

На правах рукописи

Парёхин

Парёхин Данил Александрович

Методы стабилизации параметров квантового дискриминатора стандарта частоты
на основе эффекта когерентного пленения населённостей

2.2.10 – Метрология и метрологическое обеспечение

Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата
технических наук

Менделеево – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений» (ФГУП «ВНИИФТРИ»)

Научный руководитель	Пальчиков Виталий Геннадьевич - доктор физико - математических наук, главный научный сотрудник ГМЦ ГСВЧ ФГУП «ВНИИФТРИ», г. Солнечногорск р.п. Менделеево
Официальные оппоненты	Сахаров Борис Александрович – доктор технических наук, первый заместитель генерального директора АО «Время-Ч», г. Нижний Новгород Величанский Владимир Леонидович - кандидат физико-математических наук, высококвалифицированный ведущий научный сотрудник Лаборатории стандартов частоты Троицкого обособленного подразделения ФГБУН Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН, г. Москва г. Троицк
Ведущая организация	Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений» (ФГБУ «ВНИИОФИ»), г. Москва.

Защита диссертации состоится « 20 » ноября 2024 г. на заседании диссертационного совета 32.1.004.01 в ФГУП «ВНИИФТРИ» по адресу: 141570, Московская область, г. Солнечногорск, р.п. Менделеево, промзона ФГУП "ВНИИФТРИ", тел. 8 (495) 526-63-63.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГУП «ВНИИФТРИ». www.vniiftri.ru:
<https://www.vniiftri.ru/upload/iblock/3d1/jl1ew5rmjh8nsey1h0f4vc2ez3kvb2u7.pdf>

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 141570 Московская область, г. Солнечногорск, р.п. Менделеево (промзона ВНИИФТРИ) Учёному секретарю.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2024 г.

Учёный секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук



М.В. Балаханов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Промышленно выпускаемые малогабаритные (менее 250 см³) квантовые стандарты частоты на основе атомов рубидия обладают высокими метрологическими характеристиками (малое отклонение действительного значения частоты (ДЗЧ) от номинального значения, типичные значения относительного отклонения частоты менее нескольких единиц 10^{-10} ; низкая нестабильность частоты, определяемая значением среднего квадратичного относительного двухвыборочного отклонения частоты (СКДО), типичные значения СКДО составляют несколько единиц $10^{-11}/\sqrt{\tau}$ на интервале времени измерения 1000 с), что позволяет применять их в таких областях науки и техники, как радионавигация, геодезия, метрология, радиоастрономия, связь. В зависимости от области применения квантовых стандартов частоты предъявляются различные требования к их метрологическим характеристикам (нестабильность частоты, отклонение действительного значения частоты, фазовый шум), эксплуатационным характеристикам (потребляемая мощность, габаритные размеры, время выхода на рабочий режим) и непосредственно к условиям их эксплуатации. Следует отметить, что активно развивающееся направление создание квантовых стандартов частоты (КСЧ), которые могут быть интегрированы в качестве опорных генераторов частоты в различные технические устройства и системы. Такие как навигационные модули с использованием сигналов космических навигационных систем и инерциальных датчиков; системы защищённой связи с переключением частоты; системы дистанционного зондирования Земли; беспилотные летательные аппараты; системы сбора и передачи данных и т.д. Правительством РФ, в рамках федеральной целевой программы «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС» (2012-2020 гг.), были поставлены научно-исследовательские и опытно конструкторские работы по разработке малогабаритных КСЧ с характеристиками необходимыми для применения в перспективных технических устройствах и системах: СКДО - не хуже нескольких единиц $10^{-11}/\sqrt{\tau}$, где τ – интервал времени

измерения, габариты – менее нескольких десятков кубический сантиметров, энергопотребление – менее нескольких десятых долей Ватт и малое время выхода на рабочий режим – нескольких сотен секунд.

Наиболее перспективным вариантом малогабаритных высокостабильных КСЧ являются стандарты частоты, работающие на основе эффекта когерентного пленения населённости (КПН). Эффект КПН, который был теоретически предсказан и подтверждён экспериментально в 1976 году [1], послужил основой для создания КСЧ на парах Na в 1981 году [2], что привело к увеличению количества работ по исследованию эффекта КПН во всём мире. В России теоретическими и экспериментальными работами по исследованию эффекта КПН занимались такие учёные как Тайченачев А.В., Величанский В.Л., Скворцов М.Н., Юдин В.И., Багаев С.Н., Пальчиков В.Г., Смирнов В.С., Тумайкин А.М. (см., например, [3-6]). Следует отметить, что в проведённых до настоящего момента исследованиях не изучен вопрос повышения метрологических характеристик серийно выпускаемых КСЧ КПН за счёт изменения методов управления и режимов работы его составных частей, например, квантового дискриминатора.

Основным преимуществом стандартов на основе КПН эффекта по сравнению с малогабаритными рубидиевыми стандартами частоты является отсутствие необходимости использования сверхвысокочастотного (СВЧ) резонатора и спектральной лампы, заполненной парами щелочного металла (цезия, рубидия) и имеющей высокое энергопотребление (порядка 0,5 Вт). Это даёт возможность при сохранении высоких метрологических характеристик существенно уменьшить габаритные размеры устройства, энергопотребление и время выхода на рабочий режим.

