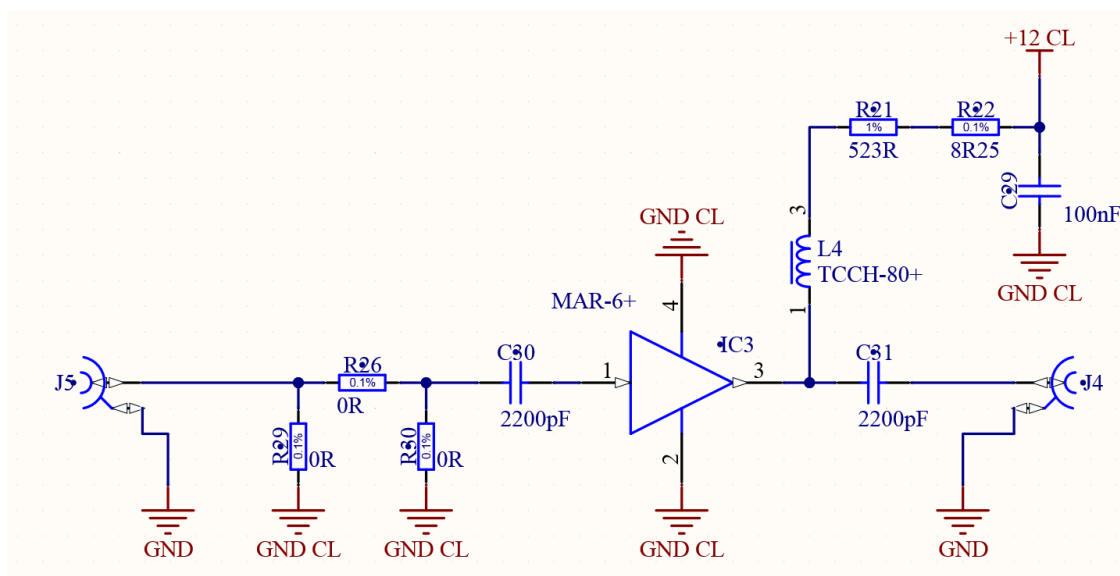


Рисунок 2. 29. Принципиальная схема МШУ на основе *MAR-6+*

В системе ПМР-релаксометра индукционный сигнал от приёмной катушки имеет очень малую амплитуду и передаётся на МШУ через коаксиальный кабель с импедансом 50 Ом. Для защиты входного усилителя от мощных ВЧ-импульсов, проходящих через приёмник из-за неидеальности переключатель приём/передача (переключатель П/П), на входе установлен аттенюатор 3 дБ в виде схемы типа П. Этот аттенюатор выполняет функцию ограничения тока и улучшения стабильности входного импеданса приёмного тракта. Сигнал после аттенюатора

подаётся через разделительный конденсатор $C30$ (2200 пФ) на вход микросхемы $MAR-6+$, что гарантирует полную развязку постоянного тока между линией передачи и микросхемой и устанавливает согласование входного импеданса с 50 Ом. Резисторы $R26$ и $R29-R30$ служат как элементы для настройки сопряжения при необходимости.

Микросхема $MAR-6+$ ($IC3$) питается через ВЧ-дрессель $L4$ ($TCCN-80+$), который выполняет роль дресселя для подавления, обеспечивая стабильное напряжение постоянного тока с линии +12 В и предотвращая проникновение ВЧ-сигналов в питание. Резисторы $R21$ и $R22$ задают ток смещения для $MAR-6+$ в соответствии с рекомендациями производителя, а конденсатор $C29$ (100 нФ) выполняет фильтрацию высокочастотных помех на линии питания. Совместная работа $L4$ и $C29$ образует LC -фильтр, обеспечивающий стабильность усиления в рабочем диапазоне 10–15 МГц. Выходной сигнал с ноги 3 $MAR-6+$ передается через разделительный конденсатор $C31$ (2200 пФ) на выходной разъём $J4$ с сохранением согласования импеданса 50 Ом с последующими каскадами.

Так как сигнал в ПМР-релаксметре передается через коаксиальный кабель 50 Ом, использование усилителя с входным импедансом 50 Ом важно для обеспечения целостности сигнала. Эта характеристика микросхемы $MAR-6+$ позволяет минимизировать отражения на линии передачи, улучшить качество согласования импеданса между приёмной катушкой и входным усилителем, а также гарантировать стабильность амплитуды и фазы сигнала в различных эксплуатационных условиях, включая изменения длины кабеля или конфигурации соединений. В отличие от дифференциальных структур с использованием $MOSFET BF998$, требующих сложной настройки LC -сеток и чувствительных к отклонениям параметров компонентов, $MAR-6+$ демонстрирует высокую повторяемость и стабильность в экспериментах. Благодаря этим характеристикам микросхема $MAR-6+$ полностью соответствует требованиям для входного усилителя приёмника ПМР-релаксметра, обеспечивая необходимый коэффициент усиления, стабильность в полосе частот и согласование с системой импеданса 50 Ом, и поэтому была выбрана в качестве основного элемента

усилителя в проектировании МШУ для настоящей диссертации.

Сигнал спин-эхо, после усиления в МШУ, будет дополнительно усилен в управляемом напряжением усилителе (УНУ) для увеличения напряжения сигнала с $\sim 1-10$ мВ до $1-1,5$ В, что соответствует рабочему диапазону схемы детектирования. В усовершенствованной структуре УНУ используется микросхема *AD603ARZ* компании *Analog Devices*, а также дополнительный усилитель на базе операционного усилителя *OPA132U* от *Texas Instruments* [87] для повышения общего коэффициента усиления (рис. 2.30).

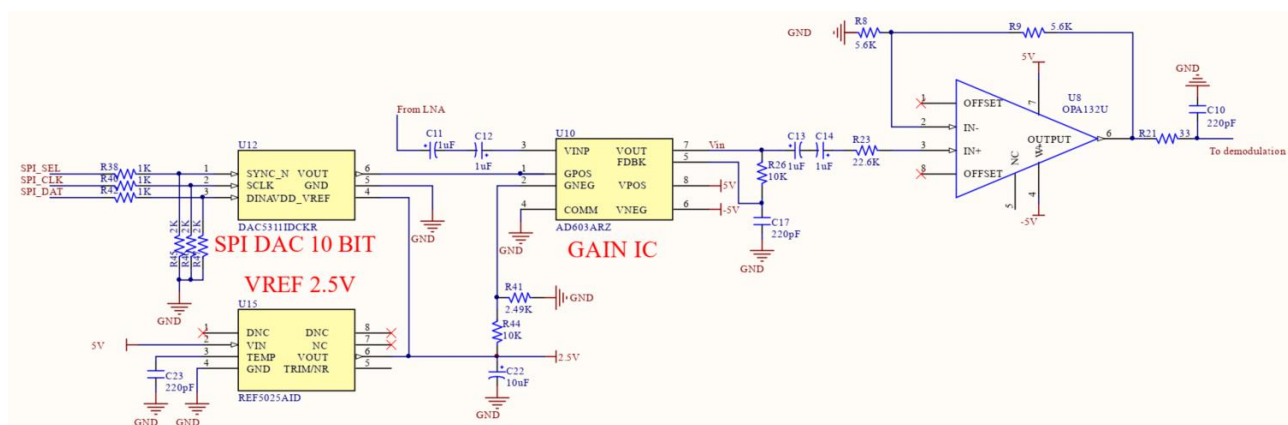


Рисунок 2. 30. Принципиальная схема УНУ

Микросхема *AD603* [88] предоставляет регулировку усиления от -1 дБ до $+41$ дБ с полосой пропускания 30 МГц, а *OPA132U* может быть настроен для обеспечения усиления до 130 дБ, что позволяет стабильно усиливать сигнал спин-эхо до рабочих значений для схемы детектирования. Для управления усилением микросхемы *AD603* используется управляющее напряжение, генерируемое 10 -разрядным ЦАП. Это напряжение задаётся через интерфейс *SPI* между ЦАП и ПЛИС. Микросхема УНУ спроектирована для обеспечения согласования импеданса 50 Ом как с выходом МШУ, так и с входом схемы детектирования, что исключает потери и отражения сигнала из-за рассогласования импедансов.

Схема детектирования, используемая в ПМР-релаксометре ПМР-*NP1* и ПМР-*NP2*, реализована по структуре асинхронного амплитудного детектора (детектора огибающей) с двухполупериодным выпрямлением и усилением низкочастотного сигнала (рис. 2.31).

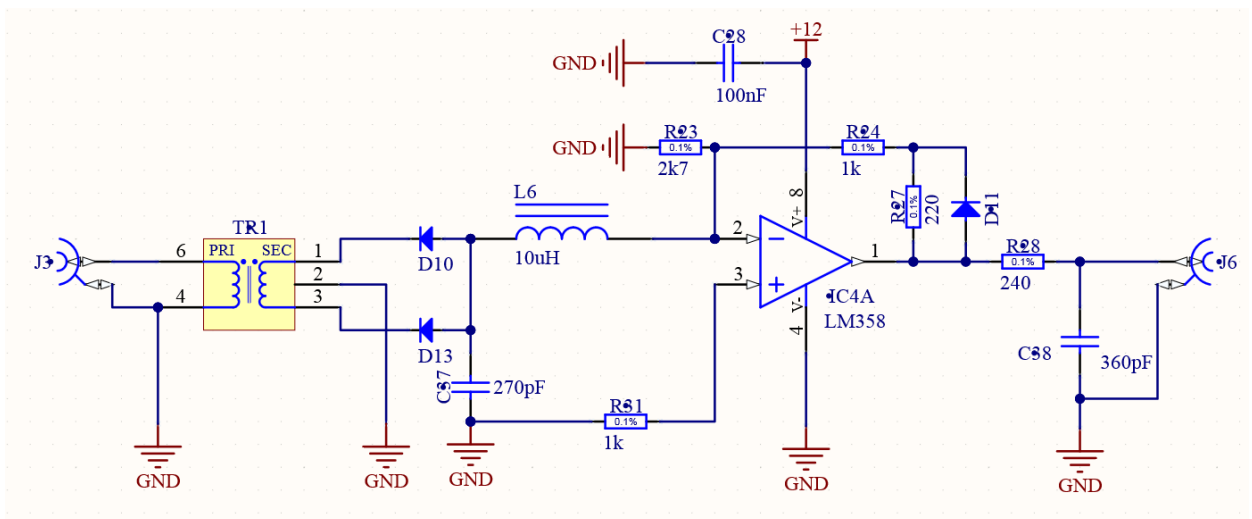


Рисунок 2. 31. Принципиальная схема схемы детектирования

Сигнал спин-эхо на частоте ν_0 после усиления в УНУ передаётся через трансформатор $TR1$ для изоляции постоянного тока, корректировки уровня сигнала и согласования импеданса между линией передачи и схемой детектирования. Вторичная обмотка трансформатора формирует два симметричных сигнала, которые выпрямляются диодами $D10$ и $D13$, комбинируются с конденсатором $C37$ для создания высокочувствительного двухполупериодного детектора и удаления большинства высокочастотных составляющих. После выпрямления сигнал фильтруется через индуктивность $L6$, чтобы полностью подавить высокочастотные компоненты перед подачей на операционный усилитель $LM358$ ($IC4A$). Операционный усилитель настроен по инвертирующей схеме и используется для инвертирования огибающей сигнала спин-эхо. Затем сигнал проходит через RC -фильтр с элементами $R28$ – $C38$ и поступает на вход АЦП в виде огибающей, пропорциональной амплитуде сигнала спин-эхо.

Эта структура схемы детектирования имеет явные преимущества по сравнению с синхронными I/Q -методами: она не требует точного фазового опорного сигнала, не зависит от амплитудно-фазового баланса между каналами, минимизирует требования к калибровке системы и обладает высокой надежностью благодаря простой структуре. Метод детектирования огибающей также естественно соответствует экспоненциальному характеру затухания сигнала

спин-эхо, что позволяет извлекать его амплитуду при низком отношении сигнал/шум без использования аналоговых умножителей, фазовых автоподстроек или сложной цифровой обработки, как в структурах I/Q . Благодаря этим характеристикам схема детектирования сохраняет стабильность в версиях $NP1$ и $NP2$, обеспечивая точность и воспроизводимость измерений в экспериментах ПМР-релаксометрии.

Эти улучшения обеспечили эффективную работу приёмника ПМР-релаксометра, упрощая процесс настройки и перенастройки для работы с различными резонансными частотами, что соответствует тенденциям развития компактных и мобильных устройств с оптимальным соотношением стоимости и конкурентоспособности по отношению к зарубежным аналогам.

2.3.5. ПМР-датчик и переключатель приём/передача релаксометра

В ПМР-релаксометре датчик подключается к передатчику и приёмнику через переключатель приём/передача (П/П). Комплекс, включающий ПМР-датчик и переключатель П/П, проектируется таким образом, чтобы его волновое (входное/выходное) сопротивление было согласовано со стандартной 50 Ом импедансной системой ПМР-релаксометра, включающей последовательность: передатчик – переключатель П/П (режим передачи) – датчик – переключатель П/П (режим приёма) – приёмник.

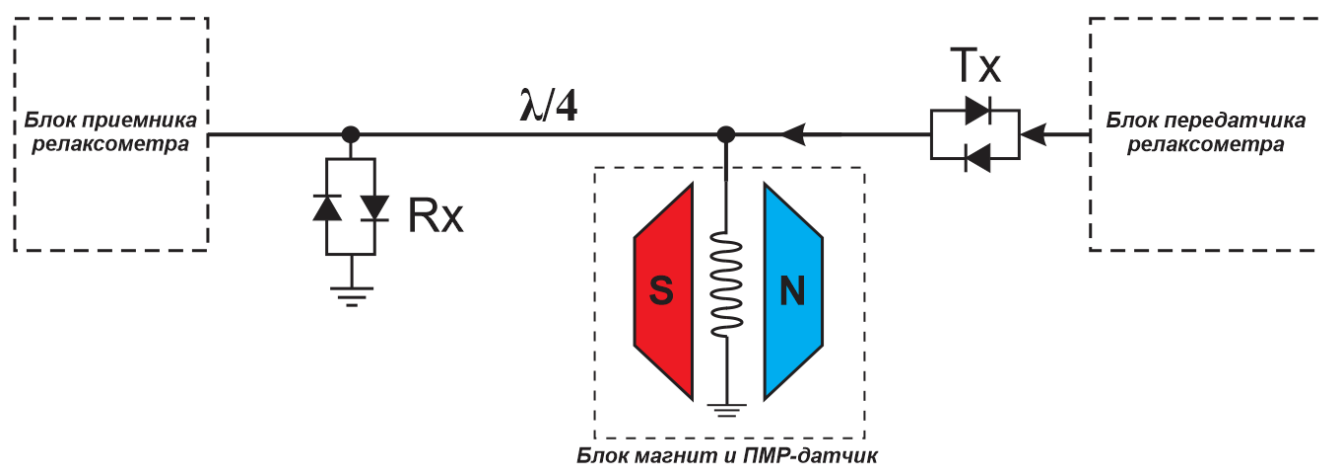


Рисунок 2. 32. Функционально-блоковая схема датчика и переключатель П/П

Переключатель П/П в ПМР–релаксометрии выполняет функцию защиты приёмника от высокомогных ВЧ–импульсов передатчика. Переключатель П/П, применённый в ПМР–релаксометре ПМР–NP3, относится к классической схеме, предложенной *Lowe* и *Tarr* в 1968 г. [89], и к её более современной модификации, описанной *David Hoult* [90], в которой используется отрезок коаксиального кабеля длиной $\lambda/4$ на рабочей (резонансной) длине волны и пары диодов, включённых параллельно навстречу друг другу (рис. 2.32). В качестве таких диодов обычно применяются быстродействующие диоды типа 1N4148 либо PIN–диоды. Принцип работы переключателя основан на нелинейной вольт–амперной характеристике диода. При прямом напряжении ниже $\sim 0,7$ В (для 1N4148) большинство диодов практически не проводит ток и обладает высоким сопротивлением. При достижении прямого напряжения $> 0,7$ В (для 1N4148) диод переходит в проводящее состояние с низким сопротивлением. Данное свойство используется в переключатель П/П для развязки передающего тракта от приёмного при формировании высокомогных ВЧ–импульсов. Диоды включаются попарно, параллельно и встречно, поскольку ВЧ–импульс является переменным сигналом, а не постоянным током.

В режиме передачи при подаче высокомогного ВЧ–импульса обе диодные пары переходят в низкоомное состояние и проводят ток. Свойство преобразования сопротивлений четвертьволновой линии (кабеля $\lambda/4$) обеспечивает формирование высокого эквивалентного сопротивления, подключённого параллельно передатчику и датчику, в результате чего практически вся мощность усилителя передатчика передаётся в ПМР–датчик, а приёмник надёжно защищается. В режиме приёма после окончания ВЧ–импульса амплитуда спин–эхо сигнала составляет величину значительно меньшую $0,7$ В, обе диодные пары остаются в высокоомном состоянии и не проводят ток, поэтому сигнал спин–эхо проходит по приёмному тракту непосредственно к приёмнику.



Рисунок 2. 33. ПМР–датчик релаксометра

Выбор меди обусловлен тем, что её удельное сопротивление примерно в 2 раза меньше, чем у алюминия, поэтому при одинаковых геометрических размерах сопротивление медной катушки приблизительно в 2 раза ниже, чем алюминиевой. При конструкции всего из 4 витков активным сопротивлением катушки можно пренебречь, и в этом случае импеданс датчика в основном определяется величинами индуктивного сопротивления X_L и ёмкостного сопротивления X_C . Тогда импеданс резонансного контура определяется выражением:

$$Z = \frac{j\omega L}{1 - \omega^2 LC} \quad (2.14)$$

На резонансной частоте ν_0 уравнение (2.14) эквивалентно следующему:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \Rightarrow 1 - \omega^2 LC = 0 \quad (2.15)$$

Низкое активное сопротивление также снижает тепловые потери мощности передаваемого сигнала и способствует более стабильной работе устройства. Кроме того, вследствие поверхностного эффекта на радиочастотах использование

медной ленты позволяет уменьшить габариты датчика без ухудшения условий протекания высокочастотного тока. В качестве резонансных конденсаторов выбраны керамические конденсаторы типа КСО–1 советского производства с допустимым напряжением пробоя 500 В. На рис. 2.34 приведена принципиальная схема ПМР–датчика.

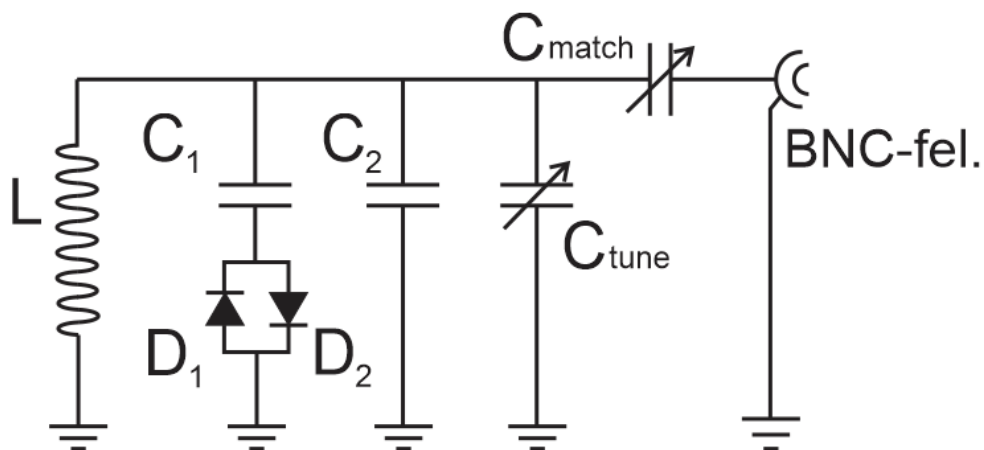


Рисунок 2. 34. Принципиальная электрическая схема ПМР–датчика

Конденсаторы C_1 , C_2 , C_{tune} , C_{match} совместно с индуктивностью L образуют параллельный LC –резонансный контур, резонансная частота которого равна рабочей частоте ПМР–релаксометра и определяется выражением:

$$\nu_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.16)$$

Где: $L = L_{КАТ} + L_{провод}$ – эквивалентная индуктивность резонансного контура, равная сумме индуктивности катушки ($L_{КАТ}$) и паразитной индуктивности соединительных проводников от катушки до элементов контура ($L_{провод}$);

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_{tune}} - \text{эквивалентная ёмкость резонансной системы;}$$

конденсатор C_{tune} используется для тонкой подстройки общей ёмкости и, следовательно, резонансной частоты датчика. Конденсатор C_{match} является переменным конденсатором, предназначенным для согласования импеданса резонансного контура с 50 Ом системой ПМР–релаксометра.

Важной характеристикой ПМР–датчика является добротность Q

резонансного контура. Добротность Q параллельного LC -контура (рис. 2.33) определяется как отношение электромагнитной энергии, запасаемой в контуре, к энергии, рассеиваемой за один период колебаний. Значение Q характеризует способность к приёму сигнала спин-эхо и суммарные потери системы, включая потери в катушке, потери в конденсаторах, защитных элементах, образце и согласованной нагрузке.

В идеализированном случае добротность резонансного контура определяется выражением:

$$Q = R_p \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (2.17)$$

Где: R_p – эквивалентное параллельное сопротивление потерь всего контура, L и C – эквивалентные индуктивность и ёмкость контура на рабочей частоте. Чем выше значение Q , тем меньше потери в контуре и тем выше частотная избирательность, что эквивалентно большему коэффициенту усиления напряжения на катушке в режиме приёма, а следовательно – улучшению отношения сигнал/шум (SNR) и чувствительности приёмника. Благодаря этому высокая добротность обеспечивает «пассивное усиление» сигнала спин-эхо, имеющего очень малую амплитуду и подверженного воздействию шумов.

Вместе с тем высокая добротность приводит к увеличению времени затухания (*ring-down*) контура после возбуждающего ВЧ-импульса и, следовательно, увеличивает «мёртвое время» (*dead time*) при переходе от режима передачи к режиму приёма. Это ограничивает возможность наблюдения сигнала спин-эхо на ранних временах после окончания возбуждающего импульса. Для уменьшения данного эффекта в структуру резонансного контура введена пара быстродействующих диодов (как правило, 1N4148), включённых встречно-параллельно (диоды $D1$ и $D2$ на рис. 2.34). Эта диодная пара выполняет роль дополнительной нагрузки, обеспечивающей ускоренное рассеяние энергии, накопленной в катушке, что позволяет существенно сократить времена *ring-up*, *ring-down* и *dead time* между режимами передачи и приёма при сохранении высокой добротности Q .

На практике для быстрого и достаточно точного определения добротности Q ПМР–датчика и степени согласования импеданса датчика с 50 Ом системой всего тракта используется векторный анализатор цепей (*VNA*). Результаты измерений датчика с использованием *nanoVNA* (рис. 2.35) показывают, что резонансная настройка контура осуществляется на частоте $f = 13,03$ МГц при коэффициенте отражения $S_{11} = -32$ дБ, что соответствует добротности $Q \approx 64$. Данное значение является достаточно высоким для экспериментов по измерению времени T_2 в многофазных жидкостях и для образцов с временем T_2 , не являющимся слишком коротким (порядка 50–100 мкс).

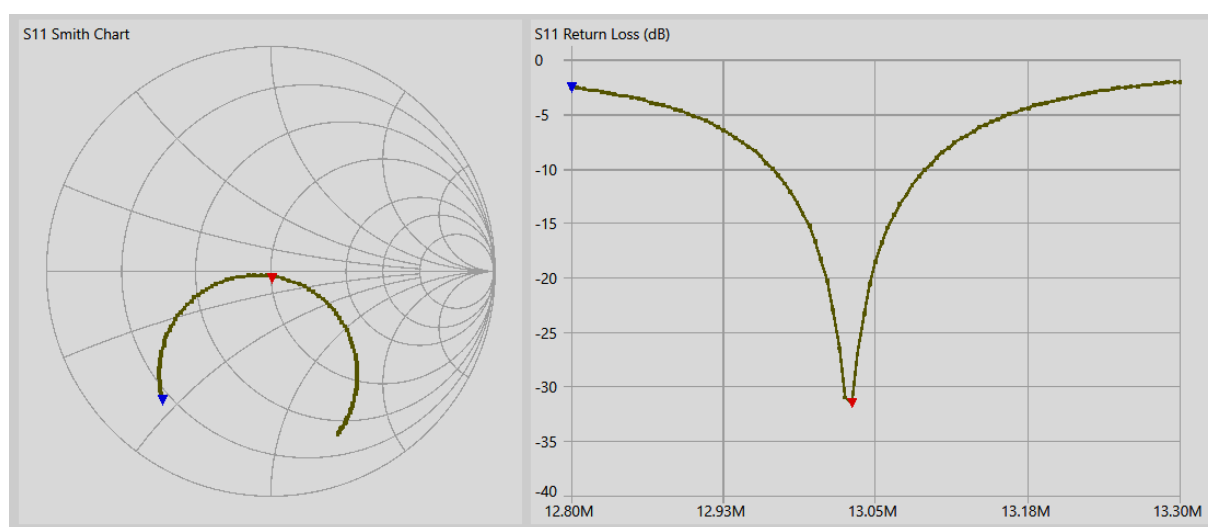


Рисунок 2. 35. Результат измерения S_{11} ПМР–датчика с использованием *nanoVNA*

2.4. Интерфейс программного обеспечения для настройки и анализа релаксометра ПМР–NPЗ.

Программное обеспечение настройки и анализа релаксометра ПМР–NPЗ выполняет функции задания параметров импульсной последовательности КПМГ, таких как: количество 180° –импульсов, интервал между 90° – и 180° –импульсами, длительность 90° – и 180° –импульсов, частота высокочастотного сигнала и др., а также содержит алгоритмы отображения и анализа результатов измерения времени спин–спиновой релаксации T_2 .

Интерфейс программного обеспечения состоит из двух основных частей. В левой части осуществляется мониторинг сигнала в виде затухающей амплитуды огибающей спин–эхо сигнала, а также расположен панель управления в виде

ползунков для задания рабочих параметров релаксометра и функциональные кнопки «Пуск», «Стоп», «Анализ».

Правая часть интерфейса представляет собой экран отображения результатов анализа с функциональными кнопками выбора и построения касательных на участках кривой сигнала после обработки данных. Функциональные кнопки, расположенные в нижней части интерфейса, обеспечивают сохранение и загрузку файлов с результатами анализа. Рассчитанные параметры релаксации отображаются в нижней части программного окна. На рисунке 2.36 представлена интерфейсная форма программного обеспечения настройки и анализа релаксометра ПМР–NP3.

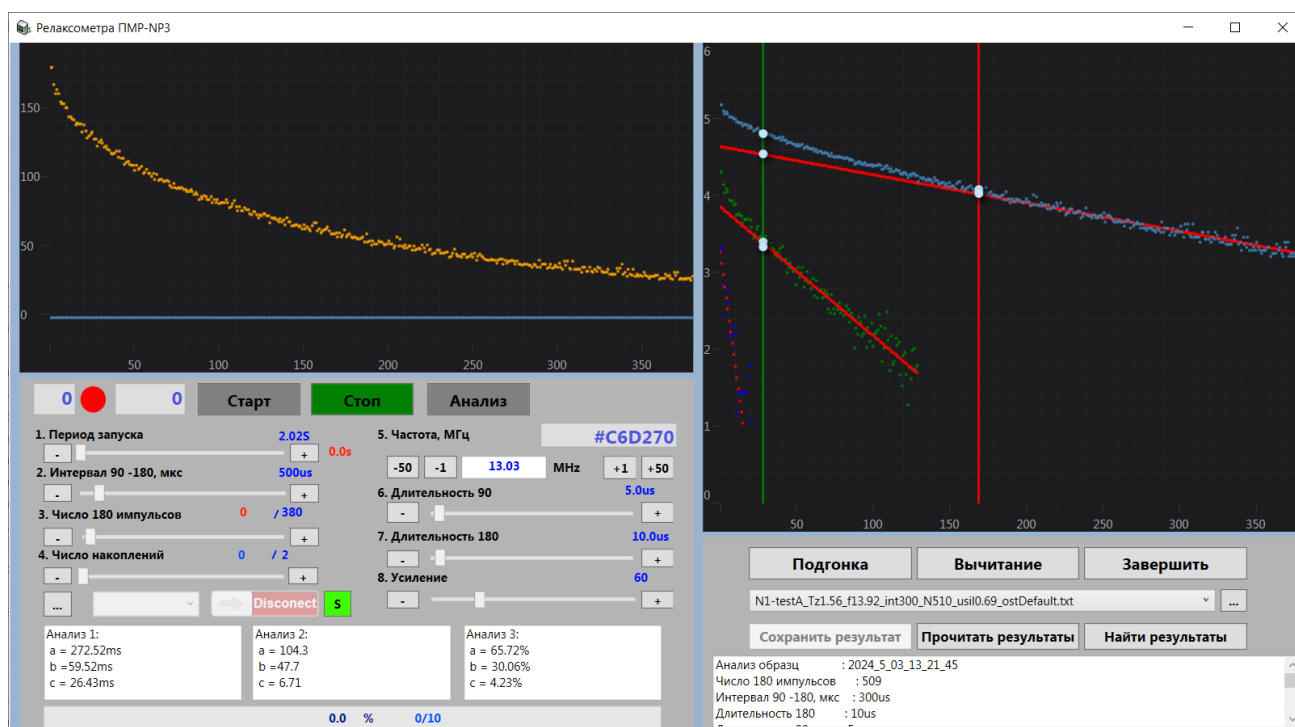


Рисунок 2. 36. Внутренний вид релаксометра ПМР–NP3

По сравнению с программным обеспечением релаксометра ПМР–NP2, программное обеспечение ПМР–NP3 обладает меньшими требованиями к аппаратным ресурсам и совместимо с вычислительными системами различной конфигурации. Экспериментальные испытания на мини–компьютерах и встраиваемых вычислительных платформах типа *LattePanda* показали стабильную работу программного обеспечения без перегрузки аппаратных ресурсов. В

программное обеспечение интегрирован модуль автоматического подключения к ПЛИС *Z-turn* по интерфейсу *Ethernet* с использованием *IP*-адреса 192.168.10.1. Применение *Ethernet*-интерфейса обеспечивает передачу данных с более высокой скоростью и автоматическое восстановление соединения без необходимости повторной настройки при отключении питания или перезапуске компьютера. Кроме того, программное обеспечение расширено возможностью прямой установки фазового угла ВЧ-сигнала в импульсной последовательности КПМГ, а также поддерживает передачу данных по протоколу *COM-USB* с микроконтроллером *ESP2866* на передающей станции устройства для интеграции релаксометра ПМР в сеть ПИВ.