Однако создание стандарта частоты на основе КПН эффекта связано с необходимостью решения сложных технологических и научных задач:

- необходимо разработать миниатюрные конструктивные элементы, лежащие в основе физической части квантового дискриминатора частоты. Такими элементами являются поверхностно-излучающий лазер с вертикальным

резонатором и миниатюрная ячейка, заполненная буферными газами и парами щелочного металла;

- поиск схемотехнических решений с целью уменьшения габаритных размеров устройства, сокращения потребляемой мощности и минимизации собственных шумов КСЧ;
- создание алгоритмов и программного решения, обеспечивающих управление всеми узлами устройства, стабилизацию и точную регулировку температуры ячейки (относительная погрешность установки температуры ячейки не более $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$), длины волны лазера, частоты СВЧ - генератора (абсолютная погрешность установки частоты не более $0,14\text{ Гц}$), а также выход устройства на рабочий режим за время, не превышающее 180 с при потребляемой мощности менее 300 мВт .

В настоящее время в ряде научно-исследовательских институтов РФ ведутся разработки экспериментальных образцов стандартов частоты, основанных на применении КПН - эффекта, однако эти разработки находятся на стадии лабораторных исследований и не доведены до уровня готовых к серийному производству изделий. В связи с этим становится актуальной и востребованной научно-техническая задача создания отечественного готового к серийному производству стандарта частоты подобного типа с характеристиками, не уступающими лучшим зарубежным аналогам.

Решение данной задачи требует проведения комплексных исследований, включающих в себя анализ различных научно-технических задач. Необходимо также разработать алгоритмы и программное обеспечение для управления всеми узлами устройства, обеспечения высокоточной стабилизации и регулировки температуры ячейки, длины волны лазера и частоты СВЧ - генератора, а также оптимизацию времени выхода устройства на рабочий режим при минимальной потребляемой мощности. Успешная реализация этой научно-технической задачи позволит не только создать новый отечественный стандарт частоты, готовый к серийному производству, но и заложить основу для его дальнейшего массового внедрения в РФ. Именно на решение этих прикладных научно-технических задач,

имеющих большое значение для развития квантовой метрологии, повышения точности измерений времени и частоты, а также импортозамещения в области высокоточных измерений времени и частоты, направлена данная диссертационная работа, что предопределяет её высокую актуальность и значительную практическую ценность.

Диссертационная работа посвящена решению вопросов разработки и исследованию методов, обеспечивающих новые (лучшие) метрологические характеристики квантового стандарта частоты на основе эффекта когерентного пленения населённостей в парах рубидия (КСЧ КПН).

Цель работы – Улучшение метрологических и эксплуатационных характеристик стандарта частоты на основе эффекта когерентного пленения населённостей на основе новых методов стабилизации параметров квантового дискриминатора частоты.

Основная научная задача – Разработка новых методов стабилизации параметров квантового дискриминатора, обеспечивающих работу стандарта частоты на основе эффекта когерентного пленения населённостей с заданными метрологическими и эксплуатационными характеристиками.

Частные научные задачи:

1. Исследовать влияние интенсивности излучения лазера, температуры ячейки с парами щелочного металла, мощности СВЧ - генератора, на сдвиг частоты регистрируемого сверхтонкого перехода атома рубидия, наблюдаемого посредством эффекта КПН.
2. Исследовать контраст КПН - резонанса в зависимости от выходной мощности и девиации частоты СВЧ - генератора, а также от интенсивности излучения лазера.
3. Исследовать влияние эффекта Зеемана на сдвиг частоты КПН - резонанса, обусловленное взаимодействием атомов ^{87}Rb с магнитными полями создаваемыми катушками подмагничивания.

4. Провести анализ нестабильности КСЧ КПН в зависимости от выходной мощности и девиации частоты СВЧ - генератора, а также от интенсивности излучения лазера.

Объектом исследований являются квантовые стандарты частоты на основе эффекта когерентного пленения населённостей в парах атома рубидия.

Предмет исследований: процессы и физические явления в квантовом дискриминаторе, влияющие на метрологические и эксплуатационные характеристики КСЧ на основе эффекта когерентного пленения населённостей.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработанный метод стабилизации КПН - резонанса, основанный на изменении выходной мощности СВЧ - генератора и тока лазера, обеспечивает воспроизводимость частоты выходного сигнала от включения к включению в пределах $\pm 4,0 \times 10^{-11}$ при времени выхода на рабочий режим менее 180 с.

2. Предложенный и реализованный метод настройки КСЧ КПН, основанный на определении экстремумов зависимостей частоты от интенсивности лазера, выходной мощности СВЧ - генератора и температуры ячейки, обеспечивает нестабильность частоты КСЧ КПН меньше $3,0 \times 10^{-11}$ на интервале времени измерения 1 с.

3. Разработанный метод стабилизации длины волны лазера по линии поглощения рубидия, основанный на регулировании мощности нагрева лазера, обеспечивает нестабильность частоты меньше $3,0 \times 10^{-12}$ на интервале времени измерения 100 с.

4. Разработанный метод калибровки системы стабилизации длины волны лазера, основанный на измерении асимметрии пика поглощения в ячейке, обеспечивает нестабильность частоты меньше $1,0 \times 10^{-12}$ на интервале времени измерения 1000 с.

Научно-техническая новизна заключается в следующем:

1. Впервые в России создан КСЧ КПН с нестабильностью частоты менее $5,0 \times 10^{-13}$ на интервале времени измерений 1000 секунд при энергопотреблении менее 300 мВт.

2. Разработаны методы и алгоритмы, позволяющие обеспечить воспроизводимость частоты от включения к включению КСЧ КПН в пределах $\pm 4,0 \times 10^{-11}$ при времени выхода на рабочий режим менее 180 секунд.

3. Впервые разработан метод стабилизации температуры поверхностно-излучающего лазера с вертикальным резонатором в квантовых стандартах частоты на основе эффекта когерентного пленения населённостей по сигналу детектирования пика поглощения в ячейке.

Методы исследований. В диссертации применены теоретические и экспериментальные методы исследований. Теоретические исследования проведены на основе теории автоматического регулирования, теории чисел, математического анализа, математической статистики, численных методов в приложении к обработке цифровых сигналов. Экспериментальные исследования проведены на основе научно-технической базы ФГУП «ВНИИФТРИ» с применением калиброванного и сертифицированного оборудования.

Достоверность результатов. Достоверность результатов подтверждена применением аттестованных высокоточных средств измерений утверждённого типа, используемых в лаборатории ФГУП «ВНИИФТРИ», а также при проведении апробации разработанных алгоритмов и программного обеспечения. Проведён сопоставительный анализ метрологических характеристик, полученных в диссертации, с опубликованными в литературе данными, полученными в результате применения других альтернативных подходов.

Практическая значимость. Разработанные алгоритмы и методы КСЧ внедрены в метрологически значимое программное обеспечение КСЧ КПН в составе серийного выпускаемого изделия «Квантовый стандарт частоты МГФК.408484.026 НАП-КПН». Кроме того, разработанные автором методы используются при выполнении других НИОКР ФГУП «ВНИИФТРИ».

Личный вклад автора. Все экспериментальные результаты, диссертационной работы, получены автором лично, либо при решающем его участии. Автор принимал активное участие в разработке и исследовании КСЧ

КПН и лично разработал алгоритмы, методы и программное обеспечение для работы КСЧ КПН. Принимал участие в проведении всего цикла испытаний КСЧ КПН, а также в наземных (транспорт) и лётных (вертолёт) испытаниях.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались на Международных конференциях «Лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛаПлаз (2019, 2020, 2021 НИЯУ МИФИ г. Москва), Европейский форум по частоте и времени IEEE EFTF-IFCS (2021), на научной практической конференции молодых учёных, аспирантов и специалистов «Метрология в XXI веке» (2020, 2021, п. Менделеево), на двух Всероссийских конференциях «Радиотехнические технологии в приборостроении» (Туапсе-2022, Белокуриха-2022). Материалы диссертации были представлены на конкурсе на соискание премии им. С.А. Христиановича по направлению «Исследование параметров времени и частоты», проводимой среди молодых учёных ФГУП «ВНИИФТРИ» в 2021 году.

Содержание работы опубликовано в рецензируемых журналах. Результаты диссертационного исследования содержатся в 14 публикациях, среди которых 7 публикаций входят в список рецензируемых журналов, рекомендованных ВАК. В ходе исследований по теме диссертации было получено два патента на полезную модель (RU197054U1 26.03.2020 и RU195880U1 07.02.2020) и два свидетельства о регистрации программы для ЭВМ (RU2019667330 23.12.2019 и RU2019667332 23.12.2019).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы. Общий объем диссертации составляет **111** страниц, включая список цитированной литературы. Диссертация содержит **45** рисунков, **6** таблиц и **142** ссылки на литературные источники.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, указаны цели и задачи исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту, обозначена практическая значимость и личный вклад автора.

В **Главе 1** рассмотрены основные типы малогабаритных источников опорной частоты, применяемые в современных электронных устройствах, приведён анализ литературы по исследованиям эффекта когерентного пленения населённых и применении его в квантовых стандартах частоты, перечислены основные составные части прибора с указанием их функционального назначения и определена структурная схема работы КСЧ КПН (см. Рисунок 1) Схема содержит квантовый дискриминатор частоты (физический блок) и блок управления электроникой (система управления и СВЧ электроника). Для стабилизации частоты СВЧ-генератора используются нелинейные резонансы когерентного пленения населённых, возбуждаемые в многочастном поле излучения диодного лазера с вертикальным резонатором. Этот метод возбуждения реперных сигналов является полностью оптическим, не требующим генерации непосредственно микроволнового поля и применения СВЧ резонатора. Проведён анализ составных частей КСЧ КПН на предмет их возможного влияния на нестабильность частоты.

В разделе 1.1 приводится анализ литературы, связанный с КСЧ КПН. В разделе 1.2 рассмотрена функциональная схема КСЧ КПН. В разделе 1.3 рассмотрены основные источники шумов, влияющих на метрологические характеристики квантового стандарта частоты, связанные с параметрами физического блока дискриминатора частоты и его схемотехническим решением, а также режимы работы отдельных узлов стандарта, которые определяются алгоритмами управления и метрологически значимым программным обеспечением. В разделе 1.4 рассмотрены конструкции ячеек, применяемые в КСЧ КПН. В разделе 1.5 рассмотрена структурная схема опытного образца КСЧ КПН. В разделе 1.6 детально описан способ наблюдения КПН-резонанса в КСЧ. В

разделе 1.7 проводится анализ структурной схемы КСЧ КПН. В разделе 1.8 впервые показано, что настройка программного обеспечения, учитывающая особенности схемотехнического решения и физического блока дискриминатора частоты, может качественно улучшить метрологические характеристики КСЧ КПН. В целях повышения метрологических характеристик КСЧ КПН проведены дополнительные исследования влияния алгоритмов управления на его работу.