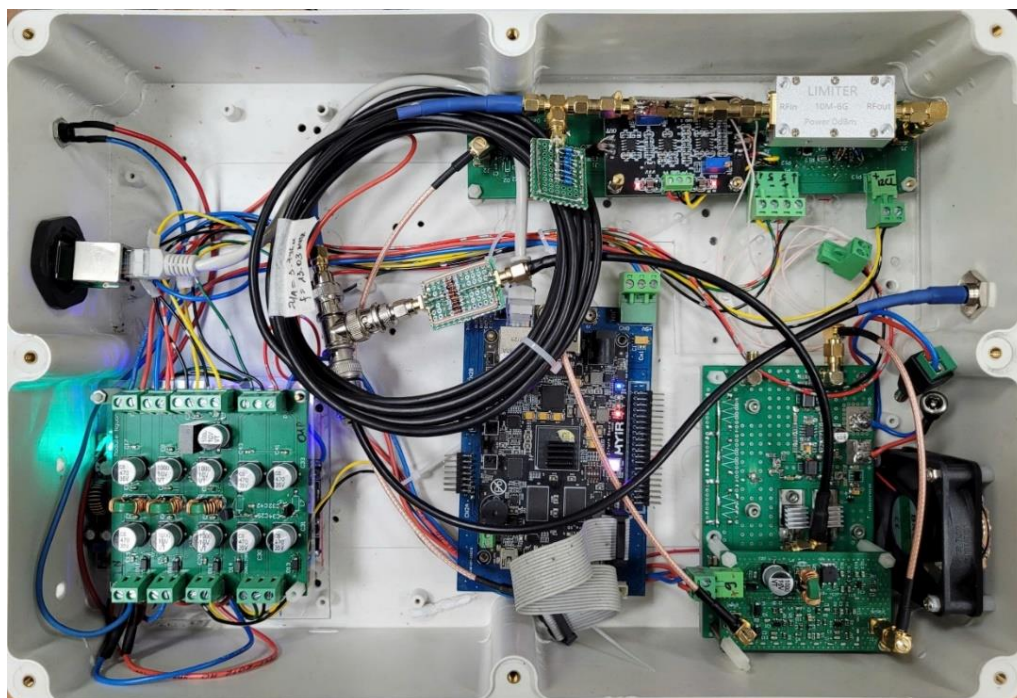


Рисунок 2. 37. Внутренний вид релаксометра ПМР–*NP3*

В результате усовершенствований схемотехники прототипов релаксометра ПМР разработан новый вариант релаксометра ПМР–*NP3*, представленный на рисунок 2.37. В таблице 2 представлено сравнение основных параметров портативного релаксометра ПМР–*NP3* с несколькими лабораторными приборами.

Таблица 2. 2. Приведены технические характеристики релаксометра ПМР–NP3 в сравнении с лучшими аналогами и прототипом

Технические параметры	Релаксометр ПМР–NP3п (КГЭУ, 2025)	Релаксометр ПМР–NP2п (КГЭУ, 2019)	Релаксометр ЯМР 08/РС (КБ РК, 2007)	Minispec Pc 120 (Bruker, ФРГ)
Ошибка измерений времен /амплитуд, %	3/2	3/2	4/2	3
Чувствительность $K = v^2 V$, МГц ² ·см ³	2700 – 4150	3608	1344	1600–6400
Резонансная частота, МГц	6 – 19	13.92–18.45	5 – 9	10 – 40
Диаметр датчика, мм	10–30	10–30	30	10– 40
Питание:	+24 В, сеть ≈ 220 В	+12 В, сеть ≈ 220 В	сеть ≈220 В	сеть ≈220 В
Потреб. мощность, ВА	16.4	40	60	300
Габариты:Электр., см	10x25x30	10x25x30	32x20x39	106x54x43
Магнита, см	14x14x15	20x15x10	20x15x10	106x54x43
Масса, кг	10	16	25	80

2.5. Разработка стабилизатора температуры для магнита образцов с терморегулятором

Несмотря на то, что метод ПМР позволяет получать полную информацию о составе и соотношении компонентов в многокомпонентных жидких смесях без необходимости использования большого объёма образца и без его разрушения [91, 92], ПМР–релаксометр отличается высокой чувствительностью к изменениям температуры в процессе эксплуатации. В своей работе [93] Кашаев Р. С. показал явно выраженную зависимость величины магнитного поля H_0 от температуры $t(^{\circ}C)$. Для постоянных магнитов, изготовленных из сплава $NdFeB$, изменение магнитного поля от температуры, приводит к изменению резонансной частоты:

$$\Delta \nu_0(\text{кГц}) = 13036(\text{кГц}) - 4.47\{t(^{\circ}C) - 15\}(\text{кГц} / ^{\circ}C) \quad (2.18)$$

В случае отсутствия теплового равновесия между образцом и магнитом, когда образец охлаждается (или нагревается) отдельно от магнита, это приводит к погрешностям при измерении времён релаксации. Смещение резонансной частоты

достигает $\pm 4,5$ кГц при изменении температуры окружающей среды на ± 5 °С. Кроме того, погрешность магнитного поля дополняется вкладом температурного градиента на резонансной катушке ПМР–датчика и составляет $\pm 0,3\%$.

Эксперименты показали, что ПМР–измерительное устройство работает наиболее стабильно и с наивысшей точностью при поддержании температуры в диапазоне 30–45°С. Поскольку температура окружающей среды и соответственно температура исследуемых образцов существенно изменяются в процессе измерений, это обосновывают необходимость использования стабилизатора температуры для магнита и образцов, что обеспечивает стабильную работу релаксометра. Прототип стабилизатора температуры, представленный в работе [93], послужил исходной идеей для дальнейшей разработки, модернизации и совершенствования устройства.

Стабилизатор температуры для магнита и образцов выполнен в виде двух отдельных отсеков, теплоизолированных друг от друга. Всё устройство размещено в корпусе из высококачественного ПВХ с ручкой и имеет габаритные размеры 435 × 250 × 215 мм (рис. 2.38). Малый отсек содержит терморегулятор и элементы его настройки, сетевой выключатель, индикаторы тока и напряжения, а также источник питания постоянного тока 12 В, 5 А. Большой отсек содержит узел магнитной сборки Хальбаха с ПМР–датчиком, держатель пробирки с образцом, температурный датчик терморегулятора, а также нагревательный и охлаждающий блоки. Теплоносителем устройства является воздух внутри большого отсека.

Кроме того, крышка корпуса оснащена двумя держателями с мягкой поверхностью для фиксации и защиты пробирок с запасными образцами, используемыми при измерениях различных материалов. Теплоизоляционная перегородка между двумя отсеками обеспечивает целевое использование тепла, создаваемого нагревательными блоками, и предотвращает влияние температурных перепадов на электронные устройства, в особенности на терморегулятор. На рис.2.38 представлена конструкция стабилизатора температуры для магнита и образцов с терморегулятором, включающая следующие элементы: 1 – корпус устройства; 2 – охлаждающий блок; 3 – нагревательный блок; 4 – пробирка с

образом для предварительного выравнивания температуры; 5 – преобразователь напряжения 220В AC в 12В 5А DC; 6 – многослойный МХ с ПМР–датчиком; 7 – разъём для подключения ПМР–датчика к релаксометру; 8 – терморегулятор; 9 – вольт–амперметр; 10 – сетевой выключатель; 11, 12 – держатели резервных пробирок.

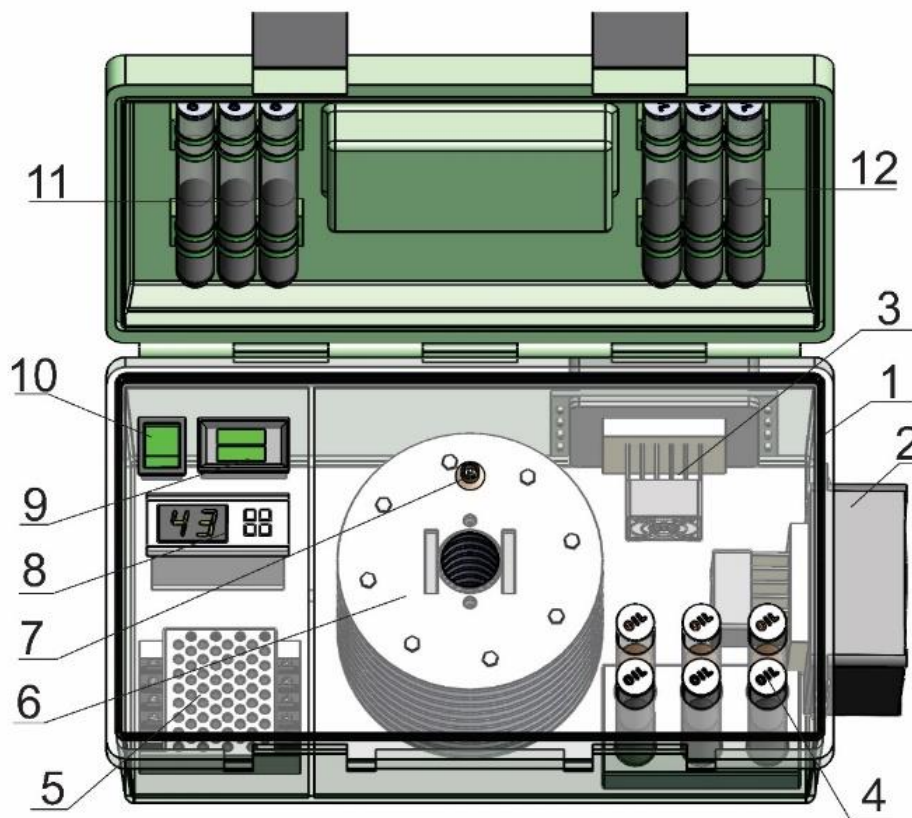


Рисунок 2.38. Общая конструкция стабилизатора температуры для магнита и образцов с терморегулятором

Охлаждающий и нагревательный блоки (рис. 2.39) используют термоэлектрический модуль Пельтье *TEC1–12706* (12 В, 6 А) в качестве нагревательного/охлаждающего элемента. Особенностью данного модуля является то, что при подаче постоянного напряжения ± 12 В одна его сторона нагревается/охлаждается, а противоположная – охлаждается/нагревается. Таким образом, изменение ориентации тока модуля позволяет переключаться между режимами нагрева и охлаждения. Конструкция обоих блоков одинакова. Они включают элементы: 13 – малый вентилятор; 14 – малый алюминиевый радиатор;

15 – большой алюминиевый радиатор; 16 – большой вентилятор; 17 – термоэлектрический модуль; 18 – уплотнительная прокладка.

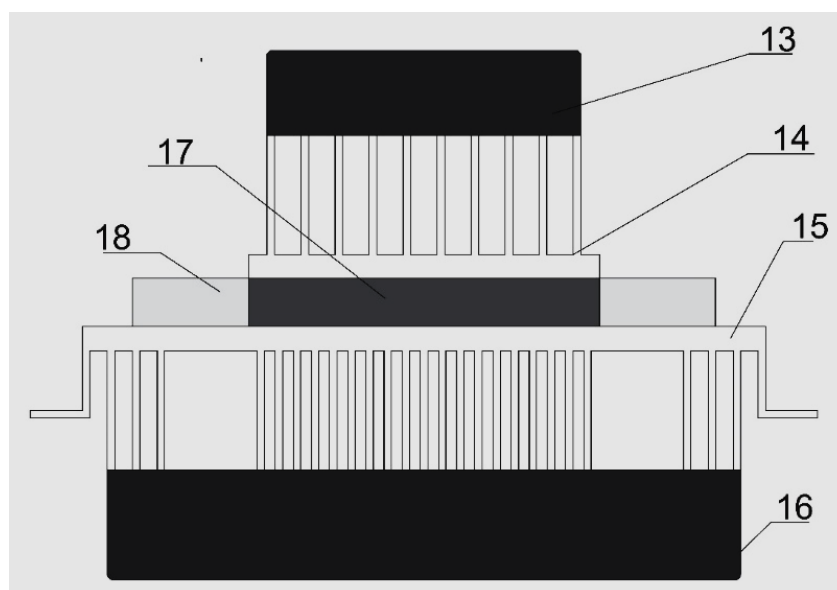


Рисунок 2.39. Продольное сечение нагревательного (или охлаждающего) блока

Между поверхностью термоэлектрического модуля и алюминиевыми радиаторами нанесён тонкий слой теплопроводящей пасты для улучшения теплового контакта. Для нагревательного блока малый радиатор установлен на горячей поверхности, а большой радиатор – со стороны холодной поверхности. Для охлаждающего блока конфигурация выполнена в обратном порядке.

Теплоотводящая поверхность большого радиатора расположена снаружи пластикового корпуса и снабжена бесщёточным вентилятором размером 10×10 см для принудительного охлаждения. Рабочая поверхность термоэлектрического модуля расположена внутри корпуса, на ней установлен меньший радиатор с малым вентилятором для усиления воздушного потока внутри большого отсека.

Терморегулятор использует температурный датчик *DS18S20*, установленный в нижней части зазора магнита для измерения температуры. Данные с температурного датчика передаются на терморегулятор, который сравнивает текущую температуру с заданным значением и принимает решение о подаче тока на тепловой блок для нагрева или охлаждения. Пользовательский интерфейс терморегулятора включает дисплей с семисегментными светодиодами для отображения температуры и параметров настройки, а также четыре

функциональные кнопки. Кнопка «Питания» используется для включения и выключения терморегулятора. Кнопка «S» служит для выбора режима, а кнопки «▲» и «▼» – для изменения параметров настройки (рис. 2.40).

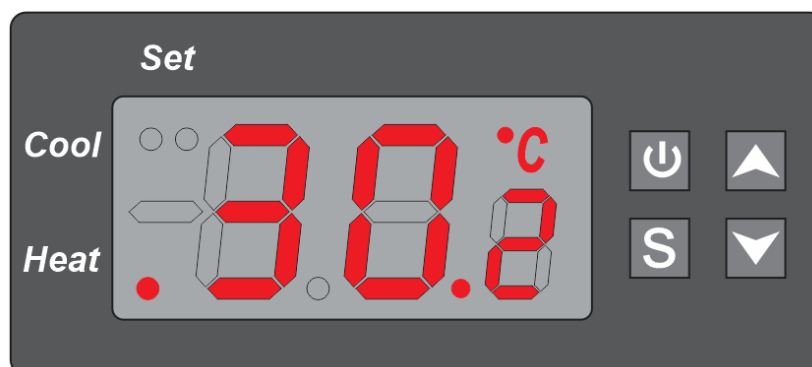


Рисунок 2.40. Интерфейс терморегулятора и настройка температуры.

Испытания стабилизатора температуры (рис. 2.41) проводились при установленной рабочей температуре 30 °С, допустимом отклонении $\pm 0,5$ °С и времени задержки 1 минута, с использованием образца с топливом, при размещении устройства в помещении с температурой 19,3 °С.



Рисунок 2. 41. Разработанный измерительный комплекс релаксометр ПМР–НРЗ с системой термостатирования магнита Хальбаха.

Результаты испытаний показали, что интервал между переключением режимов охлаждения и нагрева составляет 96 сек. Время, необходимое для достижения теплового равновесия между магнитом и образцом при переходе от

комнатной температуры $19,3^{\circ}\text{C}$ к $30 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$, составило 16 мин 40 с. Потребляемый ток устройства достигал максимального значения около 4,3А при питании термоэлектрического модуля и постепенно снижался до нуля при его отключении. Общая масса устройства (включая многослойный МСХ) не превышает 9 кг, термоэлектрические модули обеспечивают длительный срок службы, не подвержены износу, не содержат движущихся частей и не используют химические хладагенты, что делает устройство безопасным для здоровья и окружающей среды.

2.6. Выводы по главе 2

В главе выполнена разработка, моделирование, экспериментальная реализация и испытания ключевых узлов ПМР–релаксометра: магнитной системы, прибора контроля индукции магнитного поля, электронных блоков передатчика и приёмника, стабилизатора температуры для магнита и образцов.

1. Разработана и реализована многослойная магнитная сборка Халбаха (МСХ), предназначенная для применения в портативном ПМР–релаксометре. Магнитная система выполнена в виде 10 слоёв МСХ, каждый слой состоит из трех коаксиальных колец с 16 постоянными магнитами $NdFeB-35$. Показано, что использование многослойной структуры и межслойных прокладок позволяет существенно повысить индукцию и однородность магнитного поля в рабочем зазоре при сохранении малых габаритов и массы конструкции.

2. Экспериментально подтверждено, что разработанный магнит обеспечивает магнитное поле $B_0 = 0,3068$ Тл, соответствующее резонансной частоте протонов $\nu_0 \approx 13,036$ МГц, при однородности $\Delta B/B_0 \approx 260$ ppm/cm³. Полученные параметры превосходят характеристики ранее разработанных однокольцевых конструкций МСХ и обеспечивают возможность использования магнита в ПМР–релаксометрии.

3. Для измерения и контроля магнитного поля в зазоре МСХ разработан измеритель индукции магнитных полей на основе линейного датчика Холла AD22151YRZ. Реализована система цифрового считывания и визуализации данных

с использованием микроконтроллера *Arduino*, что позволило обеспечить достаточный диапазон измерений 0–1,25 Тл, стабильность и воспроизводимость результатов.

4. На основе технологии прямого цифрового синтеза разработаны электронные блоки ПМР–релаксометра: генератор ВЧ–сигналов с использованием микросхемы *AD9854*, цифровую систему формирования импульсных последовательностей КПМГ, а также схемотехнические решения, обеспечивающие фазовую непрерывность, точное управление амплитудой и фазой импульсов и высокую временную разрешающую способность.

5. Реализована цифровая система обработки и управления на базе ПЛИС *Zynq–7020*, сочетающая программируемую логику и двухъядерный процессор *ARM*. Данная архитектура обеспечила высокую гибкость управления, возможность формирования сложных импульсных последовательностей в реальном времени и высокоскоростной обмен данными с компьютером по интерфейсу *Ethernet*.

6. Разработаны и экспериментально исследованы ВЧ–тракты передатчика, включающие полосовые фильтры, буферные усилители и усилитель мощности класса *AB*. Показано, что применение специализированных ВЧ *MOSFET* (*RD16HHF1*) обеспечивает формирование 90° и 180° импульсов с малыми временами нарастания и спада, низким уровнем искажений и выходной мощностью достаточной для возбуждения катушки ПМР–датчика при приемлемой энергетической эффективности.

7. Разработан приёмный тракт ПМР–релаксометра, включающий малошумящий усилитель (МШУ) на основе *MMIC MAR–6+*, управляемый напряжением усилитель (УНУ) на базе *AD603* и схему амплитудного детектирования. Показано, что выбранная архитектура обеспечивает высокую чувствительность, устойчивость к помехам и согласование с 50 Ом кабелем, а также упрощает настройку и повышает воспроизводимость характеристик по сравнению с дискретными дифференциальными схемами на *MOSFET*.

8. Разработан ПМР–датчик на основе параллельного *LC*–контура,

совмещающего функции передачи/приёма ВЧ–сигнала, реализована схема приёма–передающего переключателя с использованием четвертьволнового коаксиального отрезка и быстродействующих диодов. Экспериментально определена добротность датчика $Q \approx 64$, что дает компромисс между чувствительностью и временем переходных процессов при измерениях T_2 в диапазоне 50–100 мкс.

9. Разработан и испытан стабилизатор температуры для магнита и образцов с терморегулятором, обеспечивающий поддержание заданной температуры в диапазоне 30–45°C с точностью $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Показано, что использование термоэлектрических модулей Пельтье позволяет обеспечить быстрый выход на тепловое равновесие, компактность конструкции, низкий уровень шума и экологическую безопасность.

10. Комплексная апробация всех разработанных узлов в составе ПМР–релаксометра ПМР–NP3 подтвердила работоспособность предложенных технических решений, их взаимную согласованность и пригодность для применения в автономных релаксометрах, а также в составе ПМР–анализаторах экспресс–контроля многокомпонентных жидких и гетерогенных систем.

Таким образом, в главе II решена задача разработки и экспериментальной проверки аппаратной базы ПМР–релаксометра нового поколения, обеспечивающей сочетание компактности, энергетической эффективности, высокой стабильности и достаточной чувствительности для практических применений.

3. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АНАЛИТИЧЕСКОГО И НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ ОБЪЕКТОВ КОНТРОЛЯ – АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ АНАЛИЗАТОР ПМРА–IV

Практически все промышленные технологии – обработка и изготовление химических и пищевых продуктов, нефтедобыча, нефтепереработка, медицина и экологический мониторинг, осуществляются с многофазными потоками. На рис.3.1. представлены структуры потоков в трубах.

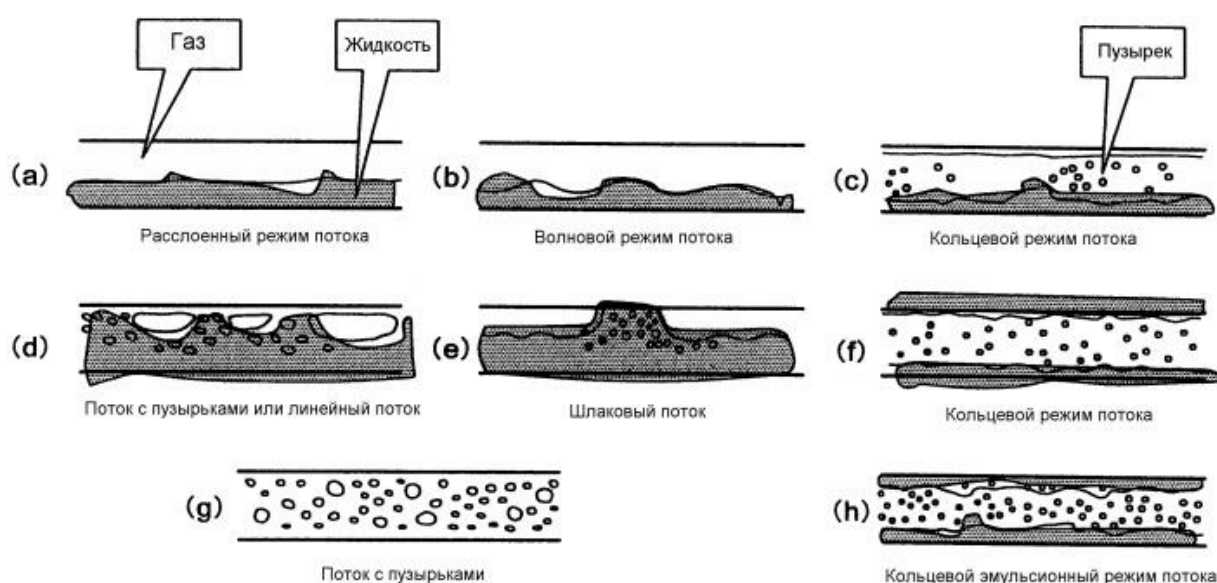


Рисунок 3. 1. Структуры многофазных потоков в горизонтальных трубах

В данной главе представлена разработка автоматизированного проточного ПМР–анализатора четвертого поколения ПМРА–IV, предназначенного для аналитического и неразрушающего контроля физико–химических свойств многофазных потоков скважинной жидкости и сырой нефти в условиях цифрового месторождения. Особенностью объектов контроля является многофазность потоков (нефть–вода–газ), высокая изменчивость состава, наличие эмульсионных и расслоенных структур, а также повышенные требования к пожаро и взрывобезопасности оборудования. Указанные особенности обуславливают необходимость создания автоматических, энергоэффективных и интеллектуальных измерительных систем, обеспечивающих проточный экспресс–

анализ без отбора проб и применения химических реагентов.

Актуальность разработки определяется необходимостью проточного экспресс–контроля дебита и концентраций компонентов многофазного потока на этапах добычи и подготовки нефти. Данная задача является актуальной в рамках реализации «Стратегии–30» и цифровой трансформации нефтяных месторождений в «умные» (*smart*) цифровые месторождения (ЦМ), внедрение которых, по данным промышленных компаний, в частности ПАО «Лукойл», обеспечивает прирост добычи на 10–25 % и снижение энергопотребления до 8 % [1, 2].

Цифровизация зрелых и истощенных месторождений с трудно извлекаемыми запасами (ТРИЗ) позволяет переводить их в оптимальные стадии эксплуатации и продлевать срок эффективной разработки [94, 95]. Так, реализация концепции «Цифровое месторождение» ПАО «Роснефть» на Илишевском месторождении позволила обеспечить восстановление рентабельной эксплуатации объекта с ТРИЗ. Аналогичные задачи актуальны и для крупнейших месторождений, таких как Ромашкинское месторождение Республики Татарстан, где эксплуатируется порядка 16 000 скважин, добывающих нефть со средним водосодержанием ≈ 87 % и потребляющих до 48 % всей электроэнергии, что обуславливает необходимость формирования и внедрения элементов цифрового месторождения.

Реализация концепции ЦМ требует разработки и внедрения новых проточных автоматических программно–аппаратных комплексов и экспресс–методов контроля, обеспечивающих автоматизацию технологических процессов, повышение экологической безопасности и снижение антропогенного воздействия на окружающую среду. Данные направления составляют основу ключевых целей цифрового месторождения, включающих создание «высокотехнологичных аппаратных средств» и реализацию принципов «сбора данных и интеграции».

Дополнительно возникает необходимость расширения диапазона измерений характеристик скважинной жидкости, нефти, водонефтяных эмульсий, сжиженных газов и пластовых вод, а также снижения погрешностей,

достигающих $\pm 15\%$ при прямых измерениях и до $\pm 30\%$ при отборе проб [96,97]. Существенными ограничивающими факторами при создании и эксплуатации систем цифрового месторождения являются пожароопасность углеводородного сырья, значительные площади и труднодоступность нефтепромысловых территорий, а также размещение оборудования на морских платформах.

Преодоление указанных трудностей возможно за счет использования разработанного на кафедре «Приборостроение и мехатроника» КГЭУ единого программно–мехатронного комплекса – ПМР–анализатора ПМРА–IV четвертого поколения, предназначенного для контроля физико–химических свойств нефтяных дисперсных систем независимо от формы их существования (смеси или расслоенные структуры). Применяемый метод ПМР–релаксометрии не требует подготовки проб и использования реактивов, обеспечивает время анализа менее 2 минут, а минимизация погрешностей достигается за счет оптимизированного проточного пробоотбора и применения градуировок по стандартным образцам с высокими коэффициентами корреляции R^2 , близкими к 1.

3.1. Сравнение с лучшим зарубежным аналогом

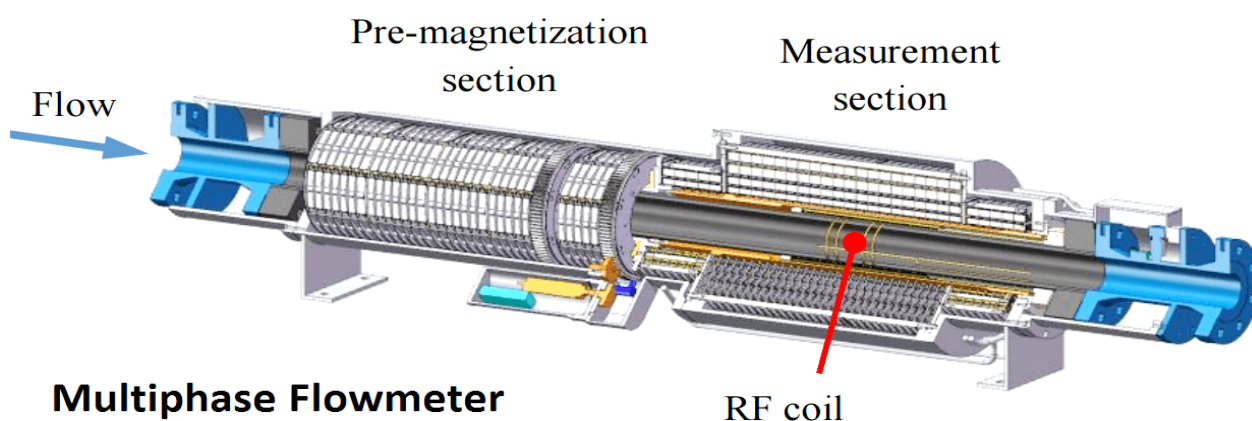
В настоящее время наиболее совершенным зарубежным прибором анализа многофазного потока, основанным на технологии ЯМР, является многофазный расходомер *MFMA–5000* (рис. 3.2а), разработанный компанией *KROHNE* (Норвегия) [9]. Данный прибор рассматривается как отраслевой стандарт в области многофазных ЯМР–измерений и используется в качестве базовой эталонной системы при формировании концепций и разработке новых анализаторов ЯМР–потока, включая устройство ПМРА–IV [98–101].

Прибор *MFMA–5000* предназначен для одновременного измерения расходов нефти, воды и газа в многофазном потоке без применения дополнительных методов фазового разделения, что принципиально отличает его от традиционных комбинированных систем многофазного измерения [102–104]. Конструктивно прибор выполнен по схеме с полным проходным сечением измерительного трубопровода, при которой внутренний диаметр не уменьшается и отсутствуют

элементы, внедряемые в поток. Такое конструктивное решение позволяет минимизировать гидравлические потери, снизить вероятность образования отложений и повысить надёжность эксплуатации в промышленных условиях [102].



а) Внешний интерфейс многофазного расходомера *MFMA*



б) Внутренняя структура многофазного расходомера *MFMA*

Рисунок 3. 2. Многофазный расходомер *MFMA* (*Crohne, Norgey*)

Габаритная длина устройства составляет около 3,5 м, высота – порядка 0,9 м. Измерительный участок выполнен в виде трубопровода из эпоксидного стеклопластика, армированного стекловолокном, с номинальными диаметрами 2", 3" и 4", что соответствует приблизительно 50,8 мм, 76,2 мм и 101,6 мм [9]. Магнитная измерительная система основана на использовании магнита типа МСХ, состоящего из двух магнитных колец общей длиной около 90 см и отношением длины к радиусу рабочего зазора порядка 6. Индукция магнитного

поля в рабочем зазоре достигает $B_0 \approx 0,2$ Тл, что соответствует протонной резонансной частоте $\nu_0 \approx 8-8,5$ МГц [102, 103].

Однородность магнитного поля обеспечивается за счёт пассивной коррекции и составляет порядка 1000 *ppm* в измерительном объёме цилиндрической формы длиной 10 см и диаметром 10 см. Радиочастотная катушка датчика выполнена по схеме соленоида с внутренним диаметром 12 см и длиной 12,5 см и размещена внутри градиентной катушки с внутренним диаметром 15 см и длиной 40 см, установленной соосно в центре основного магнита [9, 102].

С целью повышения точности измерений и увеличения амплитуды ЯМР–сигнала прибор дополнительно оснащён узлом предварительного намагничивания, включающим три магнита МСХ с индукцией магнитного поля 0,2 Тл и длиной каждого магнита около 30 см. Полная масса устройства зависит от конфигурации и диаметра измерительного трубопровода и находится в пределах 1100–1200 кг, при среднем энергопотреблении порядка 180 ВА и максимальном 350 ВА [9].

Относительная погрешность измерений составляет 3–5 % для жидкой фазы и 8–10 % для газовой фазы, при повторяемости в пределах 1–2 %, что соответствует требованиям промышленного мониторинга и оперативного управления технологическими процессами [9]. Вместе с тем прибор *MFMA–5000* ориентирован преимущественно на измерение расходов и фазового состава потока и не обеспечивает непосредственного определения физико–химических свойств жидких компонентов, а его значительные габариты, большая масса и повышенное энергопотребление ограничивают применение в распределённых интеллектуальных системах цифровых нефтяных месторождений [104]. Но *MFMA–5000*, являясь наиболее передовым зарубежным представителем систем ЯМР–анализа многофазных потоков, задаёт уровень технических решений и эксплуатационных характеристик, по отношению к которому разработанный анализатор ПМРА–IV является обоснованным объектом сравнительного анализа.

3.2. Влияние на сигнал спин–эхо предварительного намагничивания потока измеряемой водо–нефтяной смеси

В проточных системах протонной магнитно–резонансной релаксометрии величина сигнала спин–эхо в значительной степени определяется уровнем намагниченности (поляризации) протонов измеряемой среды в момент входа потока в измерительную зону релаксометра. В многофазных магнитно–резонансных измерительных приборах, применяемых в нефтегазовой отрасли, в том числе в системах типа *MFMA–5000* фирмы *KROHNE*, формирование намагниченности потока осуществляется преимущественно в пределах основного измерительного магнитного поля [9, 98].

В условиях проточного режима уровень намагниченности измеряемой среды определяется не только величиной магнитного поля, но и способностью отдельных фаз потока к поляризации при движении в магнитном поле. Для водонефтяных смесей данная способность существенно различается для водной и нефтяной фаз, что непосредственно отражается на амплитуде регистрируемого сигнала спин–эхо и чувствительности измерений фазового состава [9, 98].

В анализаторе ПМРА–IV для повышения уровня поляризации протонов перед измерением используется узел предварительного намагничивания, размещенный перед измерительной зоной релаксометра. Такое конструктивное решение обеспечивает формирование повышенной намагниченности потока еще до его поступления в измерительный магнит и позволяет более полно реализовать магнитно–резонансный отклик отдельных компонентов водонефтяной смеси [9].

На рисунке 3.5а представлены распределения намагниченности S_{111} (Тл) для воды (синим цветом) и нефти (красным цветом) в зависимости от положения потока при его прохождении через область предварительного намагничивания (0–0,10 м) и измерительную зону релаксометра (0,10–0,12 м). Видно, что при наличии магнита предварительного намагничивания намагниченность водной фазы на входе в измерительную зону достигает значения порядка $S_{111} \approx 0,16$ Тл, тогда как для нефтяной фазы она составляет около $S_{111} \approx 0,5$ Тл.

В случае отсутствия предварительного намагничивания (рис. 3.5б) уровень

намагниченности потока на входе в измерительную зону существенно ниже и составляет для воды около $S_{111} \approx 0,034$ Тл, а для нефти – порядка $S_{111} \approx 0,32$ Тл. Таким образом, применение предварительного намагничивания приводит к увеличению уровня намагниченности водной фазы в ≈ 5.3 раза, а нефтяной в ≈ 1.56 раза, что подтверждается результатами моделирования и экспериментальных исследований [98].

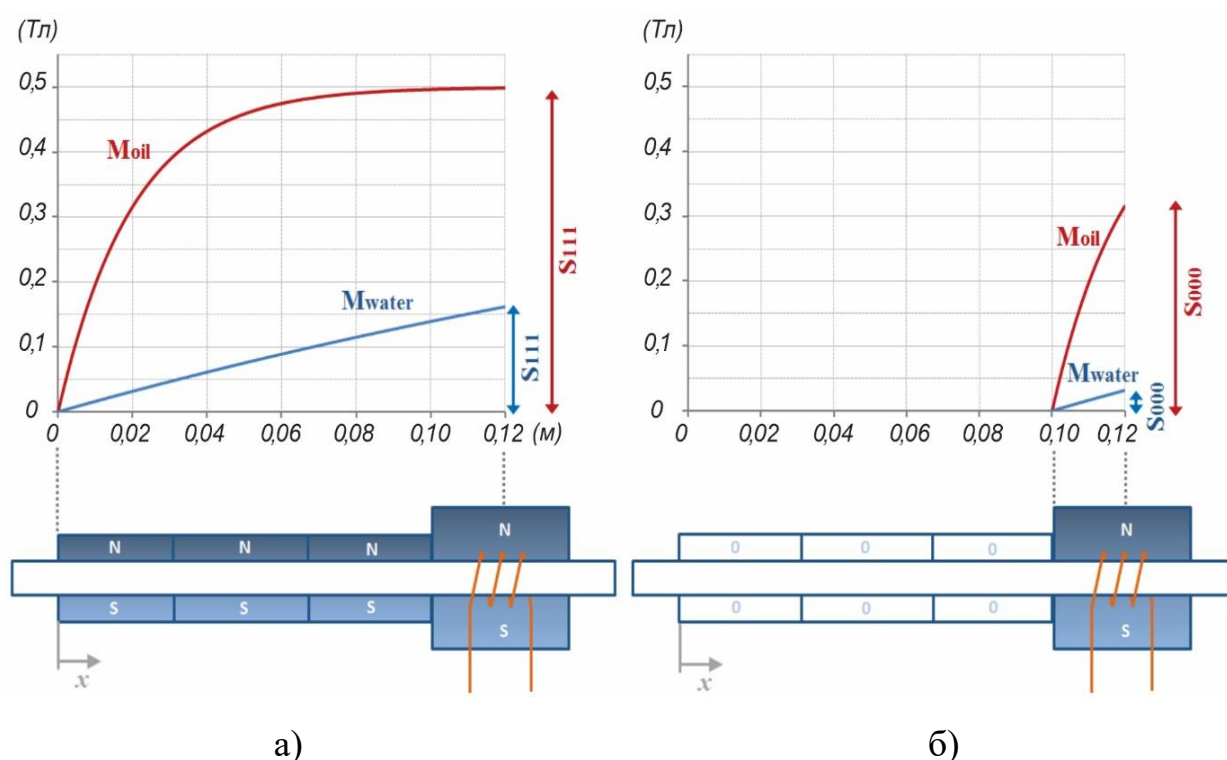


Рисунок 3. 3. Сигналы S_{111} для воды и нефти при подмагничивании в специальном магните и при измерении в магните релаксометра.

Полученные результаты наглядно демонстрируют различия в способности воды и нефти к поляризации в магнитном поле при движении потока. Существенно более выраженный рост намагниченности водной фазы имеет важное практическое значение, поскольку именно сигнал от воды во многом определяет чувствительность и достоверность измерений обводненности и фазового состава водонефтяных смесей [107].

Таким образом, использование узла предварительного намагничивания в составе анализатора ПМРА–IV обеспечивает существенное увеличение амплитуды сигнала спин–эхо за счет повышения уровня поляризации измеряемой

среды, прежде всего водной фазы. Данное техническое решение является важным преимуществом ПМРА–IV по сравнению с системами, в которых формирование намагниченности осуществляется в измерительном магнитном поле [112, 113].

3.3. Описание конструкции анализатора ПМРА–IV

Анализатор ПМРА–IV разработан как проточная аналитическая система, основанная на методе протонной магнитно–резонансной релаксометрии (ПМР), предназначенная для экспресс–анализа и неразрушающего контроля физико–химических свойств нефтегазовых дисперсных систем в условиях многофазного потока [98, 105–110]. В отличие от существующих коммерческих многофазных измерительных приборов, ориентированных преимущественно на измерение расхода и интегрального фазового состава, ПМРА–IV реализован в виде интегрированного мехатронного программно–аппаратного комплекса, обеспечивающего расширение номенклатуры измеряемых параметров и адаптацию к сложным и нестационарным условиям течения скважинной жидкости [98].

Структурная схема анализатора представлена на рис. 3.4. В соответствии с данной схемой система включает: емкость отбора пробы скважинной жидкости (1); патрубок автоматизированного пробоотборного модуля (2) с электроприводом (6) и блоком управления положением патрубка (7); блок предварительного намагничивания на основе магнита Хальбаха (3); измерительный ПМР–блок, включающий ПМР–датчик (4), измерительный магнит (5) новый электронный блок релаксометра (10); плату управления (6); а также узел слива (11) и накопления измеренной пробы с автоматическим клапаном и приемной емкостью (12). Кроме того, в состав системы входят персональный компьютер (13) и программный интерфейс (14) для управления режимами измерений, обработки и визуализации результатов. Станция (15) – это устройство, используемое для подключения анализатора к интернету в рамках промышленного интернета вещей (ПИНВ).

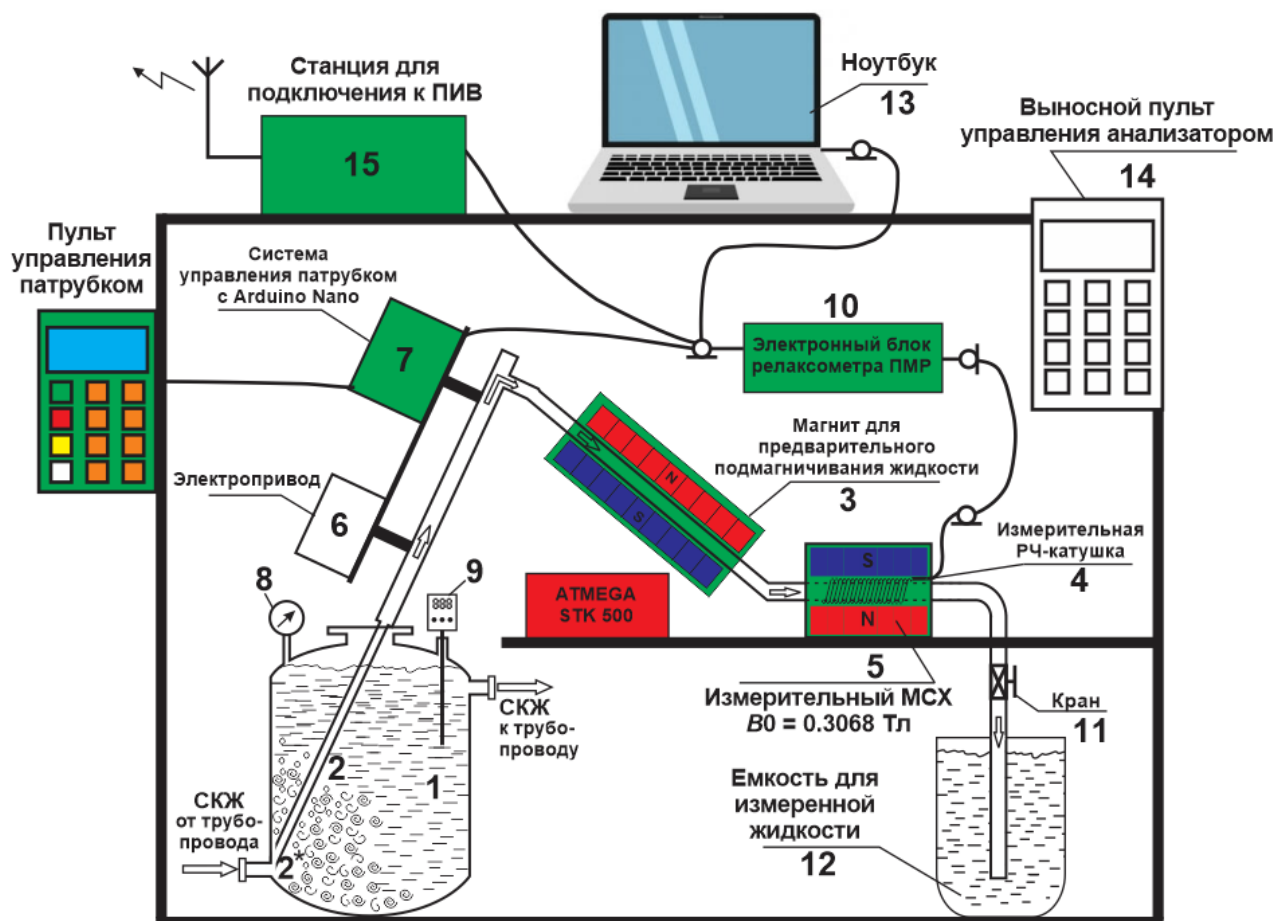


Рисунок 3. 4. Функциональная блок–схема усовершенствованного анализатора ПМРА–IV. Зеленым цветом – добавлены или улучшены блоки по сравнению с первоначальным вариантом. Красным – заменны блоки.

Принцип работы ПМРА–IV, врезанного в трубопровод следующий. Сырая нефть поступает из трубопровода в емкость 1, в которой за счет перепада давления между трубопроводом и емкостью поток турбулизируется, и, как следствие, повышается однородность, т.е. репрезентативность пробы. ПМРА–IV может быть подключён к трубопроводам любого диаметра сменой фланца. Пробоотбор ПМРА–IV реализован подвижным патрубком 2, отбирающим порцию нефти для измерений, а остальная часть потока выносится обратно в трубопровод. Пробоотборный модуль (рис. 3.5) усовершенствован введением платы драйвера управления 7, точно позиционирующей патрубок, что повышает воспроизводимость и достоверность результатов ПМР–измерений. После отбора пробы скважинная жидкость предварительно намагничивается внутри

магнита 3 подмагничивания перед поступлением в измерительный магнит 5. Магнит 3 выполнен в виде магнита Хальбаха длиной около 25 см, состоящего из 20 последовательно сложенных слоев, и формирует магнитное поле с индукцией $B \approx 0,4$ Тл в трубке диаметром 20 мм. Это обеспечивает существенное возрастание амплитуды магнитно–резонансного сигнала, особенно для водной фазы и повышение отношения С/Ш. Далее поток пробы поступает в измерительную зону ПМР датчика 4, размещенного в зазоре измерительного магнита 5, который представляет собой МСХ с индукцией поля $B_0 \approx 0,3068$ Тл с неоднородностью < 260 ppm/см³, что обеспечивает требуемые условия для проведения релаксометрических измерений. Электронный блок усовершенствованного релаксометра 10 регистрирует времена спин–спиновой релаксации T_{2i} и населенности P_{2i} фаз воды и нефти, по которым определяются скорости v_i потоков i -х фаз и их расходы Q_i по формуле $Q_i = v_i S/t$, где S – сечение трубопровода. При скоростях потока $v = 0,03 - 1$ м/с, диаметре трубы $\varnothing = 30$ см, расход составит $0,66 - 254$ м³/час. При большем диаметре расход будет больше. После ПМР–датчика нефть отводится через клапан 11, автоматически открывающийся в конце измерения? и проба сливается в приемную емкость 12, что позволяет выполнять контрольные анализы традиционными лабораторными методами для верификации ПМР–измерений. Приведены возможные области применения ПМРА–IV на цифровом месторождении и экономические аспекты.

Организация указанных функциональных блоков в виде единого измерительного контура отражает логику реализации ПМР–измерений в проточном режиме, при которой процессы пробоотбора, предварительного намагничивания, измерения и обработки сигналов объединены в замкнутую систему. Выбор такой структуры обусловлен необходимостью одновременного решения трех ключевых задач: обеспечения репрезентативности пробы при измерении неоднородных многофазных потоков, повышения стабильности и воспроизводимости магнитно–резонансного сигнала, а также реализации полностью автоматизированного цикла измерений без непосредственного участия оператора.

Конструкция пробоотборного модуля приведена на рис. 3.5. Ключевым конструктивным преимуществом ПМРА–IV является пробоотборный модуль с патрубком, функционирующий за счет перепада давления между емкостью отбора пробы (или трубопроводом) и входом патрубка. Это позволяет поддерживать устойчивый режим протекания пробы через измерительный объем ПМР–датчика на протяжении всего цикла измерений. Усовершенствованная конструкция пробоотборного модуля обеспечивает точное позиционирование патрубка и регулирование скорости потока жидкости в зоне измерения, что способствует повышению воспроизводимости и достоверности результатов измерений [111–112].

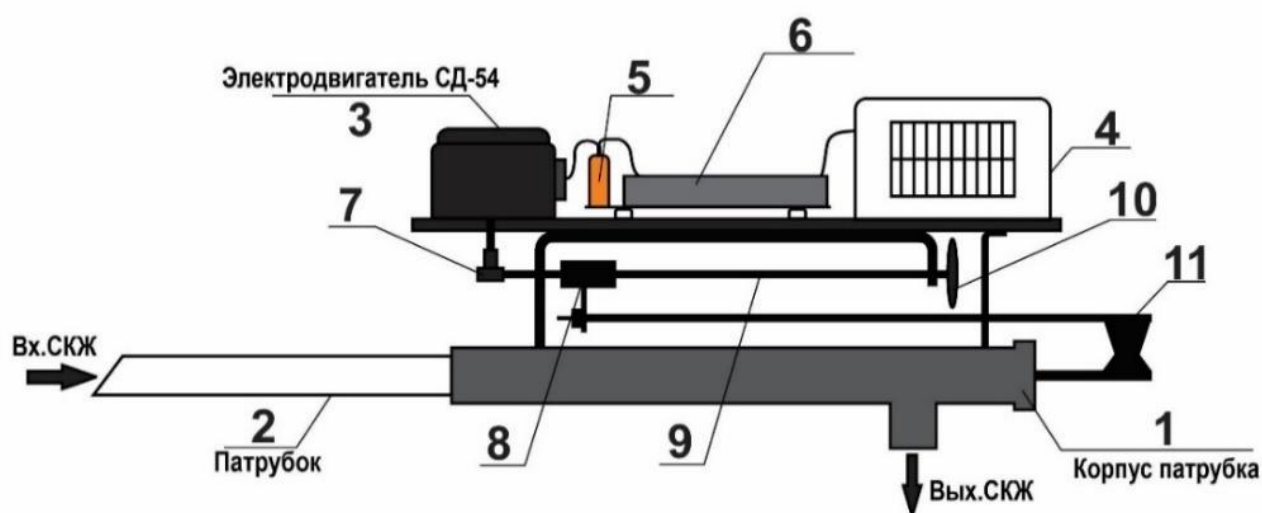


Рисунок 3. 5. Структурно–функциональная схема усовершенствованного пробоотборного модуля

1– корпус патрубка, 2– патрубок, 3– электродвигатель, 4– блок преобразователя питания, 5– возбуждающий конденсатор, 6– интегральная плата драйвера управления двигателем, 7– дифференциальные шестерни, 8– штифт, 9– ходовой винт, 10– энкодер, 11– шатун.

Предварительное намагничивание После отбора пробы скважинная жидкость проходит стадию предварительного намагничивания в участке трубопровода, размещенного внутри магнита предварительного намагничивания (3), перед поступлением в измерительный объем. Магнит предварительного намагничивания выполнен в виде двухполюсного магнита Хальбаха длиной около

25 см, состоящего из 20 последовательно уложенных слоев, и формирует магнитное поле с индукцией $B \approx 0,4$ Тл в трубопроводе диаметром 20 мм. Данный этап играет принципиально важную роль при реализации ПМР-измерений в проточном режиме, поскольку обеспечивает увеличение начальной намагниченности протонов перед входом пробы в измерительный магнит. В результате существенно возрастает амплитуда магнитно-резонансного сигнала, особенно для водной фазы, что приводит к улучшению отношения С/Ш [134, 138]. На рисунке 3.6 представлено фото прототипа проточного анализатора ПМРА-IV.

В таблице 3.1 представлены его параметры в сравнении с ПМР-анализаторами-аналогами. ПМРА-IV обеспечивает определение таких физико-химических характеристик, как вязкость, плотность, средняя молекулярная масса, содержание асфальтено-смолистых веществ, парафинов, а также распределение размеров капель воды в водонефтяных эмульсиях



Рисунок 3. 6. Прототип проточного анализатора ПМРА-IV.

Кроме того, анализатор позволяет получать информацию о расходных параметрах отдельных фаз в составе скважинной жидкости, что подтверждено

экспериментальными исследованиями и запатентованными техническими решениями [138, 141]. Возможность одновременного определения широкого набора параметров в проточном режиме является одной из ключевых особенностей, принципиально отличающих ПМРА–IV от существующих коммерческих многофазных измерительных систем.

Таблица 3.1. Характеристики ПМРА–IV по сравнению с аналогами

№	Наименование комплекса	Диапазон измерений характеристик НДС (%)	Масса M , кг, габариты L , м, потр. Мощн. P Вт	Ошибка (%)
1	“НЕДРА”, Kazan, 1998 г. $v_o = 3,3$ МГц	Расход 1–200 м ³ /ч; Концентрации воды, нефти 0–100%, газа 0–250 %	$M = 350$, $L = 1,6 \times 0,8 \times 0,2$; $0,31 \times 0,43 \times 0,5$, $P = 1500$	$\pm 4,0$, расход; вода; , нефть; $\pm 6,0$, газ.
2	<i>MFMA</i> –5000 (<i>Krohne</i>) 2013 г. $v_o = 8 - 8,5$ МГц	0,64–46,3 м ³ /ч (расход), 0–100 (вода) 0–250 (газ)	$M = 1100–1200$ кг $L = \varnothing 0,9 \times 3,5$ м $P = 180–350$	$\pm 3–5$, расход; $\pm 3–5$, вода $\pm 8–10$, газ
3	“ПМРА–IV” $v_o = 13,04$ МГц КГЭУ, 2022 г.	расход (при $v = 1$ м/с, $D = 0,3$ м) 0,66–254 м ³ /ч; вода, нефть 0–100%; газ 0–250; $\rho = 700 -$ 1100 кг/м ³ ; $\eta = 1,5–350$ мПа·с; дисперсность до 15 μ m Асф до 20 %	$M = 30$, $L = 1,5 \times 1,5 \times 1,0$ $P = 100$	$\pm 2,8$, Расход вода, нефть $\pm 3,85$, газ ± 1 , дисперсност ь, Асф

Таким образом, ПМРА–IV представляет собой не просто многофазный измерительный прибор, а интегрированную проточную аналитическую систему, ориентированную на получение расширенной информации о состоянии скважинной жидкости. По сравнению с многофазными измерительными системами, такими как *MFMA* фирмы *Krohne*, анализатор ПМРА–IV характеризуется существенно меньшими массо–габаритными показателями, более низкой стоимостью изготовления и расширенными аналитическими возможностями, что создает предпосылки для его применения в распределенных измерительных системах и в составе цифровых нефтяных месторождений [94,95].

3.4. Области применения ПМРА–IV на цифровом месторождении

Автоматизированный проточный ПМР–анализатор ПМРА–IV предназначен для использования в составе информационно–измерительной и управляющей инфраструктуры цифрового нефтяного месторождения, где требуется получение достоверных и расширенных данных о параметрах многофазных потоков в режиме, близком к реальному времени. Совокупность измерительных и аналитических возможностей ПМРА–IV позволяет рассматривать его не как автономный измерительный прибор, а как интеллектуальный аналитический узел, интегрируемый в различные контуры контроля, диагностики и управления технологическими процессами добычи нефти [98].

Одной из базовых областей применения ПМРА–IV является его использование в составе автоматизированных групповых замерных установок (АГЗУ) тест–сепарационного типа с функциями самодиагностики. В данном случае анализатор обеспечивает расширенный набор измеряемых параметров, включая дебиты жидкой и газовой фаз, вязкость, плотность компонентов, объемный коэффициент нефти, обводненность. В отличие от традиционных АГЗУ, ориентированных преимущественно на учет дебитов, применение ПМРА–IV позволяет получать дополнительные физико–химические характеристики продукции скважин, повышая информативность и аналитическую ценность замеров [98]. При этом следует учитывать, что точность измерений может зависеть от режима работы установки и состава потока, что обуславливает необходимость включения анализатора в более широкий контур верификации данных.

Важным направлением применения ПМРА–IV является его интеграция с автоматизированными системами управления технологическими процессами (АСУ ТП) нефтяной компании. В рамках данной архитектуры данные, получаемые от анализатора, используются для взаимной верификации с другими источниками информации, включая результаты расчетных моделей скважин, данные интеллектуальных АГЗУ и контрольных измерений. Такой подход позволяет реализовать процедуры согласования данных (*data reconciliation*),

калибровки измерительных каналов и повышения достоверности информации, поступающей на верхний уровень управления [98].

Перспективной областью применения ПМРА–IV является его использование совместно с системами управления установками электроцентробежных насосов (УЭЦН) [107], в том числе с применением концепции «виртуального расходомера». В подобных системах оценка параметров многофазного потока традиционно осуществляется по косвенным электрическим и энергетическим показателям, таким как нагрузка двигателя, напряжение, частота, активная и реактивная мощности. Однако такие методы не всегда обеспечивают требуемую точность определения фазового состава и свойств продукции скважин. Интеграция ПМРА–IV в данный контур управления позволяет дополнить косвенные параметры прямыми измерениями физико–химических характеристик и фазового состава потока, что существенно повышает качество управления и устойчивость работы насосного оборудования [114].

Дополнительной областью применения ПМРА–IV являются передвижные и мобильные измерительно–диагностические комплексы, предназначенные для эксплуатации в сложных промысловых условиях [105]. Такие установки востребованы при работе на удаленных и труднодоступных месторождениях, а также при проведении периодических контрольных измерений и калибровки стационарных систем. Проточный характер ПМР–анализа и возможность экспресс–измерений позволяют использовать ПМРА–IV в качестве опорного измерительного средства верхнего уровня, обеспечивающего контроль и уточнение данных, получаемых другими приборами [98, 107].

Существенную роль ПМРА–IV может играть при совместном использовании с датчиками погружной телеметрии, измеряющими давление и температуру на входе в насосное оборудование. Объединение информации о термодинамических параметрах, геометрии скважины (внутренние диаметры НКТ и штуцеров, глубина спуска насоса), характеристиках разгазирования и данных ПМР–анализа создает предпосылки для формирования комплексной цифровой модели скважины. Такая модель позволяет более точно оценивать текущее состояние

скважины, прогнозировать изменение режимов работы и реализовывать элементы предиктивного управления [98].

На рисунке 3.7 представлена концептуальная схема интеграции анализатора ПМРА–IV в структуру цифрового месторождения, включающая интеллектуальную АГЗУ, передвижную измерительную установку, а также контур управления многофункциональной автоматической цифровой интеллектуальной скважиной (МАЦИС), реализованный в соответствии с патентом Российской Федерации №2689103, вошедшим в перечень «100 лучших патентов Российской Федерации за 2019–2020 г.». Как видно из рисунка, ПМРА–IV занимает промежуточное положение между первичными измерительными средствами и верхним уровнем автоматизированных систем управления, обеспечивая формирование расширенного набора параметров многофазного потока.

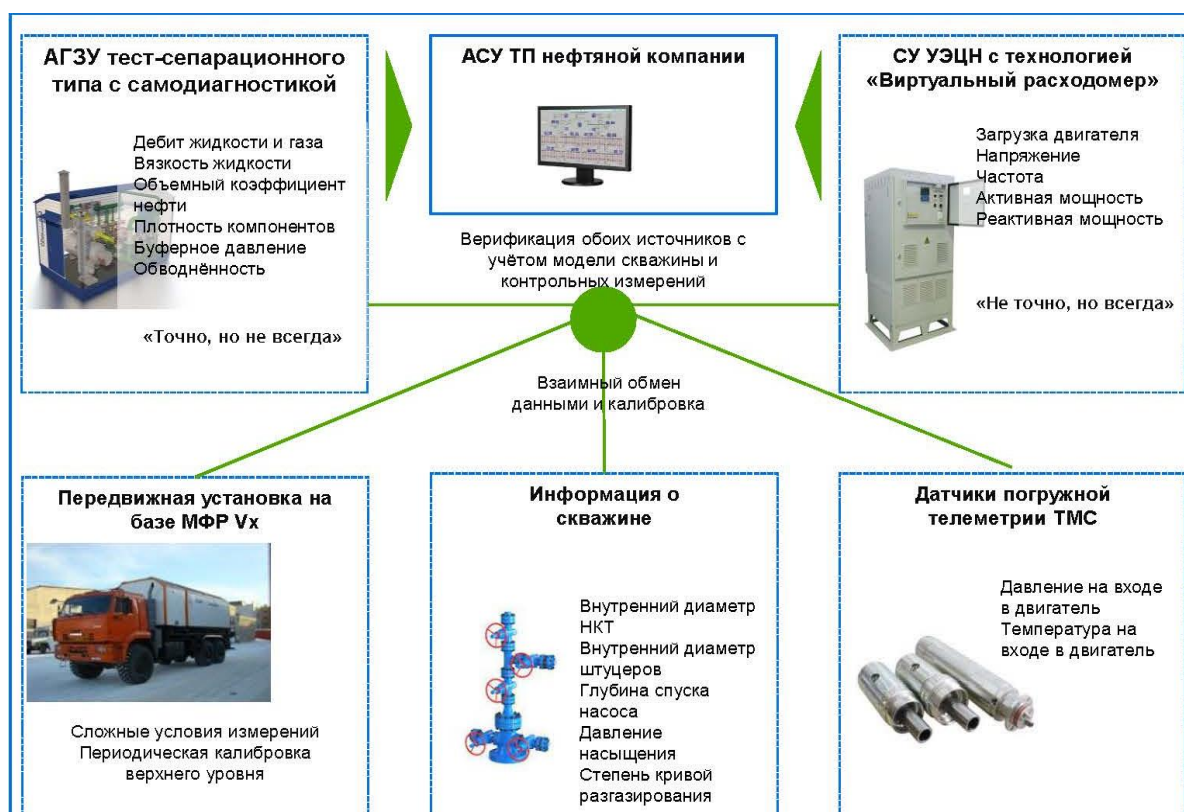


Рисунок 3.7. Интеллектуальная АГЗУ; передвижная установка; управление многофункциональной автоматической цифровой интеллектуальной скважиной (МАЦИС) по пат. РФ № №2689103 (100 лучших патентов РФ за 2019–2020 гг.); отмена датчиков телеметрии; автоматическая система управления УЭЦН.