Результаты выявили необходимость дальнейшего изучения влияния методов управления КСЧ КПН на его метрологические характеристики. В частности, перспективным направлением является разработка усложнённых алгоритмов управления составными частями КСЧ КПН для устранения значительного дрейфа частоты.

Структурная схема КСЧ на КПН резонансе ^{87}Rb на линии D_1

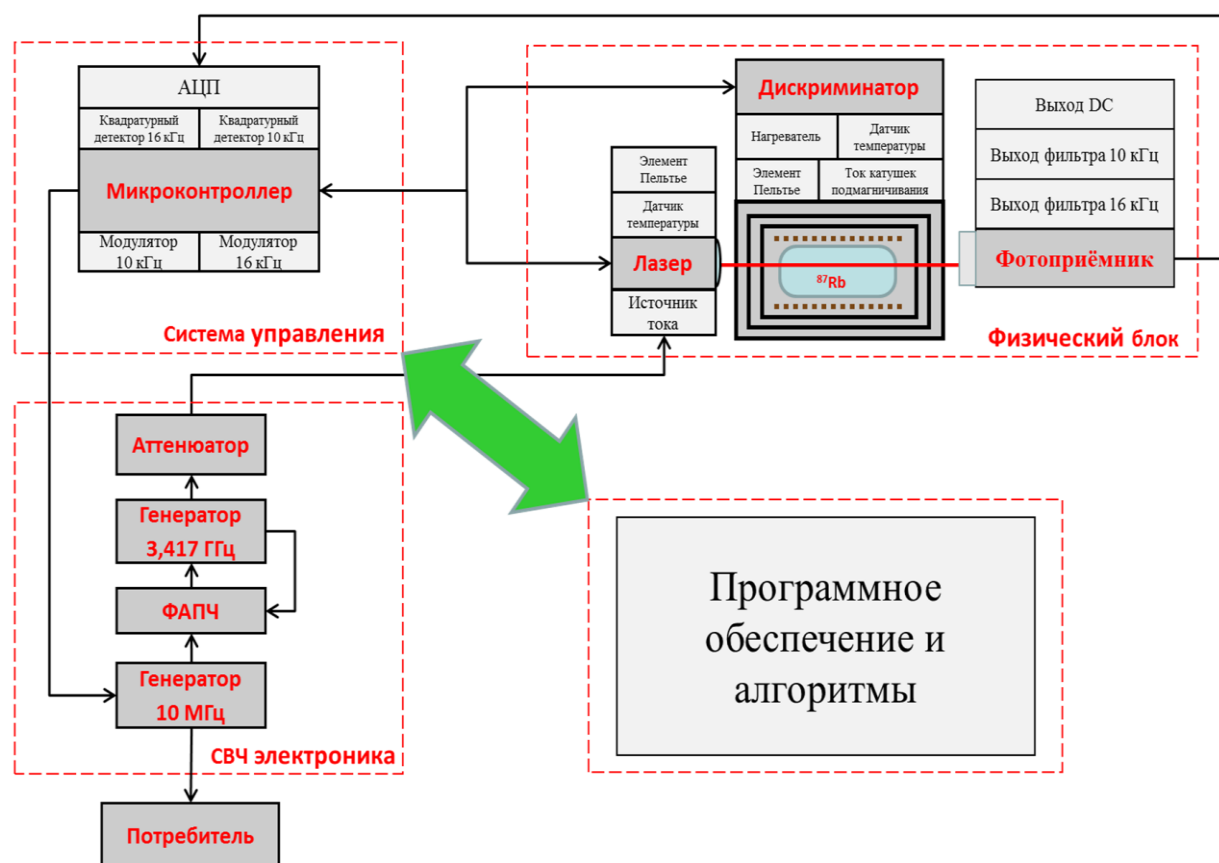


Рисунок 1 - Структурная схема работы КСЧ КПН

Глава 2 посвящена экспериментальным исследованиям влияния параметров отдельных узлов КСЧ КПН на действительное значение частоты, предложен критерий для уменьшения их влияния. Приведены результаты исследований

влияния параметров на действительное значение и нестабильность частоты КСЧ КПН при изменении режимов работы составных частей КСЧ КПН: ячейки, заполненной щелочным металлом, поверхностно-излучающего лазера с вертикальным резонатором, катушки подмагничивания, СВЧ - генератора с номинальной частотой 3,417 ГГц. Была собрана экспериментальная установка для исследования влияния параметров работы КСЧ КПН на метрологические характеристики КСЧ (см. Рисунок 2). В данной установке частота выходного сигнала 10 МГц КСЧ КПН сравнивается с опорной частотой водородного стандарта частоты Ч1-1006 с помощью компаратора Ч7-315. Данные с компаратора поступают на персональный компьютер и записываются в файл в соответствии со значениями исследуемых параметров КСЧ КПН, такими как: абсолютное значение температуры ячейки с парами щелочного металла и буферными газами, ток инжекции лазера, выходная мощность СВЧ - генератора, девиация частоты СВЧ - генератора.

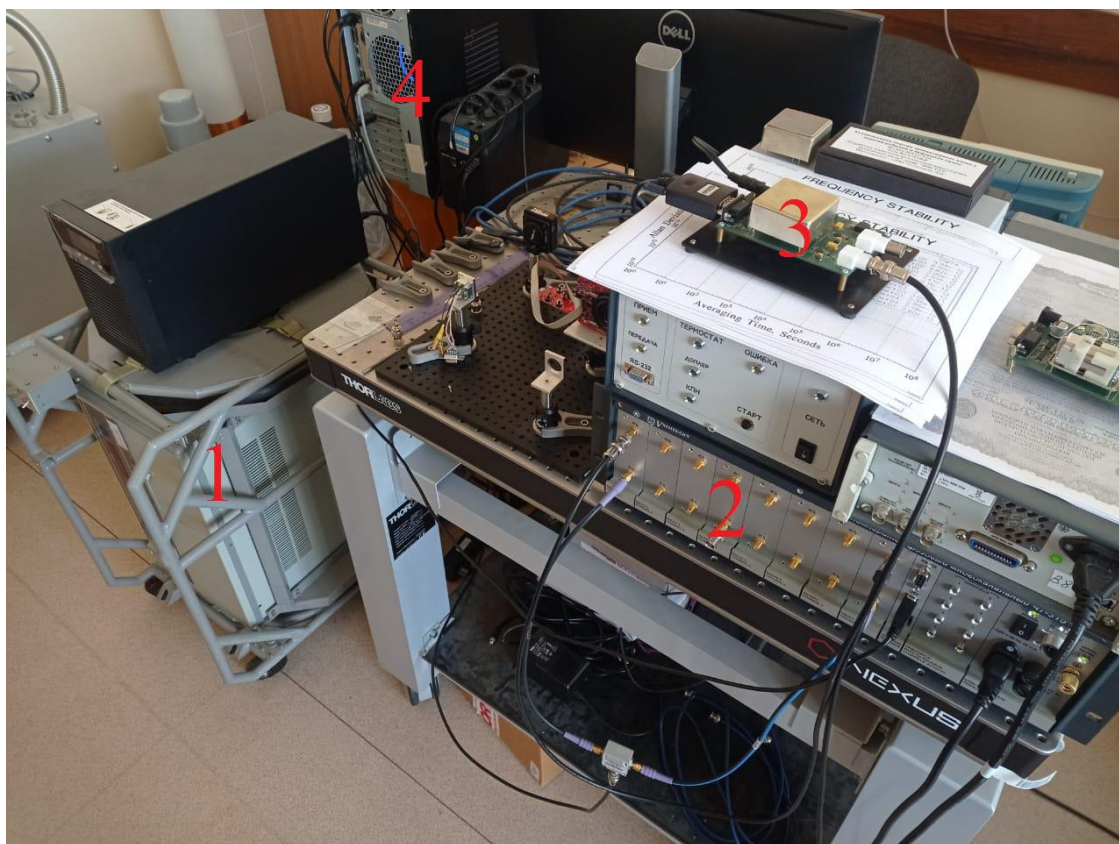


Рисунок 2 - Экспериментальная установка для исследования КСЧ КПН.
1 - Водородный стандарт частоты, 2 - Частотный компаратор, 3 - КСЧ КПН,
4 – ПК

Разработан новый метод стабилизации КПН - резонанса, основанный на результатах исследования работы КСЧ КПН. Метод заключается в поиске резонанса при значениях тока инжекции лазера и мощности СВЧ-генератора, при которых амплитуда резонанса максимальна. Затем производится изменение значений тока инжекции лазера и выходной мощности СВЧ - генератора до тех пор, пока их влияние на резонанс КПН не станет минимальным. После этого осуществляется стабилизация по резонансу. Такой подход позволил обеспечить воспроизводимость частоты от включения к включению в пределах $\pm 4,0 \times 10^{-11}$.

В разделе 2.1 автором приводятся результаты исследования зависимости частоты КСЧ от абсолютной температуры ячейки.

Результаты работы [7] показывают, что существует оптимальная температура, для которой характерно минимальное влияние параметров на действительное значение частоты, и данная зависимость сдвига частоты от температуры для ячейки, заполненной двухкомпонентным газом и содержащей щелочной металл, имеет следующий вид:

$$\Delta f(T) = P_0 \left(\frac{(\gamma_1 + r\gamma_2)}{1+r} (T - T_0)^2 + \frac{(\delta_1 + r\delta_2)}{1+r} (T - T_0) + \frac{(\beta_1 + r\beta_2)}{1+r} \right), \quad (1)$$

где β_i – коэффициент, отвечающий за сдвиг частоты от парциального давления i -го компонента буферного газа; δ_i и γ_i – коэффициенты, отвечающие за сдвиг частоты от температуры i -го компонента буферного газа (соответственно линейный и квадратичный); P_0 – полное давление буферного газа при нормальных условиях; r – отношение давлений (P_2/P_1) газов при нормальных условиях; T_0 – рабочая температура.

Измеренный в данной работе относительный сдвиг частоты КПН - резонанса от температуры ячейки представлен на рисунке 3.