В рамках концепции МАЦИС применение ПМРА–IV создает предпосылки для частичного или полного отказа от отдельных датчиков телеметрии, чувствительных к агрессивным условиям эксплуатации, за счет переноса функций оценки фазового состава и физико–химических свойств потока на поверхность. Тем самым анализатор ПМРА–IV становится ключевым элементом замкнутого контура интеллектуального управления, объединяющего измерение, анализ и адаптивное регулирование режимов добычи нефти.

Таким образом, ПМРА–IV может рассматриваться как универсальный аналитический модуль цифрового месторождения, обеспечивающий интеграцию данных между различными уровнями измерений – от локальных датчиков и передвижных установок до централизованных систем управления. Его применение позволяет повысить достоверность информации о состоянии многофазных потоков, улучшить качество принятия технологических решений и создать основу для дальнейшего развития интеллектуальных систем управления добычей нефти.

3.5. Экономические аспекты производства и применения ПМРА–IV

Экономическая целесообразность разработки, серийного производства и внедрения проточного ПМР–анализатора ПМРА–IV определяется как масштабами потенциального рынка, так и возможностью существенного снижения капитальных и эксплуатационных затрат при контроле параметров многофазных потоков в нефтегазовой отрасли. В условиях реализации государственной энергетической политики и перехода к концепции цифрового месторождения возрастают требования к точности учета добываемых углеводородов и информативности измерительных систем.

По данным отраслевых и государственных источников, на территории Российской Федерации эксплуатируется порядка 160 тыс. нефтяных скважин, при этом ежегодно вводится в эксплуатацию около 5,5 тыс. новых скважин. Масштаб и распределенность фонда скважин обуславливают устойчивый спрос на универсальные, высокоинформативные и экономически эффективные средства

контроля параметров добываемой продукции, способные работать в промышленных условиях и интегрироваться в автоматизированные системы управления.

Оценка себестоимости изготовления одного анализатора ПМРА–IV составляет порядка 3 млн руб. При организации мелкосерийного производства и реализации около 100 приборов в год по цене 10–20 млн руб. за единицу потенциальная валовая прибыль инвестора может достигать величины до 1,5 млрд руб. в год. Для сопоставления следует отметить, что стоимость лабораторных ЯМР–спектрометров, например *SLK–200*, по данным открытых источников составляет порядка 12 млн руб., однако такие приборы не предназначены для проточных измерений и не могут быть использованы непосредственно в условиях нефтепромысла, что принципиально отличает их от анализаторов типа ПМРА–IV.

Дополнительный экономический эффект применения ПМРА–IV обусловлен его способностью заменять собой сразу несколько специализированных проточных приборов, применяемых для контроля отдельных параметров многофазного потока. Благодаря сокращению времени измерений в 3–10 раз по сравнению с традиционными средствами контроля и одновременному определению широкого набора физико–химических характеристик один анализатор ПМРА–IV может заменить оборудование суммарной стоимостью в 30 млн руб. (в ценах 2023 г.).

В частности, ПМРА–IV способен заменить автоматизированные групповые замерные установки типа «Спутник–Массомер 40–8–400» или «Мега», анализаторы расхода газов *VT–900*, проточные плотнометры и вискозиметры, анализаторы дисперсности водонефтяных эмульсий и серы, а также специализированные проточные анализаторы асфальтено–смолистых веществ, для которых в настоящее время отсутствуют прямые промышленные аналоги. Тем самым достигается сокращение количества применяемых приборов, упрощение измерительной инфраструктуры и снижение затрат на монтаж, обслуживание и метрологическое сопровождение оборудования.

Особое экономическое значение имеет повышение точности определения массы добываемой нефти и нефтепродуктов. Согласно международным

стандартам учета углеводородов и практикам промышленного измерения, даже отклонение результатов измерений на уровне порядка 1 % может приводить к значительным финансовым потерям в масштабах отрасли и государства. Повышение точности учета добычи за счет применения высокочувствительных и многофункциональных анализаторов типа ПМРА–IV имеет, таким образом, не только коммерческое, но и стратегическое значение для энергетической безопасности страны.

В совокупности представленные оценки свидетельствуют о высокой экономической эффективности разработки и внедрения анализатора ПМРА–IV. Его применение обеспечивает снижение совокупных затрат на измерения, повышение точности учета продукции скважин и создание экономических предпосылок для масштабного внедрения технологий цифрового месторождения.

3.6. Выводы по главе 3

В третьей главе диссертационной работы обоснован и разработан автоматический проточный ПМР–анализатор четвертого поколения ПМРА–IV, предназначенный для аналитического и неразрушающего контроля физико–химических свойств многофазных потоков скважинной жидкости в условиях цифрового нефтяного месторождения.

Проведенное сравнение с лучшим зарубежным аналогом – многофазным расходомером *MFMA* фирмы *KROHNE* – показало, что при сопоставимом принципе магнитно–резонансных измерений анализатор ПМРА–IV обладает существенно более широкой номенклатурой определяемых параметров, меньшими массо–габаритными и энергетическими показателями. Это позволяет рассматривать ПМРА–IV не только как средство учета расхода и фазового состава, но как универсальный проточный аналитический прибор для промысловых условий.

Разработана конструкция ПМРА–IV как интегрированного программно–мехатронного комплекса, включающего узлы автоматизированного пробоотбора, предварительного намагничивания, ПМР–измерения, обработки и визуализации

данных. Показано, что использование внутреннего байпаса с подвижным пробоотборным патрубком и предварительного намагничивания потока обеспечивает повышение репрезентативности пробы и воспроизводимости результатов в условиях нестационарного многофазного потока.

В результате моделирования и экспериментальных исследований установлено, что применение узла предварительного намагничивания приводит к существенному увеличению уровня поляризации измеряемой среды и, соответственно, амплитуды сигнала спин-эхо. Для водной фазы рост сигнала достигает более чем пятикратного значения, тогда как для нефтяной фазы увеличение составляет $\approx 1,5$. Полученный эффект имеет важное практическое значение для повышения чувствительности и точности измерений обводненности и фазового состава водонефтяных смесей в проточном режиме.

Показано, что анализатор ПМРА-IV может эффективно применяться в различных элементах инфраструктуры цифрового месторождения, включая интеллектуальные автоматизированные групповые замерные установки, передвижные измерительно-диагностические комплексы, системы управления установками электроцентробежных насосов, а также в составе многофункциональных автоматических цифровых интеллектуальных скважин. Интеграция ПМРА-IV в данные системы обеспечивает формирование расширенного набора достоверных параметров многофазного потока и создает основу для реализации замкнутых контуров интеллектуального управления добычей нефти.

Оценка экономических аспектов производства и применения ПМРА-IV показала высокую коммерческую и отраслевую эффективность разработанного решения. Использование одного анализатора позволяет заменить несколько специализированных проточных приборов, сократить время измерений и существенно снизить капитальные и эксплуатационные затраты. Повышение точности учета добываемых углеводородов за счет применения ПМРА-IV имеет не только экономическое, но и стратегическое значение для энергетической безопасности и цифровизации нефтегазовой отрасли.

В целом результаты, полученные в третьей главе, подтверждают целесообразность и перспективность разработки автоматизированного проточного ПМР-анализатора ПМРА-IV и обосновывают возможность его широкого внедрения в составе интеллектуальных систем контроля и управления на цифровых нефтяных месторождениях.

4. РАЗРАБОТКА МЕТОДИК ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ АНАЛИТИЧЕСКОГО И НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ ОБЪЕКТОВ КОНТРОЛЯ

4.1. Экспресс–контроль содержания асфальтенов в сырой нефти и газоконденсате месторождений Вьетнама методом ПМР

Месторождение *Bach Ho* и *Ca Ngu Vang* расположены в бассейне *Cuu Long*, одного из пяти осадочных бассейнов, обладающих значительным потенциалом добычи нефти и газа во Вьетнаме. Сырая нефть, добываемая из скважин данного бассейна, характеризуется низким содержанием серы (0,02–0,15%), однако отличается повышенным содержанием асфальтенов (11–13,4%) и парафинов (18–25,3%) [115]. Вследствие сложного геологического строения месторождения, разделённого на несколько продуктивных пластов, физико–химические свойства нефти, включая содержание асфальтенов и парафинов, существенно различаются по пластам. Физико–химические свойства сырой нефти и газоконденсата месторождения Вьетнама представлены в таблице 4.1.

Таблица 4. 1. Физико–химические свойства сырой нефти и газоконденсата месторождения Вьетнама

Свойства	Месторождения нефти и газоконденсата Вьетнама				
	№4	№3 BK-8	№2 MSP-10	<i>Ca Ngu Vang</i>	Конденсат <i>Tien Hai</i>
Плотность 20 °С, ρ (г/см ³)	0,8519	0,8678	0,879	0,801	0,7664
Темпер.застывания (°С)	35,5	34,5	38,5	24	-
Вязкость кинематическая, ν (мм ² / с):					
- при 50 °С	12,83	14,67	27,57	3,0(40°С)	-
- при 70 °С	6,60	7,66	16,62	1,794	-
Содержание парафина, %	26,00	21,2	28,3	20,7	Окт.число 47
Темп.плав парафина,	58,7	58,9	60,5	-	-
Содержание асфальтен, %	7,21	9,06	14,04	0,71	-
Молекулярный вес, а.е.м.	258–296	285,9	362,1	-	-

Анализ приведённых данных показывает, что нефть характеризуется высокой температурой застывания и значительным содержанием парафинов и асфальтенов. При этом в отдельных пластах содержание парафинов превышает 25%, что существенно осложняет процессы добычи и транспортировки нефти.

Температура застывания сырой нефти значительно превышает температуру морского дна [116, 117], что в условиях морской добычи приводит к интенсивному образованию асфальтено–парафиновых отложений в трубопроводах и технологическом оборудовании. Накопление данных отложений вызывает уменьшение эффективного сечения трубопроводов, увеличение гидравлических потерь и снижение производительности системы добычи, а также приводит к росту эксплуатационных затрат. В связи с этим регулярный мониторинг содержания асфальтенов и парафинов в сырой нефти является актуальной задачей, необходимой для оперативного принятия решений по предотвращению и устранению отложений.



Рисунок 4. 1. Отложение асфальтено–парафинов в нефтепроводах на месторождении *Vach Но*

В настоящее время исследовано и применяется множество методов борьбы с асфальтено–парафиновыми отложениями в трубопроводах (рис. 4.1). Однако до настоящего времени отсутствует метод оперативного экспресс–контроля содержания асфальтенов и парафинов, позволяющий в режиме реального времени

оценивать их концентрацию и выбирать оптимальный способ обработки отложений. Совместным предприятием «Вьетсовпетро» были апробированы различные методы борьбы с отложениями, однако отсутствие быстрого аналитического контроля указанных параметров остаётся существенным ограничением при эксплуатации трубопроводных систем.

Метод ПМР широко применяется в нефтегазовой, химической, пищевой и фармацевтической промышленности. В нефтегазовой отрасли ПМР–инструменты используются для экспресс–контроля параметров многофазных жидкостей в скважинах, а также для определения состава и концентрации нефти и нефтяных эмульсий. Ряд исследований показал высокую чувствительность параметров ПМР к структуре молекул углеводородов и распределению тяжёлых фракций в нефти, что делает метод перспективным для оценки содержания асфальтенов [118].

Недорогое решение на основе метода ПМР для экспресс–контроля содержания асфальтенов и парафинов в нефти было предложено в работах Кашаева и соавторов [119, 120].

В настоящей работе исследована зависимость содержания асфальтовых веществ (Асф) от времён спин–решеточной (T_{1B}) и спин–спиновой (T_{2B}) релаксации протонов для нефти месторождения *Bach Ho* и *Ca Ngu Vang*.

На основании экспериментальных данных, представленных на рисунке 4.2, определение содержания асфальтенов в нефти месторождений Поволжья, *Bach Ho* и *Ca Ngu Vang* (Вьетнам) осуществляется по времени спин–спиновой релаксации фазы *B*. Полученная зависимость характеризуется коэффициентом корреляции $R^2 = 0,99$ с СКО = 23 и описывается для нефти Поволжья и Белый Тигр выражениями:

$$\text{Асф} = -2,22\ln(T_{2B}) + 14,5 \quad (4.1)$$

Для месторождения *Bach Ho* и *Ca Ngu Vang* с коэффициентом корреляции $R^2 = 0,995$ и среднеквадратическим отклонением СКО = 15 выражением:

$$\text{Асф} = 11,3 - 0,113\sqrt{17,7 * T_{2B} - 1244} \quad (4.2)$$

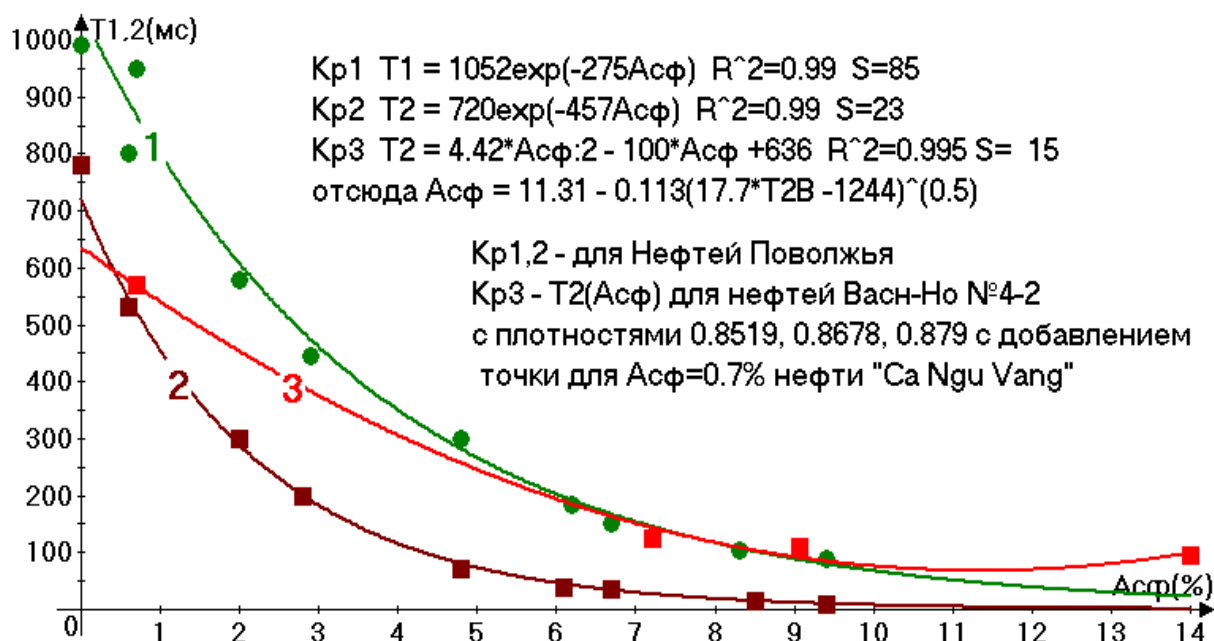


Рисунок 4.2. Зависимость содержания асфальтенов от времени $T_{1,2B}$ (кривая 1 – зеленая, кривая 2 – коричневая) для Поволжской нефти; T_{2B} (кривая 3 – красная) для нефти месторождения *Bach Ho* и *Ca Ngu Vang* (Вьетнам)

Ввиду малой разницы T_{2B} для всего 3-х образцов *Bach Ho* кривая для них довольно пологая. Для нефтей Поволжья величину абсолютной ошибки измерения γ_{AC} в соответствии с современной теорией ошибок можно вычислить по формуле $\gamma_{AC} = t_{cm} S_i / \sqrt{n}$. Для доверительного интервала $P_d = 0,95$ и числе измеренных образцов $n = 12$ величина $t_{cm} = 2,2$. Поскольку СКО оказалось в диапазоне $0,7 \div 0,2$, абсолютная ошибка $\gamma_{AC} = 2,2 \cdot (0,7 \div 0,2) / 3,46 = 0,44 \div 0,13$ и основная приведенная погрешность при максимальном значении асфальтен $A_{сф} = 30\%$ (хотя в нефтях концентрация $A_{сф}$ может доходить до 35–40%) $ОПП_{AC} = \gamma_{AC} \cdot 100\% / 30 = 1,47 \div 0,4\%$, в среднем 1%. Таким образом, зависимости (4,1 – 4,26) можно практически использовать для контроля концентрации AC методом ПМР–релаксации по однократным измерениям (без накопления) с $ОПП_{AC} = \pm 1\%$. С накоплением n раз погрешность снижается в $(n)^{0.5}$ раз.

Таким образом, применение метода ПМР позволяет существенно упростить и удешевить процедуру определения содержания асфальтенов в нефти по сравнению с лабораторными методами. Полученные результаты подтверждают

целесообразность использования ПМР–анализа для оперативного контроля асфальтено–парафиновых отложений и обоснованного выбора рациональных методов их предотвращения в системах добычи и транспортировки нефти.

4.2. Анализ температурных зависимостей нефтей и газоконденсата

Вьетнама методом ПМР–релаксометрии

Добыча, подготовка и транспортировка сырой нефти с высоким содержанием парафина, особенно с морских месторождений, сложна и затратна. В процессе добычи и транспортировки нефти на фильтрах и в трубопроводах происходит осаждение асфальтено–смола и парафина в скважинных трубах с образованием отложений АСПО. Поэтому анализ ее физико–химических свойств (ФХС) важна для оценки проблем, связанных с добычей и транспортировкой. *Синь Лонг* бассейн (Вьетнам), разрабатываемый совместным предприятием ВьетСовПетро. По данным сейсморазведочных работ все нефти данных месторождений содержат большое количество асфальтено–смола и парафина с высокими температурами застывания, и при комнатных температурах представляют собой ваксоподобное вещество. Они должны быть обработаны, поскольку транспортировка ее с морских платформ на суда невозможна.

Нами исследованы два образца нефтей Вьетнама и газоконденсат.

Для решения поставленной задачи использовался разработанный, изготовленный и описанный нами в Главе 3 релаксометр ПМР–*NP3* [123] в составе проточного анализатора ПМРА–IV [98] на резонансную частоту в диапазоне $\nu_0 = 9,6–14,32$ МГц с блоком термостабилизации. По показателю чувствительности $K = \nu_0^2 D^2 [10^6 \cdot \text{Гц}^2 \text{м}^2] = 2885 \text{ МГц}^2 \text{см}^3$ релаксометр ПМР–*NP3* близок к зарубежному аналогу *Minispec* 120. Термостатирование образца осуществлялось в датчике ПМР [124], отличающемся малым температурным градиентом и низким уровнем электромагнитных шумов. В датчике термоэлементы на эффекте Пельтье, в зависимости от направления тока охлаждали или нагревали образец в диапазоне $-15^\circ \div +100^\circ\text{C}$ с точностью $\pm 0,5^\circ\text{C}$. В методе ПМР–релаксометрии зависимости огибающей амплитуд A_e спин–эхо

обычно полиэкспоненциальны и для времен релаксации T_{1i} и T_{2i} описываются уравнениями:

$$A_e = 1 - A_0 \sum [P_{1i} \exp(-t/T_{1i})] \quad (4.3)$$

$$A_e = A_0 \sum [P_{2i} \exp(-t/T_{2i})] \quad (4.4)$$

где A_0 соответствует суммарной амплитуде сигнала, P_{1i} и P_{2i} – относительному числу протонов с разной степенью молекулярной подвижности, соответствующим T_{1i}, T_{2i} – временам спин–решеточной и спин–спиновой релаксации протонных фаз $i = A, B, C$ с населенностями (концентрациями спинов в долях от единицы) P_{A1}, P_{B1} и P_{C1} . Определение T_{1i} осуществлялось из ур.(4.3) с использованием последовательности $90^\circ - \tau - 90^\circ - \tau_0 - 180^\circ$ Хана, где $\tau = 30 - 70$ мс, $\tau_0 = 300$ мкс; для определения T_{2i} использовалась многоимпульсная последовательность $90^\circ - \tau_1 - 180^\circ - 2\tau_1 - 180^\circ - 2\tau_1 - 180^\circ \dots$ КПМГ, где $\tau_1 = 300 - 500$ мкс, устраняющую влияние диффузии и неточности установки длительностей импульсов. Погрешность амплитуды ПМР–сигнала при 8–разрядном АЦП $\gamma_B = \pm 0,2\%$. Линейность детектора > 40 Дб. Погрешности однократных измерений времен релаксации составляли $\pm 3 - 4 \%$, амплитудных $\pm 2 \%$ и могли быть снижены в $(n)^{1/2}$ раз n накоплением СЭ.

После логарифмирования значений амплитуд спин–эхо через длинно временные точки проводится прямая, в полулогарифмическом масштабе, описываемая $\ln(A_t/A_0) = -t/T_{2i} + \ln A_i$. Путем последовательного вычитания из экспериментальных точек данной и последующих прямых, соответствующих компонентам, , последовательно получают $T_{1,2i}$ и $A_0 P_{1,2i}$ для протонных фаз. За постоянную $T_{1,2i}$ принимается время, в течение которого амплитуда сигнала спин–эхо уменьшается в e раз. Огибающие разлагались на три компоненты $i = A, B, C$ при различии времен релаксации в 4–10 раз.

Для обозначения элемента дисперсной фазы нефтей в научной литературе принят термин «структурные единицы» (СЕ) – как дисперсная фаза [3] в виде коллоидных частиц, седиментированных в дисперсионной среде из легких углеводородов. СЕ состоят из ядра, включающего асфальтены и набора

сольватных оболочек из смол и парафинов. Под влиянием внешних условий и состава (температуры, концентрации асфальтенов, смол, парафинов, серы и др.) происходит изменение размеров ядра и толщины сольватных слоев СЕ. Так, в нефтях и нефтяных остатках отношение смолы/асфальтены (С/А) варьируется в пределах от 9:1 ÷ 7:3. Причины этих переходов и вариаций до сих пор вызывает споры.

При формировании СЕ согласно «пачечной» модели СЕ [3], ее ядро формируется из упорядоченных 4–5 полиароматических слоев асфальтенов (*Асф*) диаметром 0,9–1,7 нм, отстоящих друг от друга на расстоянии ~ 0,35 нм. Ядро имеет оболочку из смол (*См*), имеющих межслоевые расстояния ~ 0,36 нм и обладающих менее плотной упаковкой слоев. Ядро может формироваться также из упорядоченных линейных парафинов.

Ранее было установлено [125], что корреляции T_{1A} и T_{2A} с η для нефтей отличаются от алканов и не могут быть интерпретированы в рамках «вязкостного стандарта» при котором предполагается равенство $T_1 = T_2$. Отношения T_{1A}/T_{2A} для $\eta = 0,9 \div 6$ мПа·с и $\eta = 6 \div 60$ мПа·с также отличаются и описываются уравнениями:

$$T_{1A}/T_{2A} = 1.5\eta^{0.12} \quad (4.5)$$

$$T_{1A}/T_{2A} = 2.44\eta^{0.05} \quad (4.6)$$

Рост T_{1A}/T_{2A} с η можно объяснить неусреднением диполь–дипольных взаимодействий при образовании упорядоченной структуры СЕ в нефти, хотя при высокотемпературном приближении $\omega_0\tau_c \ll 1$ по «вязкостному стандарту» должно наблюдаться $T_{1A}/T_{2A} = 1$.

По результатам [125] можно сделать следующие выводы:

- времена релаксации нефтей падают с ростом вязкости с переломом при $\eta = 6$ сРа, предполагающим переход от легких нефтей к нефтям, содержащим СЕ.

- отношения $T_{1A,B}/T_{2A,B}$ для разных температур значительно различаются, свидетельствуя о наличии процессов структурно–динамического упорядочения и растут с ростом η , что можно интерпретировать как увеличение числа СЕ.;

– при снижении температуры на зависимостях $T_{1A,B}$ и $T_{2A,B}$ явно проявляются скачки значений времен релаксации, характерные для процессов экзотермического структурно–динамического (СД) упорядочения как в парафинах, так и в неорганических жидкостях (см. напр. Масиаб [126]). Это связано с фазовым переходом второго рода, который Л.Д.Ландау определял так: «Фазовые переходы второго рода всегда связаны с появлением у тела нового качественного свойства при непрерывном изменении состояния. Это может быть изменение симметрии связанное со скачкообразным изменением состояния тела. В обычном ФП, – выделение теплоты, изменение объема. Однако наибольший интерес представляет случай, названный впоследствии ФП второго рода, при котором теплота не выделяется, и объем меняется непрерывно Ландау, Лифшиц [127]. Мы же имеем дело со ступенчатым структурно–динамическим (СД) экзо/эндотермическим упорядочением и переходом в воскоподобное состояние с минимальными временами релаксации уже при $10^3/TK > 3.1$ ($T < 50^\circ\text{C}$);

– значения энергий активации E_A (ккал/моль) молекулярного движения в фазах растут по мере их близости к ядру СЕ (переход от фазы A к B и C), свидетельствуя о все большей заторможенности в них молекулярного движения;

Таким образом, установлено, что значений $T_{2A,B}$ характерны для СДФП.

Результаты измерений температурных зависимостей времен спин–решеточной T_{1A} (кривая 1 в виде суммы низкотемпературных $T_{1АНТ}$ и высокотемпературных времен $T_{1АВТ}$), спин–спиновой релаксации фазы A , (кривая 2 в виде суммы низкотемпературных $T_{2АНТ}$ и высокотемпературных времен $T_{2АВТ}$), фазы B (кривая 3 T_{2B}) и населенностей протонов $P_{2B} \cdot 10$ этой фазы B (кривая 4), от $10^3/TK$ для нефти *Sa Ngu Vang* представлены на рис. 4.3. Температурные зависимости T_{1A} и T_{2A} , T_{2B} аппроксимируются уравнениями на данном рисунке, из которых видно, что энергии активации молекулярного движения E_A при низких температурах ($E_A = 1650–4073$ кал/моль) в 4–12 раз превышают значения, характерные для высокотемпературной области ($E_A = 320–360$ кал/моль) свидетельствуя о существенном ограничении молекулярной подвижности.

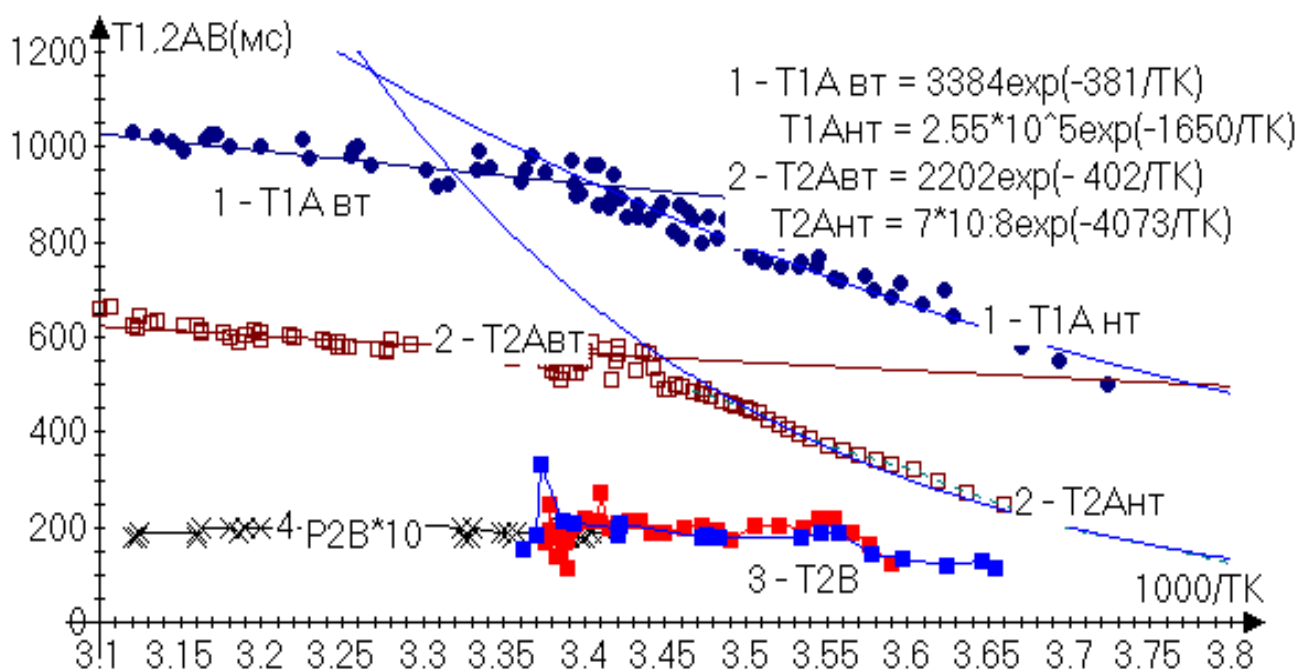


Рисунок 4.3. Температурные зависимости времен спин–решеточной T_{1A} (кривая 1 в виде суммы низкотемпературных $T_{1A \text{ ант}}$ и высокотемпературных времен $T_{1A \text{ вт}}$), спин–спиновой релаксации фазы $A - T_{2A \text{ вт}}, T_{2A \text{ ант}}$ (кривая 2), фазы $B T_{2B}$ (кривая 3) и населенностей протонов $10 \cdot P_{2B}$ этой фазы B от $10^3/TK$ для нефти *Ca Ngu Vang*

Населённости протонов (кривая $10 \cdot P_{2B}$), равные $20 \pm 2\%$ хорошо согласуются с содержанием парафинов в этой нефти. В области $10^3/TK \approx 3,37$ выявлен структурно–динамический фазовый переход, сопровождающийся таянием квазикристаллической гель–структуры и скачкообразным увеличением времен T_2 . При дальнейшем нагревании ($T > 5^\circ\text{C}$) наблюдается естественный рост T_{2A}, T_{2B} , вызванный молекулярным движением.

Температурные зависимости $T_{1,2}$ газоконденсате *Tien Hai* приведены на рис. 4.4. Они с $R^2 = 0,71 - 0,95$ и СКО $S = 46 - 110$ описываются уравнениями:

$$T_{1A} = 0,4684(10^3/TK)^2 - 1529(10^3/TK) + 6606 \quad (4.7)$$

$$T_{2A} = 139 (10^3/TK)^2 - 98,6 \cdot 10^3/TK + 3029 \quad (4.8)$$

Из кривой 2 рис. 4.4. видно, что наклон зависимости минимальный для $10^3/TK < 3,4$, свидетельствуя о минимальных E_A в газоконденсате. Т.е. перекачка газоконденсата оптимальна при температуре $> 21^\circ\text{C}$. В зависимости $T_{1,2A}$ зафиксирован минимум в области температур $-5 \div +3^\circ\text{C}$, при которых произошло

таяние кристаллической структуры, видимой невооруженным взглядом. Температурный диапазон T_{1Amin} совпадает с минимумом T_1 при $10^3/TK = 3,5-3,7$, обнаруженным в работе Даутова, Христофорова. Авторы отнесли это к вращательным движениям молекул парафинов.