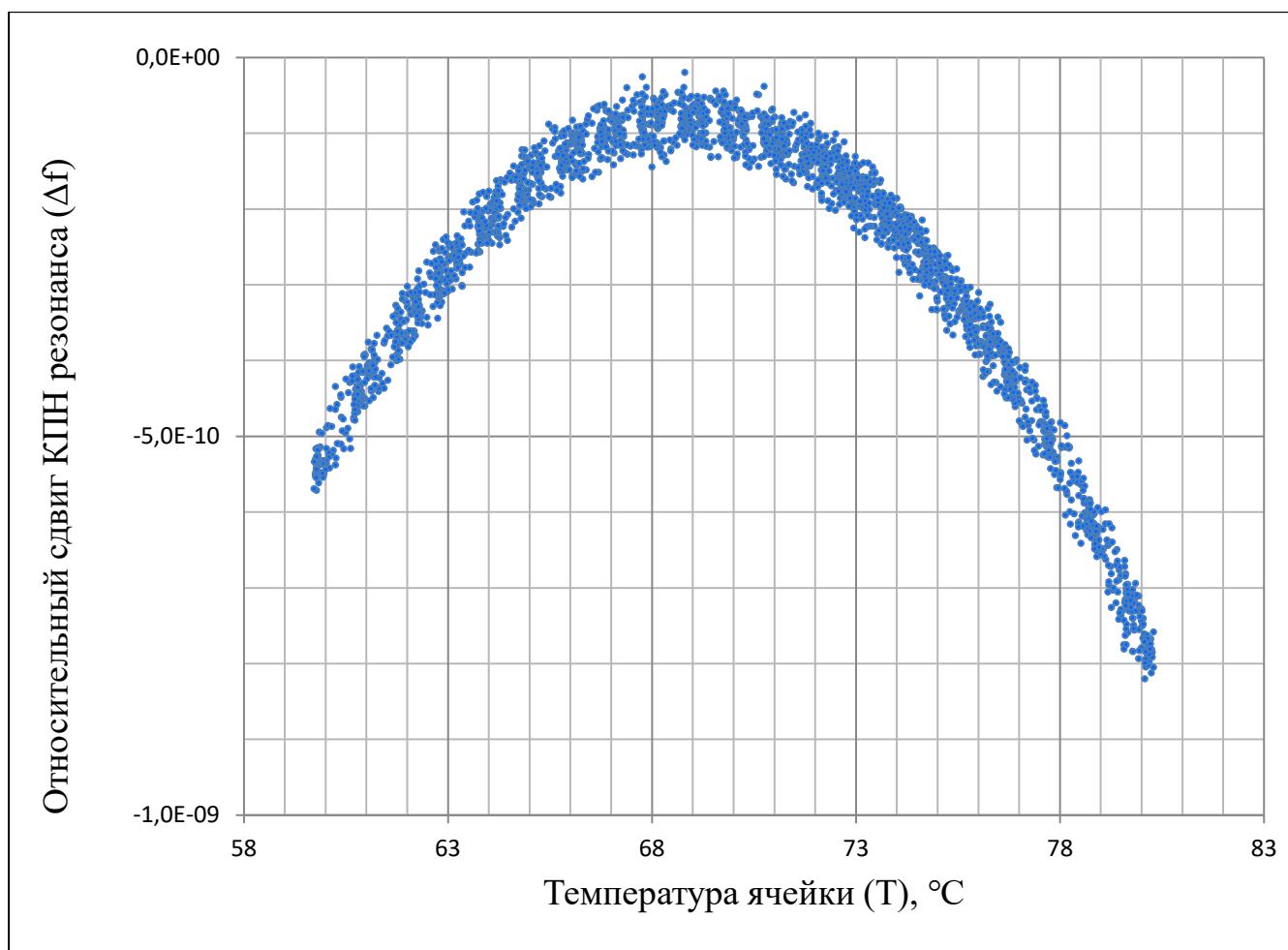


Рисунок 3 - Зависимость относительного сдвига КПН - резонанса от температуры ячейки

В разделе 2.2 автором показано, что при увеличении выходной мощности СВЧ - генератора растёт индекс модуляции, что приводит к уменьшению контраста КПН - резонанса. При этом отношение сигнал/шум изменяется не столь значительно, что приводит к малому увеличению значения нестабильности частоты для интервала времени измерений 1 с. В то же время видно существенное снижение значения нестабильности для интервалов времени измерений более 100 с, вызванное уменьшением чувствительности сдвига частоты резонанса КПН от вариаций мощности СВЧ - генератора и оптической мощности лазера (см. Рисунок 4) при увеличенном индексе модуляции.

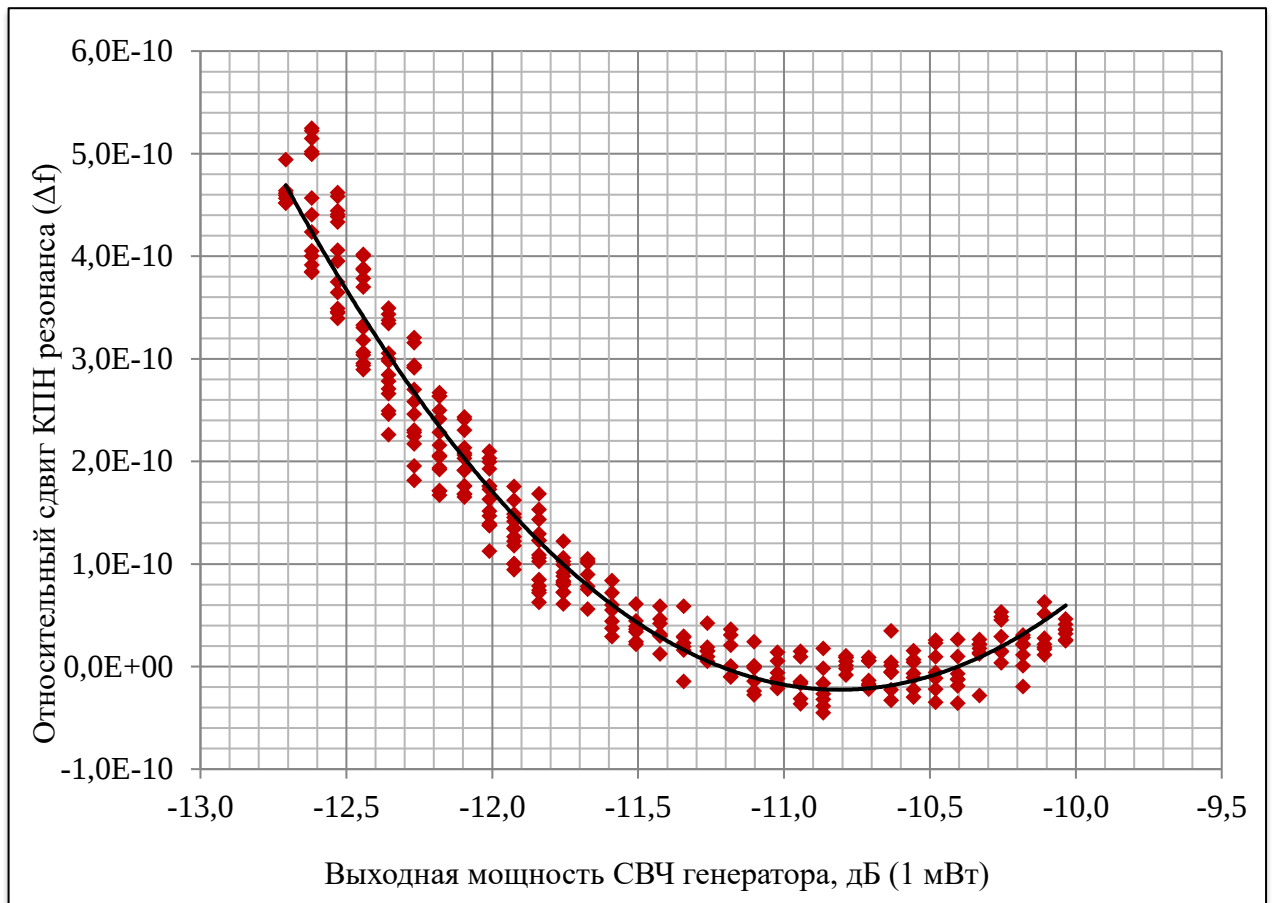


Рисунок 4 - Зависимость относительного сдвига КПН - резонанса от выходной мощности СВЧ генератора

В разделе 2.3 приводятся оригинальные результаты исследования влияния интенсивности лазера на сдвиг частоты КПН - резонанса. Показана возможность минимизации влияния изменения интенсивности лазера на относительный сдвиг КПН - резонанса.

В разделе 2.4 рассматривается влияние магнитного поля на сдвиг частоты КПН - резонанса за счёт квадратичного эффекта Зеемана и определены ограничения, налагаемые на величину магнитного поля, связанные с методом опроса КПН - резонанса.

В разделе 2.5 приводится зависимость сдвига действительного значения частоты КСЧ от изменения значения рабочих параметров КСЧ КПН. Так же в этом же разделе представлены результаты измерений зависимости смещение частоты КСЧ от рабочих параметров после настройки параметров по разработанному методу (см. Таблица 1).

Таблица 1 - Чувствительность сдвига частоты КПН - резонанса от вариации параметров работы КСЧ до настройки параметров и после

Параметр	Нестабильность значений параметров в эксперименте	Относительное смещение частоты	
		До настройки параметров	После настройки параметров
Температура ячейки	0,05 К	$2,1 \times 10^{-11}$	$2,4 \times 10^{-13}$
Ток инжекции лазера	10 мкА	$8,5 \times 10^{-11}$	$8,1 \times 10^{-13}$
Мощность СВЧ генератора	0,1 дБ (1мВт)	$3,4 \times 10^{-11}$	$4,5 \times 10^{-13}$

Глава 3 посвящена методам стабилизации КПН - резонанса и обеспечению воспроизводимости действительного значения частоты КСЧ КПН. В разделе 3.2 рассмотрены два метода стабилизации длины волны лазера по линии поглощения рубидия. Приводятся результаты исследований, применение которых позволит перестраивать длину волны поверхностно-излучающего лазера с вертикальным резонатором и осуществлять стабилизацию длины волны на переход D_1 линии ^{87}Rb .

Первый метод подразумевает изменение длины волны лазера посредством изменения тока инжекции лазера. Второй метод обеспечивает регулировку длины волны посредством изменения температуры лазера. Тщательное исследование этих методов позволило выделить их преимущества и недостатки. Также в данном разделе представлены результаты исследования того, как алгоритмы управления длиной волны лазера влияют на метрологические характеристики КСЧ.