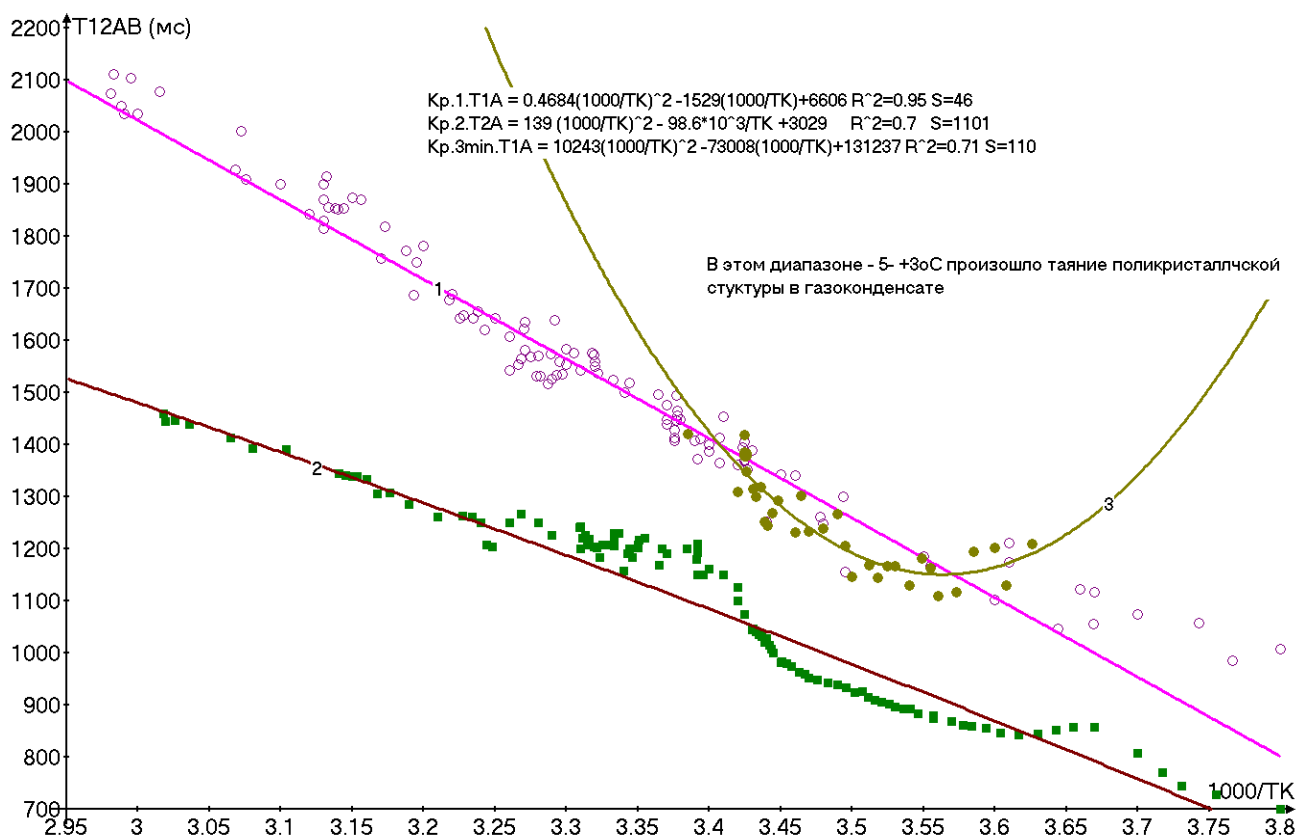


Рисунок 4.4. Температурные зависимости T_{1A} (кривая 1) и T_{2A} (кривая 2), проявление минимума T_{1A} (кривая 3) в газоконденсате *Tien Hai* (Вьетнам)

4.3. Проект использования ПМРА–IV в промышленном Интернете вещей на цифровом месторождении

Промышленный интернет вещей (ПИВ), называемый также *Industry 4.0* является расширением интернета вещей ИВ с интеллектуальными датчиками и приводами и использует данные, которые управляют устройствами и ЭВМ, превосходящими человека в сборе, обработке и интерпретации информации в реальном времени *Wanasinghe* [128]. В ПИВ входы и «облако» составляют три уровня архитектуры ПИВ. Это физические компоненты с датчиками и приводами через их входы для компьютерной обработки (КО) – ПИВ–КО, которые могут

выбираться в зависимости от того, что надо контролировать – температуру, давление, влажность через инфракрасные датчики и др. ПИВ–КО позволяет собирать и анализировать данные с установок процессов для повышения гибкости и эффективности систем при сниженной цене, что стимулирует нефтегазовую промышленный через цифровую трансформацию на ЦМ. Основанием любого ПИВ–КО является сеть с возможностью обмена данными и управляющими командами, интернет–протоколов и связанной с этим управляемостью и безопасностью. То есть ПИВ–КО определяет, как размещать и структурировать сетевые решения для любого промышленного применения.

Структура ПИВ объединяет цифровую среду данных с реальными объектами и дает возможность создавать их цифровые двойники во многих сферах, в частности на интеллектуальных ЦМ. Примеры использования ИВ включают: мониторинг давления, реле клапанов, уровня жидкости в танкерах, насосов, скважин и др.[128]. Большинство ИВ централизованы, что является их слабым местом, могущим привести к потерям и авариям *Ray* [129]. Поэтому желательна децентрализация системы для повышения достоверности и автономности мониторинга и управления, поскольку перерывы в операциях могут приводить к существенным потерям продукции и прибыли *Zuo* [130].

С помощью баз данных ПИВ–КО для установки электроцентробежного насоса (УЭЦН), можно точно описать его работу. Это данные по частоте вращения ротора, температуре погружного электродвигателя (ПЭД), входному и выходному давлению насоса и концентрации воды (W) в СКЖ. Насос должен работать в области между двумя граничными зависимостей расхода (дебита) – рабочей зоне выше и ниже пределов напора. Операторы добычи нефти ЭЦН определяют как основная проблема – это экспресс–контроль параметров ЭЦН. Обычно при этом используются сети датчиков в системе *SCADA*, которая немасштабируема, закрыта и дорога для поддержки рабочего состояния *Ramzey* [131]. В *SCADA* используются погружные датчики, что затратно и требует контроля их работоспособности.

В этом плане экспресс–контроль с помощью комплекса ПМРА–IV в структуре ПИВ–КО – перспективно в экспресс–контроле через локальные сети и

Интернет на ЦМ, использованием управляющих сигналов с данными о дебите, плотности и вязкости нефти. При этом нет необходимости размещения первичных датчиков в скважинах с их сложностями по энергоснабжению, затратам и потерям напора. Предложенная в [131] структура архитектуры ПИВ может быть разделена на три слоя: устройств и установок, слой ПИВ–КО и мониторинга проекта в «облаке»:

– слой устройств и установок состоит из: ЭЦН, датчиков температуры, давления, частоты и др., а также анализатора ПМРА–IV на устье скважины. Слой ответственен за сбор физической и цифровой информации, а также передачу данных на верхний уровень для выполнения его команд.

– средний слой ПИВ–КО состоит из регулируемого по скорости привода электродвигателя (ПЭД) с компьютерной системой сохранения данных, связанного с ПИВ–КО через *Modbus* и подсистему, которая содержит плату *Raspberry Pi*, плату интерфейса *Modbus*, *MIFI* и блок бесперебойного питания. Плата *Raspberry Pi* – основной системный контроллер с возможностью накопления и сохранения данных. Плата *Raspberry Pi 4 Model B* имеет: 1.5 ГГц 64–битовый четырех ядерный *ARM Cortex–A72* процессор с *WiFi*, *Bluetooth 5*, гигабитный *Ethernet*, два *USB2.0* порта, два *USB 3.0* порта, 2 *GB–xRAM*. Питается *Pi 4* через *USB–C* порт. Система работает как ворота, соединяющие данный слой с вышестоящими через Интернет. В этом слое ПИВ–КО принимает сигналы в реальном времени, включая данные о ПМР–параметрах анализатора ПМРА–IV. Данные и результаты анализа используются для преддействий и автоматических предупреждений, минимизирующих потери продуктивности ЭЦН;

– слой «облачного» мониторинга состоит из серверов и системы контроля предприятия. Он ответственен за мониторинг и контроль ЭЦН удаленно через промышленные пульта управления, размещенные в «облаке» как система программированного контроля и принятия решений. Подсистема ПИВ–КО работает как ворота в облачную конфигурацию, адаптированную к операциям со средой с большими информационными пространствами.

Для безопасного и быстрого доступа к «облаку», используется краевой анализ и обработка с неопределенными множествами данных. Целью КО является ускорения анализа данных в большом объеме и в непосредственной близости от места их появления, обеспечивая быстрые действия в реальном времени. При КО используется взаимодействие с зависимыми от времени переменными, а «облако» используется для остальной обработки. На удаленных нефтегазовых месторождениях, когда связь с центральным сайтом слаба или отсутствует, КО предпочтительна из-за возможности скрытности [132]. Методология [131] ПИВ-КО можно представить как децентрализованную платформу на рис. 4.5

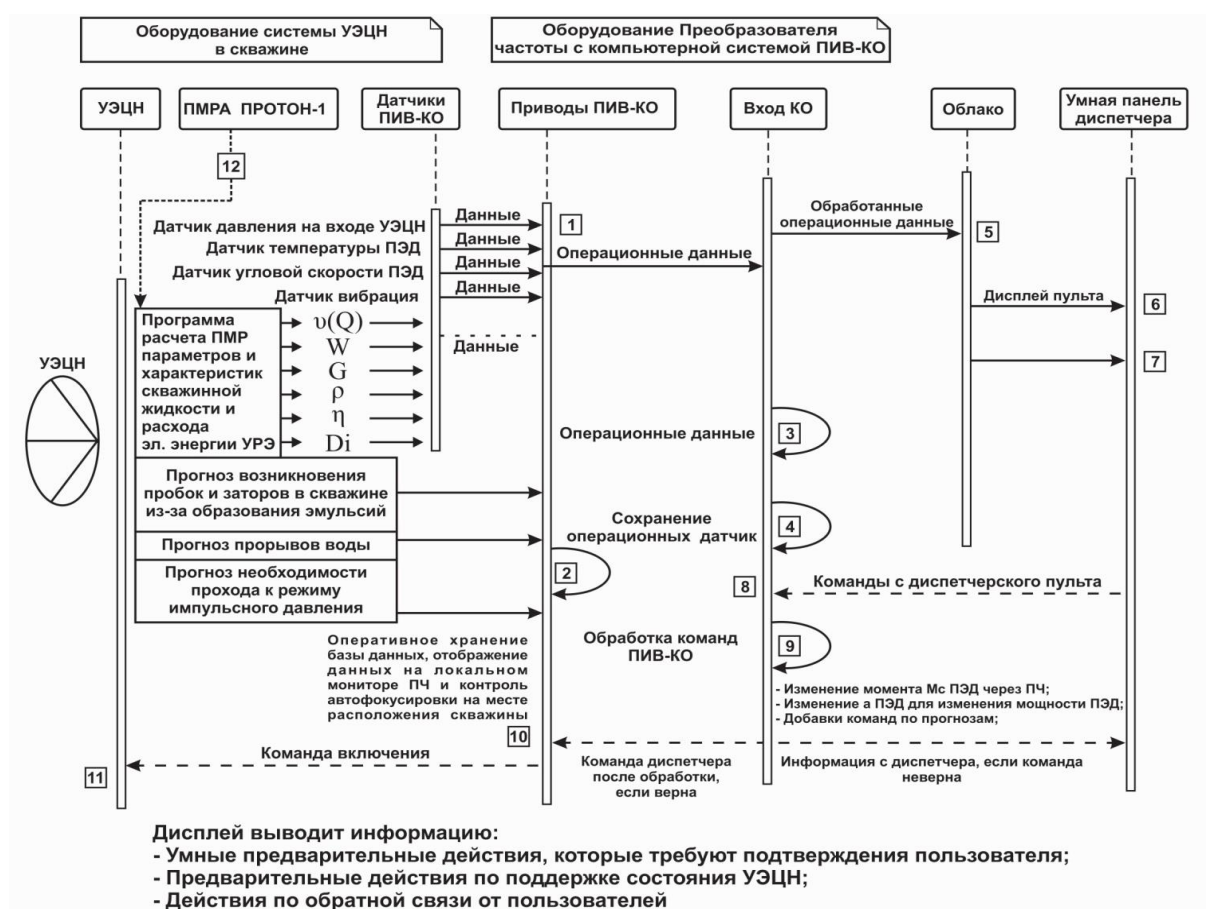


Рисунок 4.5. Диаграмма последовательности сбора и обработки данных в ПИВ-КО. Все датчики ПИВ-КО, УЭЦН и шаг 11 находятся в скважине у насоса; все приводы с датчиками, вход в ПИВ-КО и шаги 1–4, 8–10 – в преобразователе частоты ЭД, канал 12 – для передачи данных от ПМРА-IV – в устье скважины.

ПИВ-КО в сочетании с ПМРА-IV – оптимальная система в ситуациях, когда надежность, всеобъемлющая [133] наблюдаемость данных и безопасность

превышает по значимости все остальные параметры системы мониторинга на ЦМ.

Низкая современная географическая плотность месторождений России препятствует внедрению системы *SCADA* и её масштабированию. Кроме того, она не поддерживает межоперационные связи оборудования и программ, трудна для изменений протоколов, их усовершенствования. Для многих применений были предложены ряд систем, основанных на интернете вещей (ИВ), но архитектура ПИВ–КО с краевой компьютерной обработкой для ЦМ отсутствует несмотря на то, что это значительный прогресс в технике связи между оборудованием и сетью данных. Преимущества системы ПИВ–КО при ее использовании в проектах цифровой добычи полезных ископаемых по сравнению с традиционными системами *SCADA* или автономными системами ИВ представлены в таблице 4.2.

Таблица 4. 2. Сравнение систем мониторинга и контроля ИВ и ПИВ–КО в ЦМ

Системы	<i>SCADA</i>	ИВ	ПИВ–КО
Децентрализация	незначительная	средняя	высокая
Автоматический контроль и обработка в реальном времени	низкая	низкая	высокая
Прозрачность и прослеживаемость данных и их передач	низкая	средняя	высокая
Дороговизна операций	высокая	высокая	низкая
Надежность платформы	незначительная	средняя	высокая

Представленная работа предлагает структуру ПИВ–КО в сочетании с проточным многопараметрическим экспресс–анализом анализатором ПМРА–IV для интеллектуального цифрового нефтяного месторождения, облегчающую быстрый сбор данных по расширенному списку параметров ЭЦН и характеристик СКЖ при удаленном мониторинге, оптимизирующем контрольные измерения. При автоматическом удаленном управлении операциями структура ПИВ–КО снижает потери времени при межаппаратном контакте. Данная система с краевой

субсистемой, контактирующей с «облаком», может быть применена на кустах скважин, на которых отсутствует Интернет. Таким образом, преодолеваются ограничения связанные с рассеянием скважин на большом пространстве.

4.5. Интеллектуальный мониторинг и управление анализатором ПМРА–IV в составе системы интернета вещей

В настоящее время интернет вещей (ИВ) является одной из ключевых тенденций развития в секторах экономики. Однако в нефтегазовой отрасли разработка интеллектуальных нефтяных месторождений с применением ИВ для мониторинга и управления процессами добычи нефти, в том числе с использованием экспресс–онлайн анализаторов, остаётся ограниченной.

Современные системы мониторинга и управления на нефтяных месторождениях, как правило, основаны на SCADA или беспроводных сенсорных сетях. При этом даже современные устройства для анализа нефти, как правило, не обеспечивают возможности полноценного дистанционного мониторинга и управления. В результате непрерывное удалённое наблюдение за изменением параметров нефти непосредственно на скважинах до настоящего времени практически не реализуется.

В рамках настоящей работы автором представлено решение, позволяющее использовать технологии Интернета вещей для интеллектуализации мониторинга и управления на скважинах с применением проточного анализатора ПМРА–IV, функционирующего на основе метода протонного магнитного резонанса. В рамках данной системы интеграция в ИВ осуществляется на уровне релаксометра ПМР, который является функциональным ядром анализатора ПМРА–IV.

Одной из ключевых задач интеллектуализации нефтедобывающей отрасли является разработка быстрых и прямых анализаторов нефти, способных интегрироваться в системы удалённого мониторинга и управления, а также подключаться к сети Интернет. Анализаторы нефти, основанные на методе ПМР, показали, что они являются приборами, позволяющими оперативно определять физико–химические характеристики и состав нефти без контакта с образцом и без

его разрушения в рамках одного анализатора (ПМРА).

Вместе с тем объём данных, формируемых анализатором ПМРА, является значительным, что делает использование традиционных методов передачи данных на базе *SCADA* малопригодным из-за существенных задержек, ограниченной дальности передачи и высоких требований к инфраструктуре [131]. В этой связи применение технологий Интернета вещей для подключения анализатора ПМРА, передачи данных на вторичные устройства и последующей обработки, включая использование нейронных сетей для анализа состава нефти, нефтяных эмульсий и других компонентов [134], является актуальной и неотложной задачей. К основным преимуществам такого подхода относятся упрощение инфраструктуры, возможность хранения и анализа больших массивов данных, а также доступ к ним из любой точки без жёстких требований к устройствам доступа.

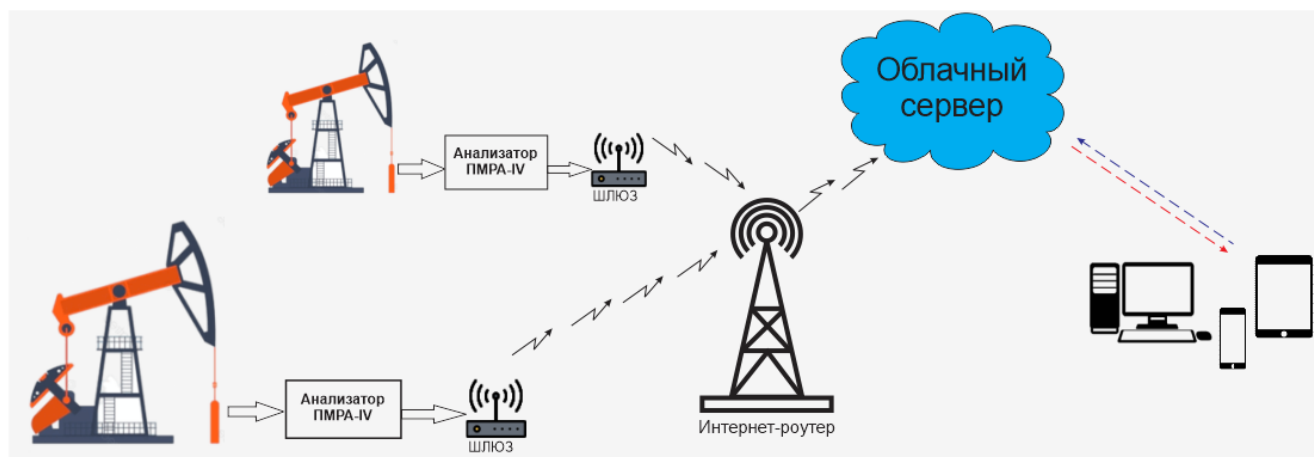


Рисунок 4.6. Мониторинг и контроль выходных параметров анализатора ПМРА–IV в системе Промышленного интернета вещей (ПИВ)

С учётом того, что нефтяные месторождения часто расположены в удалённых районах с низким уровнем технической инфраструктуры, отсутствием стабильного интернет-соединения или покрытия сетей 4G, представленное решение ориентировано на обеспечение передачи данных на большие расстояния с минимальной задержкой и высокой пропускной способностью, а также на создание облачного сервера для удалённого доступа конечных устройств (компьютеров, мобильных телефонов и др.) с целью мониторинга и загрузки

данных. На рисунке 4.6 представлено обобщённое описание решения для мониторинга и контроля параметров анализатора ПМРА–IV на основе технологии ИВ.

Анализатор ПМРА–IV размещается вблизи скважин и используется для непрерывного мониторинга изменений параметров нефти. Подключение анализатора к сети Интернет осуществляется через шлюз. Поскольку в местах добычи нефти интернет–покрытие зачастую отсутствует, в структуре шлюза дополнительно применяются устройства радиопередачи данных, широко используемые в системах Интернета вещей, такие как *LoRa*, *NB–IoT* и др. Интернет–роутеры устанавливаются в зонах с устойчивым доступом к сети Интернет и оснащаются приёмниками радиосигналов, которые принимают данные, преобразуют их и передают на облачный сервер. Доступ к данным осуществляется через *IP*–адреса и браузеры конечных устройств.

В случае расположения скважин в зоне устойчивого интернет–покрытия шлюзы могут подключаться к сети Интернет напрямую и передавать данные с анализатора ПМРА–IV на облачный сервер, минуя промежуточные станции. На рисунке 4.7 представлена блок–схема подключения релаксометра ПМР к промышленному Интернету вещей на нефтяном месторождении.

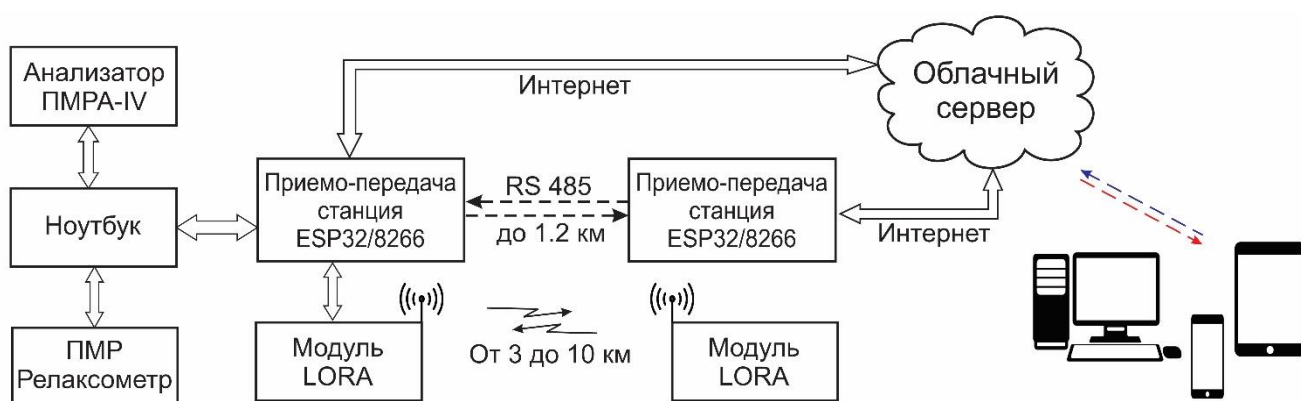


Рисунок 4.7. Блок–схема решения для подключения релаксометра ПМР к ПИВ

Разработанная система обеспечивает подключение релаксометров и анализаторов ПМР, к сети Интернет для интеллектуального мониторинга, дистанционного контроля и управления с использованием технологий ИВ.

Измерительные данные передаются на веб-сервер через сеть Интернет с применением ретрансляционных станций. Доступ к данным возможен с мобильных устройств и персональных компьютеров, подключённых к сети Интернет.

Аппаратная часть системы реализована в виде двух приёмо-передающих станций с идентичной конструкцией. Каждая станция оснащена центральным процессором с возможностью подключения к сети Интернет на базе микроконтроллера *ESP32/8266*, обеспечивающего связь по *WiFi* (рис. 4.8). Дополнительно станции поддерживают другие коммуникационные протоколы, включая *Modbus RTU (RS-485)* и *LoRa*, что позволяет применять систему в условиях отсутствия прямого доступа к сети Интернет.

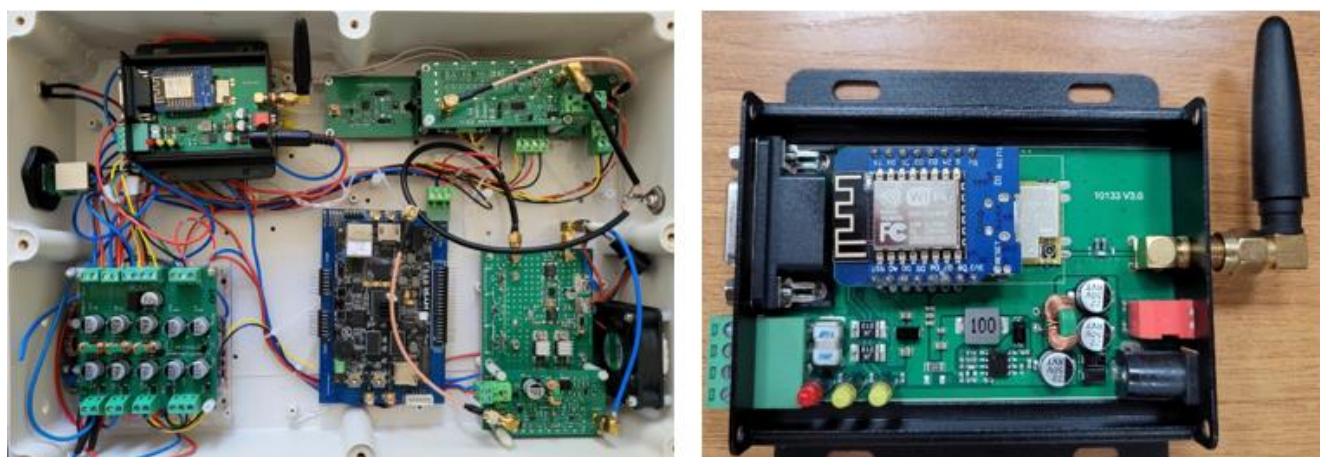


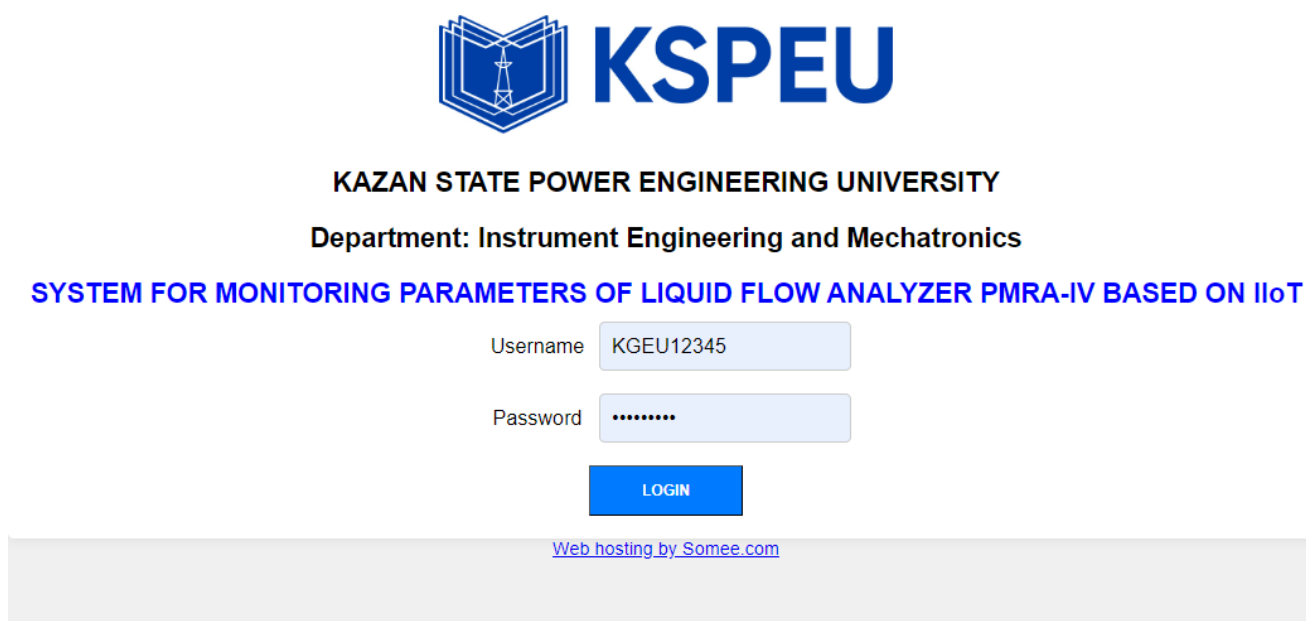
Рисунок 4.8. Аппаратная часть системы на микроконтроллере *ESP32/8266* с подключением к сети Интернет посредством *WiFi* соединения

Для хранения и обработки данных могут использоваться как коммерческие облачные платформы (*Amazon, Google, Яндекс* и др.), так и бесплатные облачные сервисы. Несмотря на ограниченный функционал, бесплатные решения являются достаточными для задач хранения и удалённого доступа к данным.

Автором совместно с научным руководителем и соавторами разработана система мониторинга параметров потока жидкости с использованием анализатора ПМРА-IV в виде веб-интерфейса. Передача данных с анализатора ПМРА-IV на облачный сервер осуществляется с использованием бесплатного сервиса

Somee.com. По адресу *http://mayphantichvn.somee.com* пользователи могут в режиме реального времени отслеживать параметры, передаваемые анализатором, а также загружать данные, сохраняемые в формате файлов *Excel*, что обеспечивает удобство последующего анализа.

Программное обеспечение системы реализовано на основе веб-сервера с размещением базы данных в облачной среде. Данные с релаксометра ПМР-НРЗ передаются на сервер по протоколу *MQTT* через приёмно-передающую станцию, а в облачной среде сохраняются в базе данных *MySQL*. Через веб-интерфейс пользователи могут авторизоваться для удалённого мониторинга, управления и загрузки параметров ПМР. На рисунке 4.9 показан интерфейс входа в систему. Система защищена именем пользователя и паролем для ограничения доступа неавторизованных пользователей.



KSPEU

KAZAN STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY

Department: Instrument Engineering and Mechatronics

SYSTEM FOR MONITORING PARAMETERS OF LIQUID FLOW ANALYZER PMRA-IV BASED ON IIoT

Username

Password

LOGIN

[Web hosting by Somee.com](#)

Рисунок 4.9. Интерфейс входа в систему мониторинга через браузер.

Веб-интерфейс системы показан на рис. 4.10. Слева расположено меню для выбора функций «Мониторинг – *Monitor*», «Отчёт – *Report*», «Управление – *Control*» и «Выход – *Logout*».

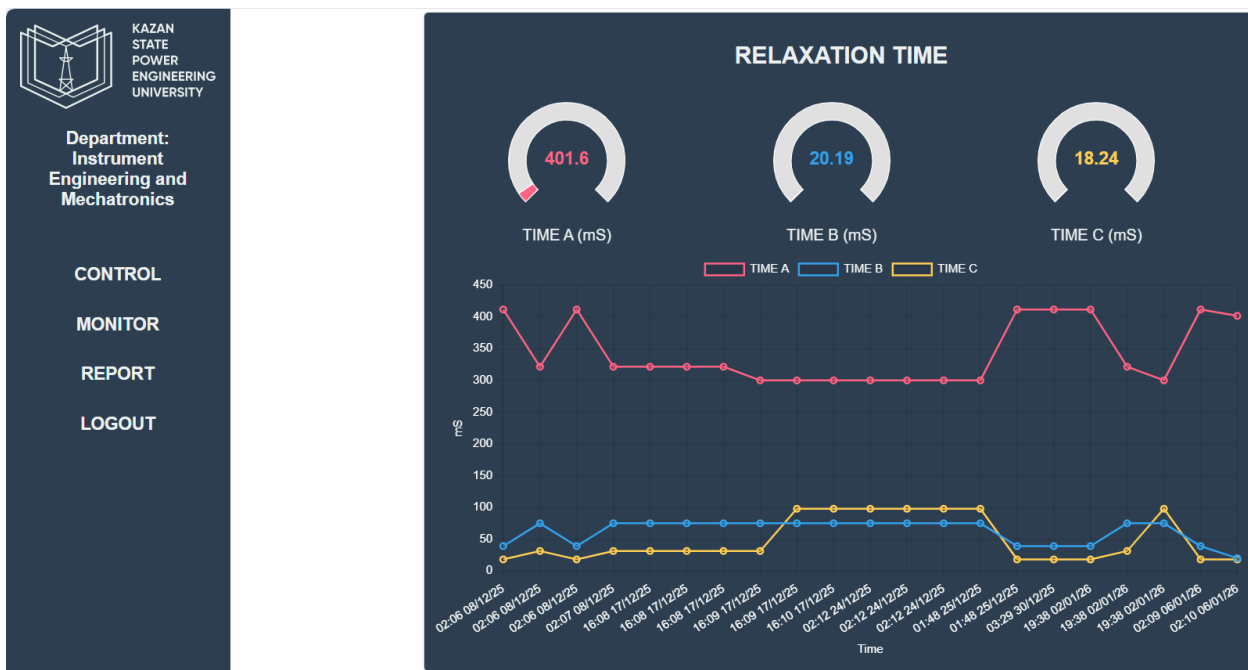


Рисунок 4.10. Интерфейс меню «Мониторинг – *Monitor*» на выходе анализатора ПМРА–IV.

В режиме «Мониторинг» осуществляется слежение за параметрами нефти в реальном времени. Данные визуализируются в виде графиков и индикаторов, при этом значения сохраняются до трёх месяцев, что позволяет анализировать динамику параметров за разные временные интервалы.

Функция «Мониторинг» позволяет пользователям отслеживать параметры и изменения ПМР–характеристик, включая время релаксации ($T_{1,2A,B,C}$), амплитуду сигнала ($A_{1,2A,B,C}$) и концентрацию протонов ($P_{1,2A,B,C}$).

Помимо функции мониторинга и дистанционного контроля параметров ПМРА, дополнительно имеется модуль «Управление», параметры которого совместимы с ПО управления релаксометром ПМР, установленным на компьютере. Данный модуль обеспечивает реализацию двухстороннего взаимодействия между пользователем и измерительным прибором и позволяет гибко настраивать и сбрасывать параметры релаксометра ПМР для адаптации к изменениям условий эксплуатации или аномальному изменению отдельных параметров.

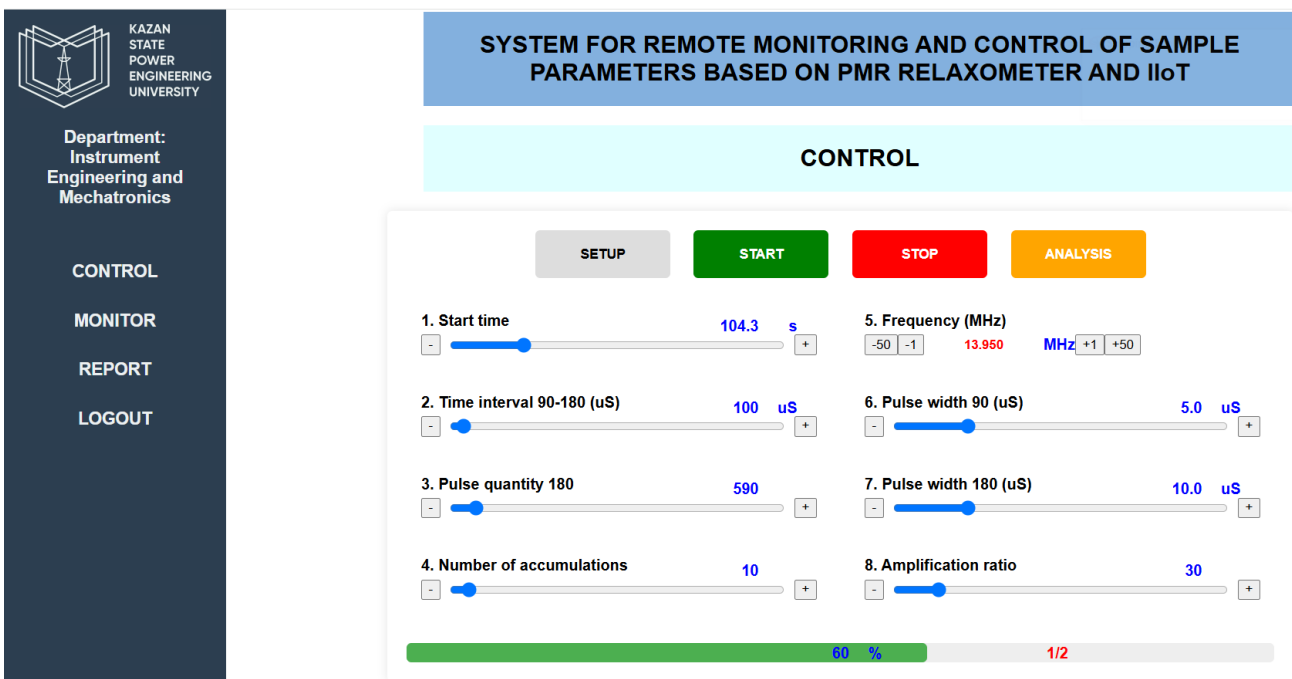
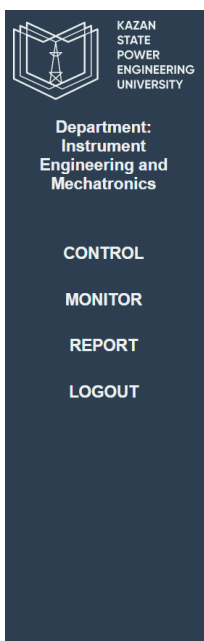


Рисунок 4. 11. Интерфейс меню «Управление – Control»

При работе в режиме «Управление» (рис. 4.11) управляющие параметры формируются в виде пакета данных со структурой *JSON* и передаются с веб-сервера на компьютер через протокол *MQTT* и приёмо-передающие станции. Принцип работы данного канала аналогичен процессу передачи измерительных данных, при этом отличием является направление передачи информации – от веб-сервера к релаксометру ПМР. Реализация данного механизма обеспечивает полноценную двухстороннюю связь, объединяющую функции удалённого мониторинга и дистанционного управления измерительным процессом.

Функция "Отчетность" предоставляет детализированные данные релаксации ПМР в формате таблиц и позволяет пользователям загружать отчеты в формате *MS Excel*. На рисунке 4.12 показан интерфейс «Отчет – Report», который позволяет пользователю полностью отслеживать все изменения параметров после анализа и точное время выполнения этих анализов. Эти данные экспортируются и загружаются в компьютер в формате *Excel* после нажатия кнопки «Экспорт Excel».



SYSTEM FOR REMOTE MONITORING AND CONTROL OF SAMPLE PARAMETERS BASED ON PMR RELAXOMETER AND IIoT

REPORT

Export to Excel

STT	dateTime	timeA	timeB	timeC	amplitudeA	amplitudeB	amplitudeC	concentrationA	concentrationB	concentrationC
1	3/13/2025 3:48:25 PM	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2	3/13/2025 3:48:30 PM	1	2	3	4	5	6	7	8	9
3	3/13/2025 3:48:43 PM	1	2	3	4	5	6	7	8	9
4	3/13/2025 3:48:53 PM	1.5	2	3	4	5	6	7	8	9
5	3/13/2025 3:50:28 PM	1,5	2	3	4	5	6	7	8	9
6	3/13/2025 3:50:39 PM	1.5	2	3	4	5	6	7	8	9
7	10/10/2025 11:53:45 PM	1	2	3	4	5	6	7	8	9
8	10/11/2025 4:17:36 PM	1	2	3	4	5	6	7	8	9
9	10/11/2025 10:04:18 PM	980	100	40	200	100	80	89	8	3
10	10/11/2025 10:04:28 PM	258.56	61.95	26.27	126.54	68.47	10.94	61.44	33.25	5.31
11	10/11/2025 10:04:39 PM	202.02	27.47	0	77.22	122.12	0	37.48	62.52	0
12	10/11/2025 10:06:43 PM	285.56	61.95	26.27	126.54	68.47	10.94	61.44	33.25	5.31
13	10/11/2025 10:06:51 PM	258.56	61.95	26.27	126.54	68.47	10.94	61.44	33.25	5.31
14	10/14/2025 3:05:20 AM	710	65	18	47	190	17	20	78	2

Рисунок 4. 12. Интерфейс «Отчет – Report» для экспорта данных и загрузки в компьютер.

Анализ данных ПМР–параметров позволяет не только определять фазовый состав и содержание компонентов в смесях сырой нефти, но и сравнивать изменения этих параметров во времени между различными объектами добычи. Полученная информация может использоваться для разработки оптимальных стратегий увеличения темпов добычи нефти и корректировки производственных планов в соответствии с текущими условиями эксплуатации.

Интеграция технологий ИВ в приборы измерения параметров релаксации ПМР способствует ускорению модернизации и интеллектуализации процессов измерений, расширяет возможности дистанционного мониторинга и управления и открывает новое направление развития современных измерительно–аналитических приборов для контроля параметров нефти и скважинных флюидов.

4.6. Интеллектуальное устройство для подключения релаксометра ПМР к веб–серверу в ПИВ

Применение интеллектуальных технологий в процессе цифровой трансформации постепенно становится одним из основных направлений развития многих отраслей экономики, включая нефтегазовую промышленность. Одним из

приоритетных направлений цифровой трансформации в нефтегазовой сфере является создание интеллектуальных измерительно–аналитических приборов для контроля параметров буровых и добываемых жидкостей, а также динамики изменения их компонентного состава во времени. Это имеет существенное значение для повышения коэффициента извлечения нефти на зрелых месторождениях и увеличения добычи на новых объектах.

Метод ПМР является одним из наиболее перспективных подходов в технологии неразрушающего анализ. Данный метод позволяет получать информацию о составе и соотношении компонентов в жидких смесях без необходимости отбора большого количества образцов и за сравнительно короткое время анализа. Интеграция технологий ИВ в измерительно–аналитические приборы для оперативного онлайн–контроля параметров нефти методом ПМР способствует развитию интеллектуальных систем в нефтедобывающей отрасли.

Устройство позволяет интегрировать релаксометры ПМР в систему ИВ вещей, создавая возможности формирования интеллектуальных сетей на этапах добычи, транспортировки и переработки нефти и нефтепродуктов. Подобные сети обеспечивают более эффективное использование ресурсов, повышение коммерческой ценности продукции и одновременное снижение рисков, связанных с безопасностью персонала и окружающей среды.

В настоящее время релаксометры ПМР и аналитические устройства на их основе способны передавать результаты анализа, как правило, только посредством специализированного программного обеспечения, установленного на персональном компьютере, либо через промышленные протоколы *Modbus RTU* (*RS–485*) или *SCADA* для передачи данных на другие терминалы. Существенным недостатком такого подхода является необходимость наличия развитой инфраструктуры, включающей базовые станции, кабельные линии передачи данных, преобразователи интерфейсов и другие элементы, которые характеризуются значительными габаритами, высоким энергопотреблением и ограниченной дальностью передачи данных. В результате подобная схема оказывается применимой преимущественно для крупных производственных

комплексов с развитой инфраструктурой.

На момент разработки устройства подключения портативного релаксометра ПМР к веб-серверу в ПИВ отсутствовали технические аналогичные решения. В частности, не существовало решений по интеграции релаксометров ПМР с веб-сервером в рамках ПИВ с использованием *WiFi*-соединения для двусторонней передачи данных. Кроме того, предлагаемое устройство должно обеспечивать резервирование данных перед их отправкой на веб-сервер тогда, когда непосредственное интернет-соединение недоступно вследствие размещения приборов в удалённых районах без покрытия сети. Достижимый технический результат заключается в подключению релаксометров ПМР к веб-серверу по каналу *WiFi* и передачу результатов анализа на сервер, где данные упорядочиваются и сохраняются с объёмом хранения до нескольких гигабайт и сроком хранения от 3 до 6 месяцев без необходимости приобретения дополнительного оборудования или использования платных облачных сервисов.

Устройство и программа его управления разработаны [135–137] на основе микроконтроллеров серии *ESP32/8266*, которые представляют собой бюджетные, но производительные решения с возможностью подключения к сети Интернет посредством *WiFi* и *Bluetooth*, что делает их подходящими для реализации широкого спектра приложений. С учётом условий эксплуатации релаксометров ПМР в районах без интернет устройство дополнительно оснащено интерфейсом *RS-485* для передачи данных по протоколу *Modbus RTU*, а также расширительным модулем *LoRa*. Дальность передачи данных по протоколу *Modbus RTU* достигает 1200 м, а при использовании протокол *LoRa* может составлять до 30 км.

Структурная схема устройства представлена на рис. 4.13. Устройство вместе с персональным компьютером включает следующие основные компоненты: 1 – микроконтроллер *ESP8266*, интегрированный в модуль *WEMOS D1*; 2 – модуль *LoRa*; 3 – преобразователь интерфейсов *TTL/RS-485*; 4 – блок питания; 5 – персональный компьютер; 6 – антенна *WiFi* модуля *WEMOS D1*; 7 – антенна *LoRa*.

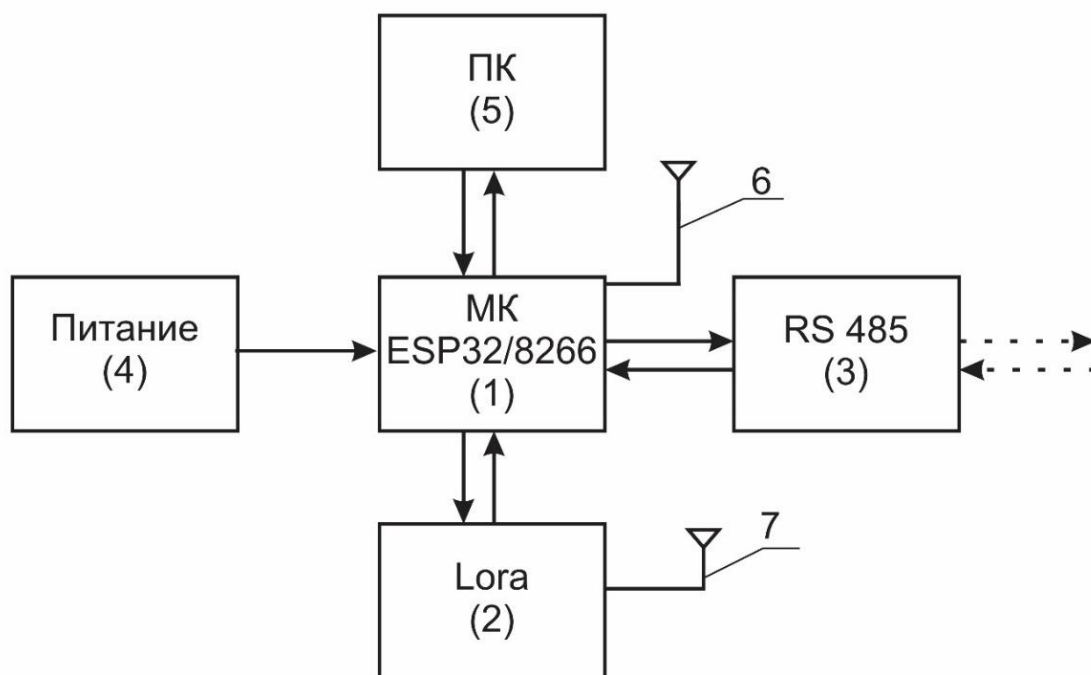


Рисунок 4. 13. Схема функциональных блоков устройства для подключения релаксометра ПМР к веб-серверу

Микроконтроллер *ESP8266*, интегрированный в модуль *WEMOS D1* (1), является центральным элементом устройства. Разработанное программное обеспечение обеспечивает выполнение следующих функций:

- подключение к веб-серверу с использованием протокола *MQTT* через *WiFi*-соединение посредством антенны (6);
- взаимодействие с персональным компьютером (5), приём данных, сформированных после анализа, и их последующую передачу на веб-сервер;
- передачу данных по интерфейсу *RS-485* с использованием протокола *Modbus RTU* в случае отсутствия интернет-соединения;
- взаимодействие с модулем *LoRa* по интерфейсу *SPI* для передачи данных с использованием протокола *LoRa*.

При включении устройства блок питания (4) подаёт постоянное напряжение 5 В на все элементы схемы. Устройство выполняет сканирование доступных *WiFi*-сетей и сопоставляет их с сетями, предварительно сохранёнными в памяти. При наличии нескольких сохранённых сетей автоматически выбирается сеть с наибольшим уровнем сигнала. Программный код микроконтроллера (1) с

периодичностью один раз в минуту осуществляет опрос последовательного порта (*Serial*) на наличие пакетов данных, переданных от компьютера (5) и при получении пакета немедленно отправляет его на веб-сервер по протоколу *MQTT*.

В случае отсутствия доступной *WiFi*-сети микроконтроллер инициирует проверку наличия приёмного устройства по протоколу *Modbus RTU* через порт *RS-485* (3), передавая контрольный сигнал соединения. При наличии отклика данные передаются по протоколу *Modbus RTU*. Если ответный сигнал отсутствует, пакет данных перенаправляется на модуль *LoRa* (2) по интерфейсу *SPI*, шифруется и передаётся по радиоканалу *LoRa* через антенну (7) на приёмное устройство. Приёмное устройство, имеющее аналогичную структуру, но размещённое в зоне с доступом к сети Интернет, принимает данные и передаёт их на веб-сервер. На рисунке 4.14 представлены результаты разработки приемопередающей станции для подключения релаксометра к ПИВ.



Рисунок 4.13. Приемопередающая станция для подключения релаксометра к ПИВ

Разработанное устройство, реализованное на базе микроконтроллеров серии *ESP* с возможностью подключения к сети Интернет через *WiFi*, обеспечивает передачу данных о параметрах релаксации ПМР на веб-сервер по протоколу *MQTT* и дополнительно поддерживает альтернативные каналы связи, включая *Modbus RTU (RS-485)* и *LoRa*, что расширяет область его практического применения.

4.7. Выводы по главе 4

В главе 4 решены научно–технические задачи, связанные с разработкой и внедрением проточных протонных магнитно–резонансных анализаторов и средств их интеграции в систему цифрового нефтяного месторождения.

1. Установлена возможность экспресс–контроля содержания асфальтенов и парафинов в сырой нефти на основе параметров ПМР–релаксации, что подтверждает эффективность метода протонного магнитного резонанса для оперативной оценки свойств нефти без разрушения образца.

2. Обоснована целесообразность применения проточного анализатора ПМРА–IV для промыслового мониторинга параметров нефти в режиме, приближенном к реальному времени, что позволяет повысить информативность и оперативность контроля технологических процессов добычи.

3. Разработан подход к интеграции анализатора ПМРА–IV в систему промышленного Интернета вещей, при котором интеграция осуществляется на уровне релаксометра ПМР как функционального ядра анализатора, обеспечивая удалённый мониторинг параметров и расширение возможностей цифровизации месторождений.

4. Реализована система двустороннего взаимодействия с анализатором ПМРА–IV, обеспечивающая дистанционный мониторинг и управление параметрами релаксометра ПМР через веб–интерфейс с использованием протокола *MQTT*.

5. Разработано интеллектуальное устройство для подключения портативного релаксометра ПМР к веб–серверу в составе ПИВ с поддержкой резервирования данных и альтернативных каналов связи, что обеспечивает его применение в условиях ограниченной телекоммуникационной инфраструктуры.

Полученные результаты подтверждают научную и практическую значимость предложенных решений и демонстрируют перспективность применения метода ПМР в сочетании с технологиями Интернета вещей для создания интеллектуальных систем мониторинга и управления в нефтегазовой отрасли.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Рассчитаны, разработаны и испытаны многослойный магнит Хальбаха для релаксометра ПМР и проточного анализатора ПМРА–IV, обладающий по сравнению с аналогами увеличенным объёмом области однородного магнитного поля (до 5,12 см³ при $B_0 = 0,3068$ Тл), при высокой однородности $\Delta B/B_0 = 260$ ppm/см³, а также уменьшенными габаритами и массой. Диаметр рабочего зазора магнита ($d = 30$ мм) позволяет использовать образцы большего объёма, что приводит к повышению отношения С/Ш и упрощает интеграцию дополнительных элементов.

2. Разработаны программное обеспечение для управления, сбора и обработки данных, а также новая схемотехника электронных блоков релаксометра ПМР на основе современной элементной базы, включая: цифровую схему обработки сигналов на базе ПЛИС ZYNQ-7020; формирователь импульсных последовательностей на основе прямого цифрового синтеза; полосовой фильтр, предусилитель и усилитель мощности передатчика; малошумящий, управляемый напряжением усилитель, детектор приёмника и ПМР–датчик с переключателем приём/передача.

3. Разработан измеритель индукции магнитного поля с диапазоном измерений 0–1,25 Тл и термостабилизатор для магнита и образца на основе элементов Пельтье с возможностью задания температуры.

4. С учетом усовершенствования блоков релаксометра ПМР–NP3 разработан автоматический проточный анализатор ПМРА–IV четвертого поколения. Преимущества анализатора ПМРА–IV по сравнению с лучшим зарубежным аналогом MFMA–5000 (Krohne) включают: более высокую частоту резонанса (в 1,63 раза), более широкую номенклатуру определяемых характеристик нефти, возможность подключения к магистральным трубопроводам любого диаметра, повышение представительности пробоотбора, а также меньшие габариты и массу. Применение предварительного подмагничивания магнитом Хальбаха приводит к увеличению намагниченности водной фазы примерно в 5,3 раза, что сопровождается повышением отношения С/Ш и достоверности измерений.

5. Разработан усовершенствованный проточный модуль пробоотбора с внутренним байпасом и блоком управления пробоотборным патрубком компактного исполнения, интегрированным в корпус модуля, обеспечивающий точное позиционирование пробоотборного патрубка и подачу заданного объёма пробы в ПМР–датчик, что приводит к повышению представительности пробы и достоверности измерений.

6. Исследованы зависимости параметров ПМР–релаксации от концентрации асфальтенов в нефтях *Bach Ho* и *Ca Ngu Vang*, получены соотношения, по которым можно оперативно определять концентрацию асфальтенов и предлагать меры по преотращению АСПО.

7. Исследованы температурные зависимости времен релаксации в нефти *Ca Ngu Vang*. Сделан вывод, что энергии активации молекулярного движения при низких температурах в 4–12 раз превышают значения, характерные для высокотемпературной области, что свидетельствует о формировании упорядоченных структур. Населённость протонов P_{2B} фазы составляет $\approx 20\pm 2\%$, что хорошо согласуется с содержанием парафинов. Полученные результаты подтверждают перспективность ПМР–анализа для оценки реологических свойств нефти.

8. В температурной зависимости $T_{1A,B}$ газоконденсата зафиксирован минимум при температурах $-5\div +3^\circ\text{C}$, при котором происходит таяние поликристаллической структуры, видимой оптически. В области $10^3/TK \approx 3,37$ выявлен фазовый переход, сопровождающийся таянием квазикристаллической гелевой структуры и скачкообразным увеличением времен T_2 . При дальнейшем нагревании ($T > 5^\circ\text{C}$) наблюдается рост T_{2A} и T_{2B} , обусловленный усилением молекулярного движения.

9. Предложены и обоснованы области применения анализатора ПМРА–IV на цифровом нефтегазовом месторождении, а также разработано устройство для подключения релаксометра ПМР к веб–серверу промышленного Интернета вещей.

ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ

Тема диссертационного исследования имеет значительные перспективы дальнейшего развития, связанные с совершенствованием методов и средств автоматизированного проточного ПМР-контроля характеристик нефти, газоконденсата и пластовых жидкостей скважин в условиях цифровых месторождений.

Перспективным направлением является создание распределённой сети интеллектуальных приборно-программных комплексов для непрерывного мониторинга параметров добываемых углеводородных сред в режиме реального времени с использованием технологий промышленного Интернета вещей, облачных платформ и цифровых систем управления нефтегазодобычей. Дальнейшее развитие темы связано с расширением функциональных возможностей анализатора ПМРА–IV, повышением точности и устойчивости измерений в условиях сложных многофазных потоков, а также совершенствованием алгоритмов цифровой обработки и интерпретации ПМР-сигналов.

Практический интерес представляет адаптация разработанных технических решений для эксплуатации на морских нефтегазовых месторождениях Вьетнама, характеризующихся большим количеством удалённых скважин в пределах единой производственной инфраструктуры. Внедрение автоматизированных ПМР-систем контроля может обеспечить повышение эффективности мониторинга технологических процессов, получение оперативной информации о состоянии пластов и остаточных запасах углеводородов, снижение эксплуатационных затрат и повышение экономической эффективности нефтедобычи.

Дальнейшее развитие исследований также может быть связано с интеграцией ПМР-анализаторов в интеллектуальные системы поддержки принятия решений, цифровые двойники месторождений и автоматизированные комплексы управления добычей нефти и газа.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи автора в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus

A1. Kashaev R., Anh N.D, 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. Vol. 16. No. 3. P. 1080. DOI 10.3390/en16031080 (МБД SCOPUS Q2, приравнено к публикации ВАК К1).

A2. Tran Van Tung, Kashaev Rustem Sultankhamitovich, Nguyen Duc Anh. Research on the application of IoT solution for rapid control of oil parameters in smart oil fields based on proton magnetic resonance method. 2025 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russian Federation, 2025, pp. 518–523 doi: 10.1109/ICIEAM65163.2025.11028468 (МБД SCOPUS).

A3. Kashaev R.S., Kozelkova V. O., Anh N.D., Kozelkov O.V. Application of a Portable Proton NMR Flow Analyzer for Rapid Monitoring of Petroleum Product Properties and Water Contamination // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2025. Vol. 59. No. 2. P. 463–470. DOI 10.1134/S0040579525700721 (МБД SCOPUS Q4, приравнено к публикации ВАК К2).

Статьи в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК по специальности диссертации

A4. Кашаев Р.С., Нгуен Дык Ань, Козелков О.В. Проточный экспресс-анализатор проточного магнитного резонанса в составе промышленного интернета вещей // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2024. Т. 67. № 5. С. 425–434. DOI 10.17586/0021–3454–2024–67–5–425–434 (ВАК К1).

A5. Нгуен Д.А., Кашаев Р.С., Козелков О.В., Арсланов А.Д., Чан В.Т. 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 (ВАК К2).

А6. Арсланов А.Д., Нгуен Д.А., Кашаев Р.С., Козелков О.В., Чан В.Т. Анализатор нефти ПМРА–IV для автоматизированного контроля характеристик исследуемых образцов // Автоматизация в промышленности. 2025. № 1. С. 50–53 (ВАК К2).

А7. Нгуен Д. А., Кашаев Р.С., Козелков О.В. Разработка многослойных усовершенствованных магнитных сборок Хальбаха для ПМР-релаксометра на основе оптимизации параметров магнита // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2025. Т. 27. № 2. С. 20–32. DOI 10.30724/1998–9903–2025–27–2–20–32 (ВАК К2).

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

А8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024615694 Российская Федерация. Программа визуализации зависимостей характеристик нефти от параметров протонной магнитной резонансной релаксометрии для системы контроля проточного ПМР-анализатора: № 2024613804; заявл. 27.02.2024; опублик. 12.03.2024 / Арсланов А.Д., Кашаев Р.С., Козелков О.В., Нгуен Д.А., Галиев А.Б.; заявитель ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет».

А9. Свидетельство о государственной 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. 19.09.2024; опублик. 01.10.2024 / Арсланов А.Д., Кашаев Р.С., Козелков О.В., Нгуен Д.А., Галиев А.Б.; заявитель ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет».

А10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025667277 Российская Федерация. Система дистанционного мониторинга и контроля параметров образцов на основе ПМР–релаксометра и IoT: заявл.

10.06.2025; опубл. 03.07.2025 / Нгуен Д.А., Кашаев Р.С., Динь. Т.Н., Чан В.Т.; заявитель ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет».

Патенты на изобретение

A11. Патент № 2808801 С1 Российская Федерация, МПК H01F 7/00, H01F 10/12, H01F 10/26. Магнит: № 2023105051; заявл. 06.03.2023; опубл. 05.12.2023 / Кашаев Р.С., Нгуен Д.А.; заявитель ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет».

A12. Патент № 2813962 С1 Российская Федерация, МПК G01N 24/08. Способ и устройство для определения скоростей потока (расхода) и концентрации воды в водо–нефтяных смесях: № 2023105685; заявл. 13.03.2023; опубл. 20.02.2024 / Кашаев Р.С., Нгуен Д.А., Козелков О.В.; заявитель ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет».

A13. Патент № 2860172 С1 Российская Федерация, МПК F25B 29/00, F28D 1/00. Стабилизатор температуры для магнита и образцов с терморегулятором: № 2025107576; заявл. 28.03.2025; опубл. 14.04.2026 / Кашаев Р.С., Нгуен Д.А., Козелков О.В.; заявитель ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет».

Публикации в прочих рецензируемых научных изданиях

A14. Кашаев Р.С., Нгуен Дык Ань, Козелков О.В. Мехатронный проточный анализатор жидкости на базе метода протонного магнитного резонанса // Мехатроника, автоматика и робототехника. 2023. № 11. С. 176–179. DOI 10.26160/2541–8637–2023–11–176–179.

A15. Nguyen Duc Anh, Kashaev R.S., Tran Van Tung. Research and development of equipment to determine the parameters of crude oil on the basis of application nuclear magnetic resonance method // HaUI Journal of Science and Technology. 2024. Vol. 60. No. 9. pp. 199–205. DOI: 10.57001/huih 5804.2024.316.

A16. Нгуен Дык Ань, Нгуен Вьет Тьеп, Нго Кьен Динь. Разработка термостабилизатора для магнита и образца с терморегулятором ядерно-

магнитного резонансного релаксометра // Journal of Advanced Research in Technical Science. 2025. № 47. С. 77–82. DOI 10.26160/2474–5901–2025–47–77–82.

Публикации в материалах докладов международных и всероссийских научных конференций

A17. Нгуен Д.А., Кашаев Р.С. Усовершенствование модели магнита Хальбаха для релаксометра протонного магнитного резонанса // Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно–энергетическом комплексе и жилищно–коммунальном хозяйстве : Материалы VIII Национальной научно–практической конференции, Казань, 08–09 декабря 2022 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2023. – С. 82–87.

A18. Кашаев Р.С., Нгуен Дык Ань, Козелков О.В. Apparatus–program complex for on–line express–control of crude oils properties by proton magnetic resonance method // Materials of International University Scientific Forum Practice Oriented Science: UAE – RUSSIA – INDIA January 27, 2023. С– 213–220. doi:10.34660/inf.2023.28.21.081.

A19. Нгуен Д.А., Кашаев Р.С. Методы прямого цифрового синтеза и генераторы высокочастотных сигналов для портативных приборов ЯМР // Теоретические и практические аспекты развития науки в современном мире: сборник статей международной научной конференции, Санкт–Петербург, 17 марта 2023 года. – СПб: Частное научно–образовательное учреждение дополнительного профессионального образования Гуманитарный национальный исследовательский институт «НАЦРАЗВИТИЕ», 2023. – С. 45–50.

A20. Нгуен Д.А., Кашаев Р.С., Козелков О.В. Устройство для измерения параметров постоянного и переменного магнитных полей // Высшая школа: научные исследования : материалы Межвузовского международного конгресса, Москва, 13 октября 2023 года. – Москва: Инфинити, 2023. – С. 149–154. – DOI 10.34660/INF.2023.24.72.390.

A21. Нгуен Д.А., Козелков О.В., Кашаев Р.С. Применение метода протонной магнитной резонансной релаксометрии при контроле качества сырья // Высшая

школа: научные исследования : материалы Межвузовского международного конгресса, Москва, 13 октября 2023 года. – Москва: Инфинити, 2023. – С. 155–159. – DOI 10.34660/INF.2023.79.96.391.

A22. Нгуен Д.А., Кашаев Р.С., Козелков О.В. Разработка усовершенствованных магнитов на сборке Хальбаха и приборов для измерений магнитного поля // 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. 311–315.

A23. Темников А.Н., Нгуен Д.А., Кашаев Р.С. Разработка блоков портативного релаксометра протонного магнитного резонанса // Исследовательский проект года 2023 : Сборник статей II Международного научно–исследовательского конкурса, Петрозаводск, 13 ноября 2023 года. – Петрозаводск: Международный центр научного партнерства «Новая Наука», 2023. – С. 28–36.

A24. Нгуен Д.А., Кашаев Р.С., Козелков О.В., Чан В.Т. Исследования по разработке оборудования для формирования последовательности импульсов для ПМР–релаксометров // 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. 82–85.

A25. Нгуен Д.А., Кашаев Р.С. Экспресс–контроль содержания асфальтенов и парафинов в сырой нефти с месторождения во Вьетнаме с помощью метода протонного магнитного резонанса // Технологический суверенитет и цифровая трансформация : Международная научно–техническая конференция, Казань, 04 апреля 2024 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2024. – С. 161–166.

A26. 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.

A27. Нгуен Д.А., Арсланов А.Д., Галиев А.Б. Разработка усовершенствованного управляемого напряжением усилителя для приемника релаксометра 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. 205–208.

A28. 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.

A29. Галиев А.Б., Арсланов А.Д., Нгуен Д.А., Козелков О.В. 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.

A30. Нгуен Д.А., Кашаев Р.С. Разработка усовершенствованного малошумящего усилителя для приемника ПМР–релаксометра // ПЕРЕДОВОЕ развитие современной науки: опыт, ПРОБЛЕМЫ, ПРОГНОЗЫ : Сборник статей XIV Международной научно–практической конференции, Петрозаводск, 26 сентября 2024 года. – Петрозаводск: Международный центр научного партнерства «Новая Наука» (ИП Ивановская И.И.), 2024. – С. 130–133.

A31. Нгуен Д.А., Кашаев Р.С., Козелков О.В. Разработка усовершенствованного усилителя мощности последовательности импульсов

КПМГ для передатчика портативного ПМР–релаксометра // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии : сборник трудов XXI Международной научно–практической конференции, Сочи, 01–10 октября 2024 года. – Москва: Ассоциация выпускников и сотрудников ВВИА им. проф. Жуковского, 2024. – С. 299–301.

А32. Нгуен Д.А., Кашаев Р.С., Арсланов А.Д., Чан В.Т. Решение для интеллектуального мониторинга и управления анализатором протонного магнитного резонанса ПМРА–IV на основе Интернета вещей // Интеллектуальная энергетика : Сборник трудов II Всероссийской научно–практической конференции, Томск, 12–14 ноября 2024 года. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2024. – С. 53–56.

А33. Нгуен Д.А., Чан В.Т. Решение для интеллектуального мониторинга и управления анализатором протонного магнитного резонанса ПМРА–IV на основе интернета вещей // Механика и машиностроение. Наука и практика : Материалы международной научно–практической конференции, Санкт–Петербург, 27 ноября 2024 года. – Санкт–Петербург: ИП Жукова Е.В., 2024. – С. 49–53.

А34. Нгуен Д.А., Арсланов А.Д., Кашаев Р.С. Устройство стабилизации и контроля температуры образцов для ПМР–анализаторов // XXVIII Всероссийский аспирантско–магистерский научный семинар, посвященный дню энергетика : Материалы докладов. В 3–х томах, Казань, 05–06 декабря 2024 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2024. – С. 747–751.

А35. Арсланов А.Д., Нгуен Д.А. Методика измерения серы в нефтях с использованием автоматизированного устройства ПМР–анализатора // XXVIII Всероссийский аспирантско–магистерский научный семинар, посвященный дню энергетика : Материалы докладов. В 3–х томах, Казань, 05–06 декабря 2024 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2024. – С. 718–721.

А36. Нгуен Д.А., Кашаев Р.С. Разработка устройства для подключения ПМР релаксометра к интернету вещей в рамках интеллектуального нефтегазового месторождения // Приборостроение и автоматизированный электропривод в

топливно–энергетическом комплексе и жилищно–коммунальном хозяйстве : X Национальная научно–практическая конференция, Казань, 12–13 декабря 2024 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2025. – с.87–90 – ISBN 978–5–89873–687–3.

А37. Нгуен Д.А., Кашаев Р.С. Интеллектуальное решение для контроля свойств сырой нефти с использованием ядерного магнитного резонанса и промышленного интернета вещей // Технологический суверенитет и цифровая трансформация : Материалы международной научно–технической конференции, Казань, 03 апреля 2025 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2025. – С. 251–253.

А38. Нгуен Д.А., Кашаев Р.С. Стабилизатор температуры для магнита и образцов с терморегулятором портативного ПМР–релаксометра // Перспективы развития фундаментальных наук : Сборник научных трудов XXII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 7–ми томах, Томск, 22–25 апреля 2025 года. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2025. – С. 83–85.

А39. Нгуен Д.А., Кашаев Р.С. Оценка эффективности работы формирователя последовательности высокочастотных импульсов КПИМГ с помощью модулятора QAM // Тинчуриные чтения – 2025 «Энергетика и цифровая трансформация» : статьи по материалам Международной молодежной научной конференции. В четырех томах, Казань, 23–25 апреля 2025 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2025. – С. 219–222.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тихомирнов Л. И. Цифровизация: ключевые факторы успеха // Нефтегаз. – 2019. – № 1–2. – С. 142–143.
2. Dalitz F., Cudaj M., Maiwald M., Guthausen G. Process and reaction monitoring by low-field NMR spectroscopy // *Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy*. – 2012. – Vol. 60. – P. 52–70. – DOI: 10.1016/j.pnmrs.2011.11.003.
3. Safieva R. Z., Mishin V. D. Systems analysis of the evolution of views on oil systems: from petroleum chemistry to petroinformatics // *Petroleum Chemistry*. – 2021. – Vol. 61. – P. 539–554.
4. Чижик В. И. Квантовая радиофизика. – СПб. : Изд-во Санкт Петербургского университета, 2004. – 689 с.
5. Khasanova N., Sakharov B., Volkov V., Nourgaliev D. Low-field NMR method for analysis of heavy oils without extraction of asphaltenes // *Proceedings of the 17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2017*. – P. 297–304. – ISBN 978-619-7408-26-3; ISSN 1314-2704. – DOI: 10.5593/sgem2017H/15/S06.038.
6. Вашман А. А., Пронин И. С. Ядерная магнитная релаксация и ее применение в химической физике. – М. : Наука, 1979. – 235 с.
7. Калабин Г. А., Каницкая Л. В., Кушнарев Д. Ф. Количественная спектроскопия ЯМР природного органического сырья и продуктов его переработки. – М. : Химия, 2000. – 410 с.
8. Shkalikov N. V., Skirda V. D., Arkhipov R. V. Solid-like Component in the Spin-Spin NMR-Relaxation of Heavy Oils // *Magnetic Resonance in Solids. Electronic Journal*. – 2006. – Vol. 8, No. 1. – P. 38–42. – URL: https://mrsej.kpfu.ru/contents/2006/MRSej_060801038.pdf.
9. Hogendoorn J., Boer A., Appel M., de Jong H., de Leeuw R. Magnetic Resonance Technology: a new concept for multiphase flow measurement // *31st International North Sea Flow Measurement Workshop (Tønsberg, Norway, 22–25 Oct. 2013)*. – P. 25.

10. Constantinesco A., Choquet P., Cauffet G., Fournier J. M., Ravier S., Drillon J. M., Aubert G. Low-field dedicated and desktop magnetic resonance imaging systems for agricultural and food applications // *Magnetic Resonance in Chemistry*. – 1997. – Vol. 35. – P. S69–S75. – DOI: 10.1002/(SICI)1097-458X(199712)35:12S69::AID-MRC2843.0.CO;2-J
11. Mitchell J., Chandrasekera T. C., Holland D. J., Gladden L. F., Fordham E. J. Magnetic resonance imaging in laboratory petrophysical core analysis // *Physics Reports*. – 2013. – Vol. 526, No. 4. – P. 165–225. – DOI: 10.1016/j.physrep.2013.01.003.
12. Mitchell J., Chandrasekera T. C., Fordham E. J. Nuclear magnetic resonance relaxometry // *Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy*. – 2014. – Vol. 76. – P. 1–60. – DOI: 10.1016/j.pnmrs.2013.11.001.
13. Allen D. F., Crary S., Freedman R., Andreani M., Klopff W., Badry R., Flaum C., Kenyon W. E., Kleinberg R. L., Gossenberg R., Horkowitz D., Logan P., Singer J., White J. How to use borehole nuclear magnetic resonance // *Schlumberger Oilfield Review*. – 1997. – Vol. 9, No. 2. – P. 34–57.
14. Allen D. F., Flaum C., Ramakrishnan T. S., Bedford J., Castelijn K., Fairhurst D., Gubelin G., Heaton N. J., Minh C. C., Norville M. A., Seim M. R., Pritchard T., Ramamoorthy R. Trends in NMR logging // *Schlumberger Oilfield Review*. – 2000. – Vol. 12, No. 1. – P. 2–19.
15. Mitchell J., Chandrasekera T. C., Johns M. L., Gladden L. F., Fordham E. J. Nuclear magnetic resonance relaxation and diffusion in the presence of internal gradients: the effect of magnetic field strength // *Physical Review E*. – 2010. – Vol. 81. – Art. No. 026101. – DOI: 10.1103/PhysRevE.81.026101
16. Haishi T., Uematsu T., Matsuda Y., Kose K. Development of a 1.0 T MR microscope using a Nd-Fe-B permanent magnet // *Magnetic Resonance Imaging*. – 2001. – Vol. 19, No. 6. – P. 875–880. – DOI: 10.1016/S0730-725X(01)00327-4.
17. Raich H., Blümler P. Design and construction of a dipolar Halbach array with a homogeneous field from identical bar magnets: NMR mandhalas // *Concepts in Magnetic Resonance Part B: Magnetic Resonance Engineering*. – 2004. – Vol. 23B, No.

1. – P. 16–25. – DOI: 10.1002/cmr.b.20014.

18. Danieli E., Mauler J., Perlo J., Blümich B., Casanova F. Mobile sensor for high resolution NMR spectroscopy and imaging // *Journal of Magnetic Resonance*. – 2009. – Vol. 198, No. 1. – P. 80–87. – DOI: 10.1016/j.jmr.2009.01.010.

19. Küster S. K., Casanova F., Danieli E., Blümich B. High-resolution NMR spectroscopy under the fume hood // *Physical Chemistry Chemical Physics*. – 2011. – Vol. 13. – P. 13172–13176. – DOI: 10.1039/C1CP20369A.

20. Carr H. Y., Purcell E. M. Effects of diffusion on free precession in nuclear magnetic resonance experiments // *Physical Review*. – 1954. – Vol. 94, No. 3. – P. 630–638. – DOI: 10.1103/PhysRev.94.630.

21. Meiboom S., Gill D. Modified spin-echo method for measuring nuclear relaxation times // *Review of Scientific Instruments*. – 1958. – Vol. 29, No. 8. – P. 688–691. – DOI: 10.1063/1.1716296.

22. Vold R. L., Vold R. R., Simon H. E. Errors in measurements of transverse relaxation rates // *Journal of Magnetic Resonance*. – 1973. – Vol. 11. – P. 283–298. – DOI: 10.1016/0022-2364(73)90055-2.

23. Hoult D. I. Fast recovery with a conventional probe // *Journal of Magnetic Resonance*. – 1984. – Vol. 57. – P. 394–403. DOI: 10.1016/0022-2364(84)90207-5.

24. Moskau D. Application of real-time digital filters in NMR spectroscopy // *Concepts in Magnetic Resonance*. – 2001. – Vol. 15, No. 3. – P. 164–176. – DOI: 10.1002/cmr.1020.

25. Levitt M. H. The signs of frequencies and phases in NMR // *Journal of Magnetic Resonance*. – 1997. – Vol. 126. – P. 164–182. – DOI: 10.1006/jmre.1997.1076.

26. Hoult D. I., Richards R. E. The signal-to-noise ratio of the nuclear magnetic resonance experiment // *Journal of Magnetic Resonance*. – 1976. – Vol. 24. – P. 71–85. – DOI: 10.1016/0022-2364(76)90233-X.

27. Singer P. M., Leu G., Fordham E. J., Sen P. N. Low magnetic fields for flow propagators in permeable rocks // *Journal of Magnetic Resonance*. – 2006. – Vol. 183. – P. 167–177. – DOI: 10.1016/j.jmr.2006.08.004.

28. Vold R., Waugh J., Klein M., Phelps D. Measurement of spin relaxation in complex systems // *Journal of Chemical Physics*. – 1968. – Vol. 48, No. 8. – P. 3831–3832. – DOI: 10.1063/1.1669674.
29. Chandrasekera T. C., Mitchell J., Fordham E. J., Gladden L. F., Johns M. L. Rapid encoding of T_1 with spectral resolution in n-dimensional relaxation correlations // *Journal of Magnetic Resonance*. – 2008. – Vol. 194. – P. 156–161. – DOI: 10.1016/j.jmr.2008.06.011.
30. Hahn E. L. Nuclear induction due to free Larmor precession // *Physical Review*. – 1950. – Vol. 77, No. 2. – P. 297–298. – DOI: 10.1103/PhysRev.77.297.
31. Callaghan P. T. Principles of nuclear magnetic resonance microscopy. – Oxford: Clarendon Press, 1991. – 492 p.
32. Palmer R. G., Stein D. L., Abrahams E., Anderson P. W. Models of hierarchically constrained dynamics for glassy relaxation // *Physical Review Letters*. – 1984. – Vol. 53, No. 10. – P. 958–961. – DOI: 10.1103/PhysRevLett.53.958.
33. Boguszynska J., Brown M. C. A., McDonald P. J., Mitchell J., Mulheron M., Tritt-Goc J., Verganelakis D. A. Magnetic resonance studies of cement based materials in inhomogeneous magnetic fields // *Cement and Concrete Research*. – 2005. – Vol. 35, No. 10. – P. 2033–2040. – DOI: 10.1016/j.cemconres.2005.06.012.
34. Liu G., Li Y., Jonas J. Confined geometry effects on reorientational dynamics of molecular liquids in porous silica glasses // *The Journal of Chemical Physics*. – 1991. – Vol. 95, No. 9. – P. 6892–6901. – DOI: 10.1063/1.461501.
35. Mitchell J., Staniland J., Wilson A., Howe A., Clarke A., Fordham E. J., Edwards J., Faber R., Bouwmeester R. Magnetic resonance imaging of chemical EOR in core to complement field pilot studies // *International Symposium of the Society of Core Analysts (Aberdeen, Scotland, 27–30 Aug. 2012)*. – Paper SCA2012–30.
36. Mitchell J., Edwards J., Fordham E. J., Staniland J., Chassagne R., Cherukupalli P., Wilson O., Faber R., Bouwmeester R. Quantitative remaining oil interpretation using magnetic resonance: from the laboratory to the pilot // *SPE EOR Conference at Oil and Gas West Asia (Muscat, Oman, 16–18 Apr. 2012)*. – Paper SPE–154704–MS. – DOI: 10.2118/154704–MS

37. Kleinberg R. L. Well logging overview // Concepts in Magnetic Resonance. – 2001. – Vol. 13, No. 6. – P. 342–343. – DOI: 10.1002/cmr.1019
38. Kleinberg R. L., Jackson J. A. An introduction to the history of NMR well logging // Concepts in Magnetic Resonance. – 2001. – Vol. 13, No. 6. – P. 340–342. – DOI: 10.1002/cmr.1018.
39. Heaton N. J., Minh C. C., Freedman R., Flaum C. High resolution bound–fluid, free fluid and total porosity with fast NMR logging // SPWLA 41st Annual Logging Symposium (Dallas, Texas, USA, June 2000). – Paper SPWLA–2000–V
40. Brown J. A., Brown L. F., Jackson J. A., Milewski J. V., Travis B. J. NMR logging tool development: laboratory studies of tight gas sands and artificial porous material // SPE/DOE Unconventional Gas Recovery Symposium (Pittsburgh, Pennsylvania, USA, 16–18 May 1982). – Paper SPE/DOE–10813–MS
41. Archie G. E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics // Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers. – 1942. – Vol. 146. – P. 54–62
42. Straley C., Rossini D., Vinegar H. J., Tutunjian P. N., Morriss C. E. Core analysis by low field NMR // International Symposium of the Society of Core Analysts. – 1994. – Paper SCA–9404.
43. Straley C., Morriss C. E., Kenyon W. E., Howard J. J. NMR in partially saturated rocks: laboratory insights on free fluid index and comparison with borehole logs // The Log Analyst. – 1995. – Vol. 36, No. 1. – P. 40–56
44. Silva R.C., Carneiro G.F., Barbosa L.L., Lacerda V. Jr., Freitas J.C.C., de Castro E.V.R. Studies on crude oil–water biphasic mixtures by low–field NMR // Magnetic Resonance in Chemistry. – 2012. – Vol. 50. – P. 85–88.
45. Freed D.E., Burcaw L., Song Y.Q. Scaling laws for diffusion coefficients in mixtures of alkanes // Physical Review Letters. – 2005. – Vol. 94. – Article No. 067602.
46. Freed D.E. Dependence on chain length of NMR relaxation times in mixtures of alkanes // Journal of Chemical Physics. – 2007. – Vol. 126. – Article No. 174502.
47. Freed D.E. Temperature and pressure dependence of the diffusion coefficients and NMR relaxation times of mixtures of alkanes // Journal of Physical Chemistry B. –

2009. – Vol. 113. – P. 4293–4302.

48. Van der Tuuk Opedal N., Kralova I., Lesaint C., Sjöblom J. Enhanced sedimentation and coalescence by chemicals on real crude oil systems // *Energy & Fuels*. – 2011. – Vol. 25. – P. 5718–5728.

49. Freed D.E., Hürlimann M.D. One- and two-dimensional spin correlation of complex fluids and the relation to fluid composition // *Comptes Rendus Physique*. – 2010. – Vol. 11. – P. 181–191.

50. Chen S., Zhang G., Hyung K., Edwards C.M., Ren J., Chen J. Laboratory investigation of NMR crude oils and mud filtrates properties in ambient and reservoir conditions // *Proceedings of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. – Houston, Texas, USA, 26–29 September 2004. – SPE Paper No. 90553.

51. Zielinski L., Saha I., Freed D.E., Hürlimann M.D. Probing asphaltene aggregation in native crude oils with low-field NMR // *Langmuir*. – 2010. – Vol. 26. – P. 5014–5021

52. LaTorraca G.A., Dunn K.J., Webber P.R., Carlson R.M. Low-field NMR determinations of the properties of heavy oils and water-in-oil emulsions // *Magnetic Resonance Imaging*. – 1998. – Vol. 16. – P. 659–662.

53. Honorato H.D.A., Silva R.C., Piumbini C.K., Zucolotto C.G., de Souza A.A., Cunha A.G., Emmerich F.G., Lacerda V. Jr., de Castro E.V.R., Bonagamba T.J., Freitas J.C.C. ¹H low- and high-field NMR study of the effects of plasma treatment on the oil and water fractions in crude heavy oil // *Fuel*. – 2012. – Vol. 92. – P. 62–68.

54. Van der Tuuk Opedal N., Sørland G.H., Sjöblom J. Emulsion stability studied by nuclear magnetic resonance (NMR) // *Energy & Fuels*. – 2010. – Vol. 24. – P. 3628–3633.

55. Wen Y.W., Kantzas A. Monitoring bitumen-solvent interactions with low-field nuclear magnetic resonance and X-ray computer-assisted tomography // *Energy & Fuels*. – 2005. – Vol. 19. – P. 1319–1326.

56. Yang Z., Hirasaki G.J. NMR measurement of bitumen at different temperatures // *Journal of Magnetic Resonance*. – 2008. – Vol. 192. – P. 280–293.

57. Parks T.J., Cross L.F., Lynch L.J. An NMR method for quantitative

determination of the carbonaceous mesophase content of a petroleum pitch // *Carbon*. – 1991. – Vol. 29. – P. 921–927.

58. dos Santos Lima A.L., Pinto A.C., San Gil R.A.S., Tavares M.I.B. Mesophase formation investigation in pitches by NMR relaxometry // *Journal of the Brazilian Chemical Society*. – 2007. – Vol. 18. – P. 255–258.

59. dos Santos Lima A.L., dos Santos C. Lima K., França T.C.C., Tavares M.I.B., da Silva San-Gil R.A., Eberlin M.N., Pinto A.C. Mesophase evolution in heat-treated solid petroleum pitches // *Journal of the Brazilian Chemical Society*. – 2012. – Vol. 23. – P. 1355–1371.

60. Nordon A., Meunier C., McGill C.A., Littlejohn D. Comparison of calibration methods for the monitoring of a fluorobenzene batch reaction using low-field ^{19}F NMR, ^1H NMR, NIR, and Raman spectrometries // *Applied Spectroscopy*. – 2002. – Vol. 56. – P. 515–520.

61. Nordon A., Diez-Lazaro A., Wong C.W.L., McGill C.A., Littlejohn D., Weerasinghe M., Mamman D.A., Hitchman M.L., Wilkie J. Consideration of some sampling problems in the on-line analysis of batch processes by low-field NMR spectrometry // *Analyst*. – 2008. – Vol. 133. – P. 339–347.

62. Vargas M.A., Cudaj M., Hailu K., Sachsenheimer K., Guthausen A. Online low-field ^1H NMR spectroscopy: monitoring of emulsion polymerization of butyl acrylate // *Macromolecules*. – 2010. – Vol. 43. – P. 5561–5568.

63. Патент РФ № 2808801. Магнит / Кашаев Р.С., Нгуен Дык Ань; патентообладатель: ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет». – Заявка № 2023105051; приоритет от 06.03.2023; опубл. 05.12.2023, Бюл. № 34.

64. Кашаев Р.С., Свинин А.Ю., Козелков О.В. Минимизация ошибок эксперимента в методе ПМР и возможности получения спектра времен релаксации // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. – 2018. – № 11–12. – Т. 20. – С. 152–160.

65. Нгуен Дык Ань, Кашаев Р.С., Козелков О.В. Разработка многослойных усовершенствованных магнитных сборок Халбаха для ПМР-релаксометра на

основе оптимизации параметров магнита // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2025. – Т. 27, № 2. – С. 20–32. – DOI: 10.30724/1998–9903–2025–27–2–20–32.

66. Halbach K. Design of permanent multipole magnets with oriented rare earth cobalt material // Nuclear Instruments and Methods. – 1980. – Vol. 169, No. 1. – P. 1–10.

67. Anferova S., Anferov V., Arnold J., Talnishnikh E., Voda M.A., Kupferschläger K., Blümli P., Clauser C., Blümich B. Improved Halbach sensor for NMR scanning of drill cores // Magnetic Resonance Imaging. – 2007. – Vol. 25. – P. 474–480.

68. Hung Dang Phuc. Development of portable low-field NMR magnet: Design and construction: dissertation (PhD). – Lyon: INSA de Lyon, 2015. – English. – No. NNT: 2015ISAL0007.

69. Roth H., Blümli P. Design and construction of a dipolar Halbach array with a homogeneous field from identical bar magnets // Concepts in Magnetic Resonance Part B: Magnetic Resonance Engineering. – 2012. – Vol. 41B. – P. 1–10.

70. Blümich B., Rehorn C., Zia A. Magnets for small-scale and portable NMR: technologies and systems // Micro- and Nanoscale NMR. – Berlin; Heidelberg: Springer, 2018. – P. 1–32.

71. Свинин А.Ю., Кашаев Р.С., Козелков О.В. Разработка магнитной системы датчика для ПМР-анализатора // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2020. – Т. 22, № 4. – С. 115–122.

72. Кашаев Р.С., Темников А.Н., Чан Ван Тунг, Нгуен Тъи Киен, Козелков О.В. Релаксометр протонного магнитного резонанса // Приборы и техника эксперимента. – 2019. – № 2. – С. 145–148.

73. Trahms L., Burghoff M. NMR at very low fields // Magnetic Resonance Imaging. – 2010. – Vol. 28. – P. 1244–1250. – DOI: 10.1016/j.mri.2010.07.003.

74. DDS Devices Generate High-Quality Waveforms Simply. – Norwood, MA: Analog Devices, Inc., 2012

75. Патент РФ № 67719. Портативный релаксометр ядерного магнитного

резонанса / Идиятуллин З.Ш., Кашаев Р.С., Темников А.Н.; патентообладатель: Кашаев Р.С. Заявка № 2007126361/22; заявл. 25.06.2007; опубл. 27.10.2007.

76. Кашаев Р.С., Темников А.Н., Чан Ван Тунг, Нгуен Тъи Киен, Козелков О.В. Релаксометр протонного магнитного резонанса // Приборы и техника эксперимента. – 2019. – № 2. – С. 145–148.

77. Kashaev R.S., Nguyen T. Kien, Tran Van Tung, Kozelkov O.V. Correlation of physicochemical properties of Bach Ho oils with proton NMR relaxation parameters and their temperature dependence // Petroleum Chemistry. – 2019. – Vol. 59, Suppl. 1. – P. S21–S29. – DOI: 10.1134/S0965544119130073.

78. Чан Ван Тунг, Кашаев Р.С. Радиочастотный генератор и программатор импульсных последовательностей для релаксометра ПМР // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2020. – Т. 22, № 3. – С. 90–96.

79. Albulet M. RF Power Amplifiers. – Atlanta, GA: Noble Publishing Corporation, 2001.

80. Kazimierzuk M.K. RF Power Amplifiers. – West Sussex: John Wiley & Sons, 2008.

81. Koizumi H., Suetsugu T. Class DE high-efficiency tuned power amplifier // IEEE Transactions on Circuits and Systems I. – 1996. – Vol. 43, No. 1. – P. 51–60.

82. Zhang X., Schemm N. A novel power amplification scheme for nuclear magnetic resonance / nuclear quadrupole resonance systems // Review of Scientific Instruments. – 2011. – Vol. 82. – Article No. 034707.

83. Hopper T., Song Y.Q. Low-frequency NMR with a non-resonant circuit // Journal of Magnetic Resonance. – 2011. – Vol. 210. – P. 69–74.

84. Eidmann G., Savelsberg R., Blümler P., Blümich B. The NMR MOUSE: a mobile universal surface explorer // Journal of Magnetic Resonance, Series A. – 1996. – Vol. 122. – P. 104–109.

85. Кашаев Р.С., Нгуен Д.А., Арсланов А.Д. Исследование причин и методы устранения искажений сигнала в передатчике ПМР–релаксометра // Конференция «Цифровые системы и модели: теория и практика проектирования, разработки и применения». – Казань, 2024. – С. 225–228.

86. OPA2134. High-Performance SoundPlus™ Audio Operational Amplifiers: Data Sheet. – Dallas, TX: Texas Instruments, 2014.
87. OPAx132. High-Speed FET-Input Operational Amplifiers: Data Sheet. – Dallas, TX: Texas Instruments, 2015.
88. AD603. Low Noise, 90 MHz Variable Gain Amplifier: Data Sheet. – Norwood, MA: Analog Devices, 2011.
89. Lowe I., Tarr C. A fast recovery probe and receiver for pulsed nuclear magnetic resonance spectroscopy // *Journal of Physics E: Scientific Instruments*. – 1968. – Vol. 1. – P. 320–322.
90. Hoult D.I. Receiver design for MR // In: *EMagRes* / ed. by R.K. Harris, R.L. Wasylishen. – Chichester: John Wiley & Sons, 1996. – P. 1–21.
91. Нгуен Д.А., Кашаев Р.С., Арсланов А.Д. Устройство стабилизации и контроля температуры образцов для ПМР-анализаторов // XXVIII Всероссийский аспирантско-магистерский научный семинар. – Казань, 2024. – Т. 3. – С. 747–751.
92. Кашаев Р.С., Нгуен Дык Ань, Козелков О.В. Проточный экспресс-анализатор протонного магнитного резонанса в составе промышленного интернета вещей // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. – 2024. Т. 67, № 5. С. 425–434. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-5-425-434.
93. Патент РФ № 137355 U1. Устройство термостатирования магнита с образцом / Кашаев Р.С. Заявка № 2013143433/28 от 25.09.2013; опубл. 10.02.2014.
94. Абдрахманова Г. И., Быховский К. Б., Веселитская Н. Н. *и др.* Цифровая трансформация отраслей: стартовые условия и приоритеты : доклад к XXII Апрельской международной научной конференции по проблемам развития экономики и общества (Москва, 13–30 апреля 2021 г.). – М. : Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 2021. – 239 с. – ISBN 978-5-7598-2510-4.
95. Rosendahl T., Hepsø V. *Integrated Operations in the Oil and Gas Industry: Sustainability and Capability Development*. – Hershey, PA: Business Science Reference (Imprint of IGI Global), 2013. – 427 p. – ISBN 978-1-4666-2002-5.
96. Патент РФ № 150614. Автоматический пробоотборник / Немиров М.С.,

Силантьев С.И., Савинов Е.В., Нурмухаметов Р.Р. – Оpubл. 27.07.2010, Бюл. № 21.

97. Analytical Methods Committee, AMCTB No 56. [What causes most errors in chemical analysis? *Analytical Methods*. 2013,5,2914–1915. DOI:1.1039/C3AY90035E, [pubs.rsc.org/en/Content/ Article Landing/ 2013](https://pubs.rsc.org/en/Content/ArticleLanding/2013).

98. Kashaev R, Nguyen Duc Anh, Kozelkova V, Kozelkov O. and 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): 1080. Doi: <https://10.3390/en16031080>

99. Кашаев Р.С., Нгуен Дык Ань, Козелков О.В.. Проточный экспресс-анализатор проточного магнитного резонанса в составе промышленного интернета вещей. *Изв. вузов. Приборостроение*. 2024. Т. 67, № 5. С. 425–434. DOI 10.17586/0021–3454–2024–67–5–425–434 (K1)

100. Нгуен Д.А., Кашаев Р.С., Козелков О.В., Арсланов А.Д., Чан В.Т.. Разработка усовершенствованного программно-аппаратного комплекса управления патрубком анализатора протонного магнитного резонанса ПМРА-IV // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2025; 27(1):3–15. <https://doi.org/10.30724/1998–9903–2025–27–1–3–15> (K2)

101. Арсланов А.Д., Нгуен Дык Ань, Кашаев Р.С., Козелков О.В., Чан Ван Тунг. Анализатор нефти ПМРА-IV для автоматизированного контроля характеристик исследуемых образцов. *Автоматизация в промышленности*, №1 2025 с. 18–20.

102. Hogendoorn R., Korb J.–P., Krohne M. Magnetic resonance multiphase flow metering: principles and field applications // *Flow Measurement and Instrumentation*. – 2014. – Vol. 37. – P. 1–10.

103. Al-Qasim A. Multiphase flow measurement using nuclear magnetic resonance: PhD thesis. – Perth: The University of Western Australia, 2019. – 182 p.

104. Falcone G., Hewitt G.F., Alimonti C. Multiphase flow metering: current trends and future developments // *Journal of Petroleum Technology*. – 2004. – Vol. 56, No. 2. – P. 77–84.

105. Кашаев Р.С., Нгуен Дык Ань, Козелков О.В. Мехатронный проточный

анализатор жидкости на базе метода протонного магнитного резонанса // Мехатроника, автоматика и робототехника. – 2023. – № 11. – С. 176–179. DOI: 10.26160/2541–8637–2023–11–176–179.

106. Нгуен Д.А., Козелкова В.О., Кашаев Р.С. Применение метода протонной магнитной резонансной релаксометрии при контроле качества сырья // Высшая школа: научные исследования: материалы Межвузовского международного конгресса. – Москва, 13 октября 2023 г. – Москва: Инфинити, 2023. – С. 155–159. – DOI: 10.34660/INF.2023.79.96.391.

107. Кашаев Р.С., Нгуен Дык Ань, Козелков О.В. Проточный мехатронный измерительный комплекс для определения характеристик нефти // Международная научно–техническая конференция «Технологический суверенитет и цифровая трансформация в энергетике (ТЭФ–2023)». – Казань: Казань–Экспо, 6 апр. 2023 г.

108. Нгуен Дык Ань. Apparatus–program complex for on–line express–control of crude oils properties by proton magnetic resonance method // Materials of the International University Scientific Forum “Practice Oriented Science: UAE – Russia – India”. – January 27, 2023. – DOI: 10.34660/inf.2023.28.21.081.

109. Kashaev R.S., Nguyen T. Kien, Tran Van Tung, Kozelkov O.V. Correlation of physicochemical properties of Bach Ho oils with proton NMR relaxation parameters and their temperature dependence // Petroleum Chemistry. – 2019. – Vol. 59, Suppl. 1. – P. S21–S29. – DOI: 10.1134/S0965544119130073.

110. Нгуен Дык Ань, Кашаев Р.С., Арсланов А.Д. Экспресс–контроль содержания асфальтенов и парафинов в сырой нефти с месторождения Вьетнама с помощью метода ПМР // Международная научно–практическая конференция «Технологический суверенитет и цифровая трансформация в энергетике (ТЭФ–2024)». – Казань: МВЦ «Казань–Экспо», 04 апреля 2024 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2024. – С. 161–166.

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

– DOI: 10.30724/1998–9903–2025–27–1–3–15.

112. Патент РФ № 2813962. Способ и устройство для определения скоростей потока (расхода) и концентрации воды в водо–нефтяных смесях / Кашаев Р.С., Нгуен Дык Ань, Козелков О.В.; патентообладатель: ФГБОУ ВО «КГЭУ». Заявка № 2023105685; приоритет 13.03.2023; опубл. 05.12.2023, Бюл. №34; гос. регистрация 20.02.2024.

113. Кузьмин В.И., Гаврилов А.Н. Ядерно–магнитный резонанс в задачах контроля многофазных потоков // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2016. – № 4. – С. 15–22.

114. Нгуен Дык Ань, Кашаев Р.С.. Разработка устройства для подключения ПМР–релаксометра к интернету вещей в рамках интеллектуального нефтегазового месторождения // X Национальная научно–практическая конференция «Приборостроение и автоматизированный электропривод в ТЭК и ЖКХ». – 12–13 декабря 2024 г.– Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2025. – с.87–90 – ISBN 978–5–89873–687–3.

115. Hoàng Đình Tiến, Nguyễn Thúy Quỳnh. Đặc điểm địa hóa các bồn trầm tích thềm lục địa Việt Nam // Tạp chí Dầu khí. – 2003. – Số 7. – Tr. 8–17.

116. Từ Thành Nghĩa, Nguyễn Thúc Kháng, Nguyễn Hoài Vũ. Những khó khăn thách thức của Vietsovpetro trong vận chuyển dầu nhiều paraffin bằng đường ống ngầm ngoài khơi // Tạp chí Dầu khí. – 2015. – Số 5. – Tr. 20–25.

117. Dunn K.J., Bergman D.J., Latorraca G.A. Nuclear magnetic resonance: petrophysical and logging applications. – Oxford: Pergamon Press, 2002. – 321 p.

118. Freedman R., Heaton N. Fluid characterization using nuclear magnetic resonance logging // SPE Reservoir Evaluation & Engineering. – 2004. – Vol. 7, No. 4. – P. 1–11.

119. Кашаев Р.С. Экспресс–анализ концентрации парафина и температуры застывания топлива методом ЯМР // Современные наукоемкие технологии. – 2015. – № 8. – С. 31–35.

120. Кашаев Р.С., Козелков О.В., Идиятуллин З.Ш. Приборы и методы контроля концентрации парафина в нефти // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2017. – Т. 19, № 3–4. – С. 159–167.

121. Новицкий П.В., Зограф И.А., Лабунец В.С. Динамика погрешностей средств измерений. –Л.: Энергоатомиздат, 1990. – С.192.

122. Сафиуллин Б.Р., Козелкова В.О., Кашаев Р.С., Козелков О.В.. Очистка нефти от асфальтено–смола и парафинов//Известия вузов.Проблемы энергетики, т.24 №5, 2022. С.166–178.

123. Tran Van Tung, Kashaev Rustem Sultankhamitovich, Nguyen Duc Anh. Research on the application of IoT solution for rapid control of oil parameters in smart oil fields based on proton magnetic resonance method. 2025 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russian Federation, 2025, pp. 518–523. doi: 10.1109/ICIEAM65163.2025.11028468

124. Кашаев Р. С., Козелкова В. О., Нгуен Дык Ань; Козелков О. В. Применение портативного проточного анализатора ПМР для экспресс–контроля свойств нефтепродуктов и загрязнений воды. Химическая технология №4 за 2025, с.152. DOI: 10.31044/1684–5811–2025–26–4–152–160.

125. Kashaev R.S. Appl. Magnet. Resonance, №49, 309 (2018). <https://doi.org/10.1007/s00723–018–0977–2>

126. Kashaev R.S., Masiab A.N., Chemical and Materials Engineering. Horizon Research Publishing Corporation. N.Y, USA.1(3),78(2013).DOI:10.13189/cme.2013.010303.

127. Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц Квантовая механика. «Наука» 1963

128. Wanasinghe T.R., Gosine R.G., James L.A., Mann G.K.I., de Silva O., Warriar P.J. The Internet of Things in the oil and gas industry: a systematic review // IEEE Internet of Things Journal. – 2020. – Vol. 7. – P. 8654–8673.

129. Ray P.P., Dash D., Salah K., Kumar N. Blockchain for IoT–based healthcare: background, consensus, platforms, and use cases // IEEE Systems Journal. – 2020. – Vol. 15. – P. 85–94.

130. Zuo Y., Qi Z. A blockchain–based IoT framework for oil field remote monitoring and control // IEEE Access. – 2021. – Vol. 10. – P. 2497–2514.

131. Ramzey H., Badawy M., Elhosseini M., Elbaset A. I2OT–EC: a framework for smart real–time monitoring and controlling crude oil production exploiting IIoT and edge computing // Energies. – 2023. – Vol. 16. – Article 2023. – DOI:

10.3390/en16042023

132. IoT Agenda. What is IIoT (Industrial Internet of Things)? – TechTarget, 2022. –Available at: <https://www.techtarget.com/iotagenda/definition/Industrial-Internet-of-Things-IIoT> (accessed 01.03.2022).

133. Edge computing vs. cloud computing: key differences. – Simplilearn, 2022. Available at: <https://www.simplilearn.com/edge-computing-vs-cloud-computing-article>

134. G. A. Ovseenko, R. S. Kashaev, O. V. Kozelkov, T. K. Filimonova, T. S. Evdokimova and A. M. Mardanova. Improving the information veracity of the complex of multiparametric control of the relaxometer based on a neural network // Proceedings of the 5th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE 2023). Moscow, Russian Federation – 2023. pp. 1–5. doi: 10.1109/REEPE57272.2023.10086740.

135. Нгуен Дык Ань. Решение для интеллектуального мониторинга и управления анализатора протонного магнитного резонанса ПМРА–IV на основе интернета вещей. Нгуен Д.А, Чан В.Т. VII Международная научно–практическая конференция: Механика и машиностроение. Наука и практика – Санкт–Петербург: НИЦ МС, 2024. – №7. С.49–53

136. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № RU2025667277 Российская Федерация. Система дистанционного мониторинга и контроля параметров образцов на основе ПМР–релаксометра и IIoT: №2025666347: заявл. 10.06.2025: опубл. 03.07.2025/ Нгуен Дык Ань, Кашаев Рустем Султанхамитович, Динь Тьен Нам , Чан Ван Тунг.

137. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № RU2024682954 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. 19.09.2024: опубл. 01.10.2024/ Арсланов А.Д., Кашаев Р.С., Козелков О.В., Нгуен Дык Ань, Галиев А.Б.

ПРИЛОЖЕНИЯ А
Патенты и свидетельства

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2808801

Магнит

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Казанский государственный энергетический университет" (RU)*

Авторы: *Кашаев Рустем Султанхамитович (RU), Нгуен Дык Ань (RU)*

Заявка № 2023105051

Приоритет изобретения **06 марта 2023 г.**

Дата государственной регистрации

в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации **05 декабря 2023 г.**

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает **06 марта 2043 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 42066a00e38e3154ba196183b73b4aa7
Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.02.2023 по 02.05.2024

Ю.С. Зубов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2813962

Способ и устройство для определения скоростей потока (расхода) и концентрации воды в водо-нефтяных смесях

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Казанский государственный энергетический университет" (RU)*

Авторы: *Кашаев Рустем Султанхамитович (RU), Нгуен Дык Ань (RU), Козелков Олег Владимирович (RU)*

Заявка № 2023105685

Приоритет изобретения **13 марта 2023 г.**

Дата государственной регистрации в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **20 февраля 2024 г.**

Срок действия исключительного права на изобретение истекает **13 марта 2043 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

документ подписан электронной подписью
Сертификат 4296610438E3954b196183b73b4aa7
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.05.2023 по 02.08.2024

Ю.С. Зубов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ
№ 2860172

Стабилизатор температуры для магнита и образцов с терморегулятором

Патентообладатель: **ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ "КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ" (RU)**

Авторы: **Кашаев Рустем Султанхамитович (RU), Нгуен Дык Ань (RU), Козелков Олег Владимирович (RU)**

Заявка № 2025107576

Приоритет изобретения **28 марта 2025 г.**

Дата государственной регистрации в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **14 апреля 2026 г.**

Срок действия исключительного права на изобретение истекает **28 марта 2045 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

документ подписан электронной подписью
Сертификат 00a570e1f74a10a531b4b8818e75f29506
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 04.07.2025 по 26.11.2036

Ю.С. Зубов



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 42966a093653354b196f83b73b4aa7
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 18.02.2023 по 02.08.2024

Ю.С. Зубов

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: 0092e769a300e8547260670f0ea2026
Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 01.12.2024 по 03.12.2025

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЯ Б

Акты внедрения

ООО «ТХАНЬ ТАМ» – НЕФТЕПРОДУКТЫ И СЖИЖЕННЫЙ ГАЗ

Адрес: улица 63В, район Донг А, провинция Ниньбинь, Вьетнам.

Тел.: 03503815650

Fax: 03503815650

УТВЕРЖДАЮ

Директор

ООО «ТХАНЬ ТАМ»

Чан Ван Тхань

_____ 2026 г.



АКТ

о внедрении результатов научных исследований по теме диссертационной работы «Разработка блоков проточного анализатора и методик экспресс-контроля характеристик нефти и газоконденсата методом ПМР» автора Нгуен Дык Ань

Комиссия в составе: Председатель: директора ООО «ТХАНЬ ТАМ» - Чан Ван Тхань, член комиссии: заместитель директора ООО «ТХАНЬ ТАМ» - Чан Ван Там. Рассмотрела результаты научно-исследовательской работы автора Нгуен Дык Ань по теме «Разработка блоков проточного анализатора и методик экспресс-контроля характеристик нефти и газоконденсата методом ПМР» под руководством заслуженного работника высшего образования России, доктора технических наук, заслуженного профессора Кашаева Р.С. на кафедре «Приборостроение и мехатроника» ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» и подтверждает, что полученные научные результаты внедрены и используются в производственно-технологической деятельности ООО «ТХАНЬ ТАМ», а именно:

1. Разработаны и внедрены блоки и схемотехники для анализатора потоков жидкости на основе метода измерения ПМР–релаксации, включая: протонный релаксиметр 3–го поколения ПМР–NP3; систему отбора проб жидкости с патрубком и контроллером патрубки; алгоритмы и программное обеспечение, обеспечивающие оперативный контроль параметров потоков нефти и топлива.

2. Осуществлена интеграция анализатора потоков жидкости, основанного на методе измерения протонной ПМР-релаксации, в промышленную сеть промышленного Интернета вещей (ПИВ).

3. Реализовано интеллектуальное устройство для подключения релаксиметра ПМР к сети Интернет и к интеллектуальной системе на базе технологий интернет вещей (ИВ), обеспечивающее: онлайн-мониторинг и контроль параметров нефти и топлива; дистанционное управление режимами работы релаксиметра ПМР.

Полученные результаты используются в практической деятельности предприятия и обладают прикладной ценностью, подтверждая их научную и производственную значимость.

Председатель комиссии:

_____ / Чан Ван Тхань

Член комиссии:

_____ / Чан Ван Там

ООО Торгово-технологическая компания «ANAN»

Адрес: № 5/112, ул. Чан Нят Зуат, г. Намдинь, провинция Ниньбинь, Вьетнам

Тел.: +84 904 615 005/+84 889 666 020

E-mail: nhathongminh.anan@gmail.com



УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

ООО «ANAN»

Ле Минь Дык

08/09 2026 г.

АКТ

о внедрении результатов научных исследований по теме диссертационной работы «Разработка блоков проточного анализатора и методик экспресс-контроля характеристик нефти и газоконденсата методом ПМР»

автора Нгуен Дык Ань

Комиссия в составе: Председатель – заместитель генерального директора ООО «ANAN» Фам Тхи Тьюй, член комиссии – главный инженер Буй Тхань Тхьонг, рассмотрела результаты научно-исследовательской работы автора Нгуен Дык Ань по теме «Разработка блоков проточного анализатора и методик экспресс-контроля характеристик нефти и газоконденсата методом ПМР» под руководством заслуженного работника высшего образования России, доктора технических наук, заслуженного профессора Кашаева Р.С. на кафедре «Приборостроение и мехатроника» ФГБОУ ВО «КГЭУ» и подтверждает, что полученные научные результаты внедрены и используются в производственно-технологической деятельности ООО «Торгово-технологическая компания ANAN», а именно:

1. Разработаны и внедрены блоки и схемотехники для анализатора потоков жидкости на основе метода измерения ЯМР–релаксации, включая: протонный релаксиметр 3–го поколения ПМР–NP3; систему отбора проб жидкости с патрубком и контроллером патрубки; алгоритмы и программное обеспечение, обеспечивающие оперативный контроль параметров потоков нефти и топлива.
2. Реализовано интеллектуальное устройство для подключения релаксиметра ПМР к сети Интернет и к интеллектуальной системе на базе технологий интернет вещей (ИВ), обеспечивающее: онлайн-мониторинг и контроль параметров нефти и топлива; дистанционное управление режимами работы релаксиметра ПМР.
3. Осуществлена интеграция анализатора потоков жидкости, основанного на методе измерения протонной ЯМР-релаксации, в промышленную сеть промышленного Интернета вещей (ПИВ).

Полученные результаты используются в практической деятельности предприятия и обладают прикладной ценностью, подтверждая их научную и производственную значимость.

Председатель комиссии:

Choi / Фам Тхи Тьюй

Член комиссии:

Thuong / Буй Тхань Тхьонг

ПРИЛОЖЕНИЯ В
Дипломы и сертификаты



КАЗАНСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

VRM.GROUP
VRMASTER

VIII Национальная научно-практическая конференция
«Приборостроение и автоматизированный электропривод
в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве»

ДИПЛОМ

II степени

НАГРАЖДАЕТСЯ

Нгуен Дык Ань

Проректор
по развитию и инновациям



Ахметова И.Г.

8-9 декабря 2022 г. Казань

КГЭУ



IX Национальная научно-практическая конференция
«Приборостроение и автоматизированный электропривод
в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве»,
посвященная 55-летию КГЭУ

ДИПЛОМ

II степени

НАГРАЖДАЕТСЯ

Нгуен Дык Ань

Проректор
по развитию и инновациям



Ахметова И.Г.

7-8 декабря 2023 г., Казань





ГУМАНИТАРНЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
« НА П Р А З В И Т И Е »



ДИПЛОМ

НАГРАЖДАЕТСЯ

Нгуен Дык Ань

АВТОР СТАТЬИ:

Методы прямого цифрового синтеза и генераторы
высокочастотных сигналов для портативных приборов ЯМР

ЗА АКТИВНОЕ УЧАСТИЕ В РАБОТЕ

Международной научной конференции
«Теоретические и практические аспекты развития науки в
современном мире»

СОСТОЯВШЕЙСЯ

17 March 2023 года
в г. Санкт-Петербург

ДИРЕКТОР ГНИИ «НАПРАЗВИТИЕ»
ВИКТОРЕНКОВА СВЕТЛАНА ВЛАДИМИРОВНА



ВЫСШАЯ ШКОЛА:
НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
Межвузовский международный конгресс

ДИПЛОМ

настоящим удостоверяется, что

Нгуен Дык Ань

является участником Межвузовского международного конгресса

«Высшая школа: научные исследования»

дата проведения: 13 октября 2023 г.

Тема доклада:

*Применение метода протонной магнитной резонансной
релаксометрии при контроле качества сырья*

Материалы включены в сборник работ научного конгресса

Главный редактор

Д. Р. Хисматуллин



Москва, 2023



КАЗАНСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

X Национальная научно-практическая конференция
«Приборостроение и автоматизированный электропривод
в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве»

ДИПЛОМ

I степени

НАГРАЖДАЕТСЯ

Нгуен Дык Ань

Проректор
по развитию и инновациям



Ахметова И.Г.

12-13 декабря 2024 г., Казань



КГЭУ



**Сетевая
Компания**

**XXVIII Всероссийский аспирантско-магистерский
научный семинар, посвященный Дню энергетика**

ДИПЛОМ

I степени

Награждается

Нгун Дык Ань

Проректор по РИИ



И.Г. Ахметова



КГЭУ

**Международная молодежная научная конференция
Тинчуринские чтения – 2025
«Энергетика и цифровая трансформация»**

ДИПЛОМ

III степени

Награждается

Нгуен Дык Ань

Секция: Электропривод и автоматика. Приборостроение и мехатроника

Проректор по РИИ



И.Г. Ахметова

Казань
23-25 апреля 2025 г.



ДИПЛОМ

награждается

Нгуен Дык Ань

Казанский Государственный Энергетический Университет

за **1** место

в VIII Международном интеллектуальном конкурсе студентов, магистрантов, аспирантов, докторантов

“UNIVERSITY STARS 2022”

Россия, Москва, 25 декабря 2022 г.

Образовательная ступень: Аспирантура
Форма: Исследовательская работа

Направление: Технические науки

Название конкурсного проекта: Разработка усовершенствованных магнитов и приборов измерений магнитного поля для протонного магнитного резонанса

Научный руководитель: Кашаев Рустем Султанхамитович

Директор по научным проектам



Григорьев А.Н.

НОВАЯ НАУКА **NEW SCIENCE**
Международный центр
научного партнерства International Center
for Scientific Partnership

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ИНИЦИАТИВА - 2023

ДИПЛОМ

I степени

номинация «Технические науки»

в Международном научно-исследовательском конкурсе

НАГРАЖДАЕТСЯ

Нгуен Дык Ань

магистр, аспирант

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»

автор исследовательской работы
«РАЗРАБОТКА УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫХ
МАГНИТОВ НА СБОРКЕ ХАЛЬБАХА И ПРИБОРОВ
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ»

25 октября 2023 г.
Российская Федерация
г. Петрозаводск



Директор
МЦНП «НОВАЯ НАУКА»
И.И. Ивановская



ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ПРОЕКТ ГОДА 2023

ДИПЛОМ

I степени
номинация «Технические науки»
во II Международном научно-исследовательском конкурсе
НАГРАЖДАЕТСЯ

Нгуен Дык Ань

магистр, аспирант

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»

автор исследовательской работы

«РАЗРАБОТКА БЛОКОВ ПОРТАТИВНОГО РЕЛАКСОМЕТРА ПРОТОННОГО МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА»

Научный руководитель: Кашаев Рустем Султанхамитович, д.т.н., профессор
ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»

13 ноября 2023 г.
Российская Федерация
г. Петрозаводск



Директор
МЦНП «НОВАЯ НАУКА»
И.И. Ивановская



ГУМАНИТАРНЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
«НАЦРАЗВИТИЕ»

СЕРТИФИКАТ участника конференции

Международная научная конференция
«Теоретические и практические аспекты развития
науки в современном мире»

Дата проведения: 17 марта 2023 года

Регистрационный номер: 0317-0317/379-1

Дата выдачи: 17.03.2023

DOI сборника: 10.37539/230317.2023.95.37.001
ISBN - 978-5-00213-090-0

Санкт-Петербург

Настоящий сертификат свидетельствует о том, что

Нгуен Дык Ань

принял(-а) участие в международной научной конференции
«Теоретические и практические аспекты развития науки в
современном мире» с докладом на тему

*Методы прямого цифрового синтеза и генераторы
высокочастотных сигналов для портативных приборов
ЯМР*

По результатам участия опубликована статья со следующими
выходными данными:

Нгуен Д.А., Кашаев Р.С. Методы прямого цифрового синтеза и
генераторы высокочастотных сигналов для портативных приборов ЯМР
// Теоретические и практические аспекты развития науки в современном
мире: сборник статей международной научной конференции (Санкт-
Петербург, Март 2023). – СПб.: ГНИИ «Нацразвитие», 2023.

Директор ГНИИ «Нацразвитие»
С.В. Викторенкова





СЕРТИФИКАТ УЧАСТНИКА

настоящий сертификат подтверждает, что

Нгуен Дык Ань

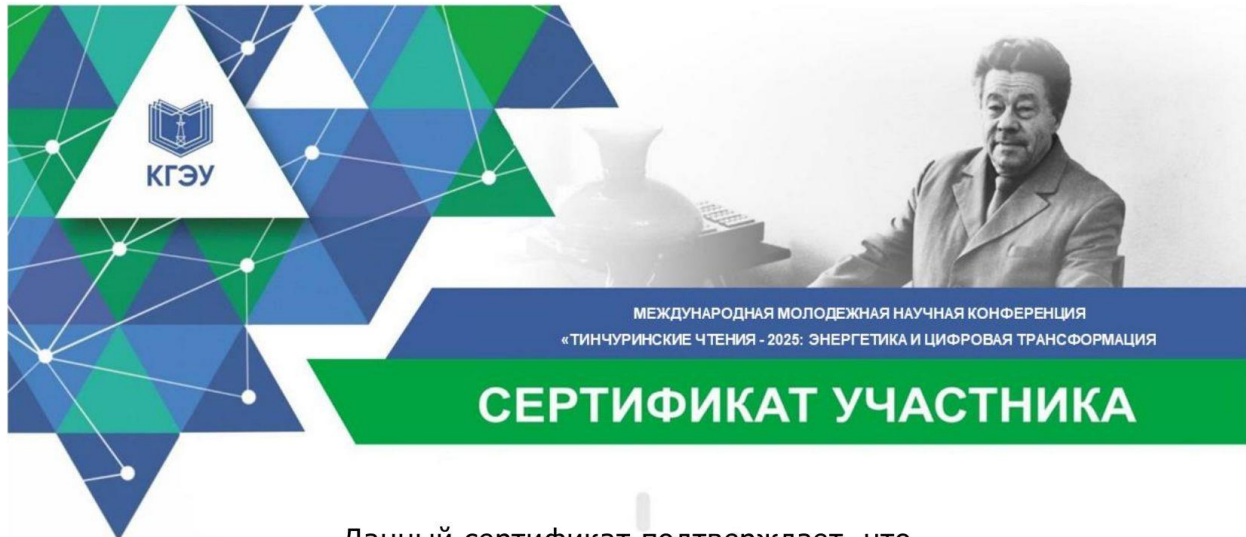
принял(а) участие в IX Национальной научно-практической конференции
«ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД В ТОПЛИВНО-
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ И ЖИЛИЩНО-КОММУНАЛЬНОМ ХОЗЯЙСТВЕ»
посвященной 55-летию КГЭУ

Проректор по развитию и инновациям
ФГБОУ ВО «КГЭУ»



И.Г. Ахметова

7-8 декабря 2023 г., Казань



Данный сертификат подтверждает, что
Нгуен Дык Ань, Кашаев Р.С.

принял(-а, -и) очное участие в работе секции

Ахметова И.Г.
Проректор по РиИ



Научно-исследовательский центр «МашиноСтроение»

СЕРТИФИКАТ

участника

VII Международной
научно-практической конференции
«Механика и машиностроение.
Наука и практика»

настоящим подтверждается, что

Нгуен Дык Ань

Принял участие в работе конференции с докладом

*«Решение для интеллектуального
мониторинга и управления анализатора
протонного магнитного резонанса ПМРА-IV
на основе интернета вещей»*

Председатель оргкомитета



Жуков И.А.

27 ноября 2024г.

Санкт-Петербург

СЕРТИФИКАТ

настоящим удостоверяется, что

Нгуен Дык Ань

магистр, аспирант
ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»

принял(а) участие
в Международном научно-исследовательском конкурсе

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ИНИЦИАТИВА - 2023

25 октября 2023 г.
Российская Федерация
г. Петрозаводск



Директор
МЦНП «НОВАЯ НАУКА»
И.И. Ивановская





КАЗАНСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

СЕРТИФИКАТ УЧАСТНИКА

настоящий сертификат подтверждает, что

Нгуен Дык Ань

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

Scientific Research Centre "MachineStructure"

CERTIFICATE

this to certify that scientific paper

*"Development of a thermal stabilizer for a magnet and samples with a thermoregulator of
a nuclear magnetic resonance relaxometer"*

author(s)

Nguyen Duc Anh, Nguyen Viet Tiep, Ngo Kien Dinh

doi.org/10.26160/2474-5901-2025-47-77-81

published in the

Journal of Advanced Research in Technical Science, Issue 47, ISSN 2474-5901

in publishing house

SRC MS, AmazonKDP, Seattle, USA

Director SRC MS



Ivan A. Zhukov

May 12, 2025

Date

kindle
direct
publishing



XXII Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых
«Перспективы развития фундаментальных наук»
Россия, Томск, 22–25 апреля 2025 г.
conf-prfn.org



СЕРТИФИКАТ №15057

удостоверяет, что

Нгуен Дык Ань

аспирант,

кафедра "Приборостроение и мехатроника",

Казанский государственный энергетический университет,

принял(а) участие с докладом

«Стабилизатор температуры для магнита и образцов с терморегулятором портативного ПМР-релаксометра»

Научный руководитель – д.т.н, профессор *Кашаев Рустем Султанхамитович*

Проректор по науке
и стратегическим проектам НИИ ТПУ

Председатель организационного
комитета секции 7,
профессор каф. физики ТУСУР

Председатель программного
комитета



А.С. Гоголев

А.С. Климов

И.А. Курзина