Основным преимуществом первого метода является относительное быстроедействие перестройки длины волны (характерные времена перестройки 10 нс). Основным недостатком этого метода является появление дополнительного изменения интенсивности излучения при изменении длины волны лазера.

Второй метод (основанный на изменении температуры лазера) также приводит к изменению интенсивности излучения, однако это изменение в 60 раз меньше, чем достигаемое путём изменения тока инжекции лазера. Дополнительным преимуществом второго метода является возможность регулировки интенсивности излучения лазера с помощью изменения тока инжекции лазера. Однако по отношению к первому, этот метод обладает медленным быстрым действием перестройки длины волны (характерные времена перестройки 10 мс).

Далее в главе 3 приведены результаты анализа проведённых исследований параметров лазерного диода. На рисунке 5 представлена зависимость изменения интенсивности лазера вблизи спектра поглощения от длины волны лазера при двух методах регулировки длины волны.

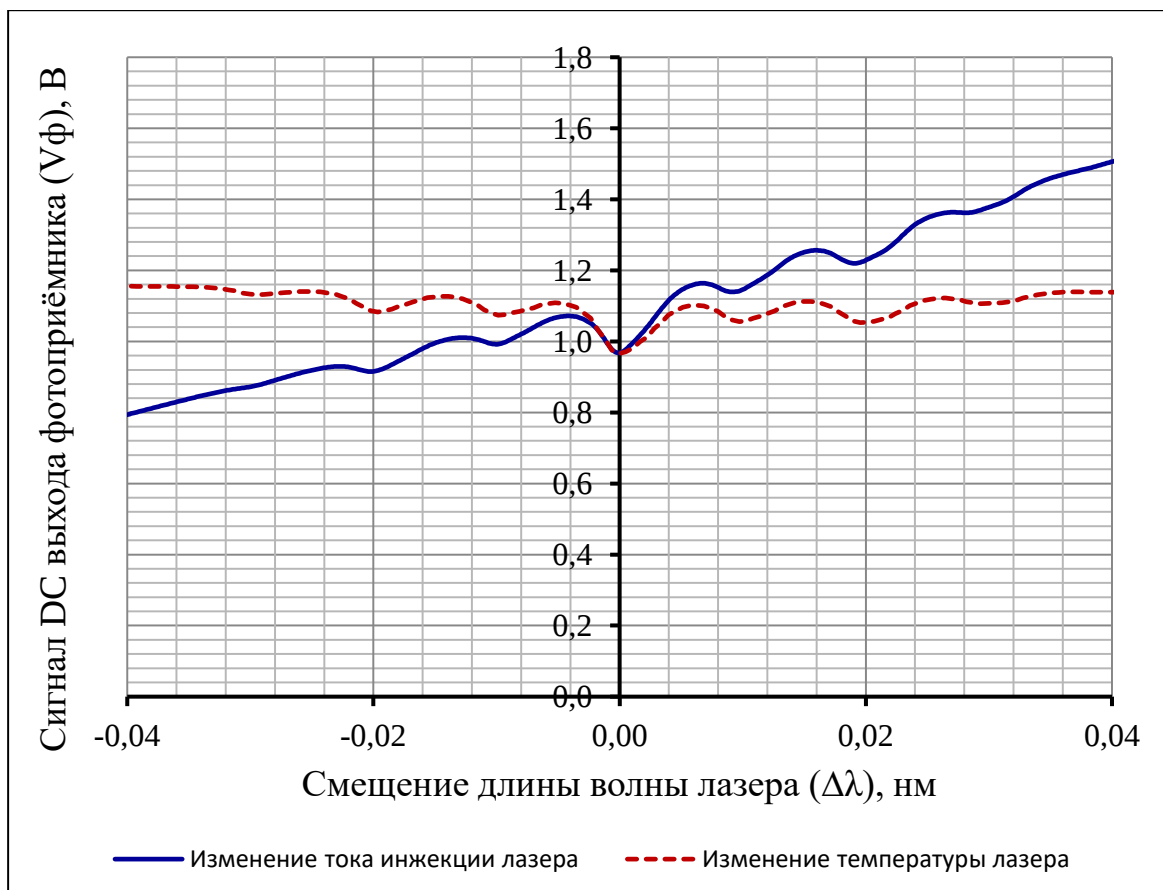


Рисунок 5 - Зависимость сигнала выхода фотоприёмника от смещения длины волны лазера разными методами управления вблизи спектра поглощения

Синяя кривая представляет зависимость сигнала ДС выхода фотоприёмника от изменения тока инжекции лазера, а красная кривая – от изменения его температуры. С учётом проведённого анализа предложен новый алгоритм управления длиной волны лазера по сигналу ошибки, при которой регулировка происходит изменением температуры лазера, а пробная модуляция при изменении его тока, что позволяет исключить погрешность измерений температуры лазера, связанную с местом размещения датчика температуры.

В разделе 3.3 приведены оригинальные результаты исследований влияния асимметрии оптического спектра лазера, вызванной паразитной амплитудной модуляцией интенсивности излучения лазера при пробной модуляции током лазера, на метрологические характеристики КСЧ. Показана необходимость введения поправки в систему стабилизации длины волны лазера по спектру поглощения из-за асимметрии оптического спектра лазера, вызванной паразитной амплитудной модуляцией интенсивности излучения лазера при пробной модуляции током лазера (см. Рисунок 6).

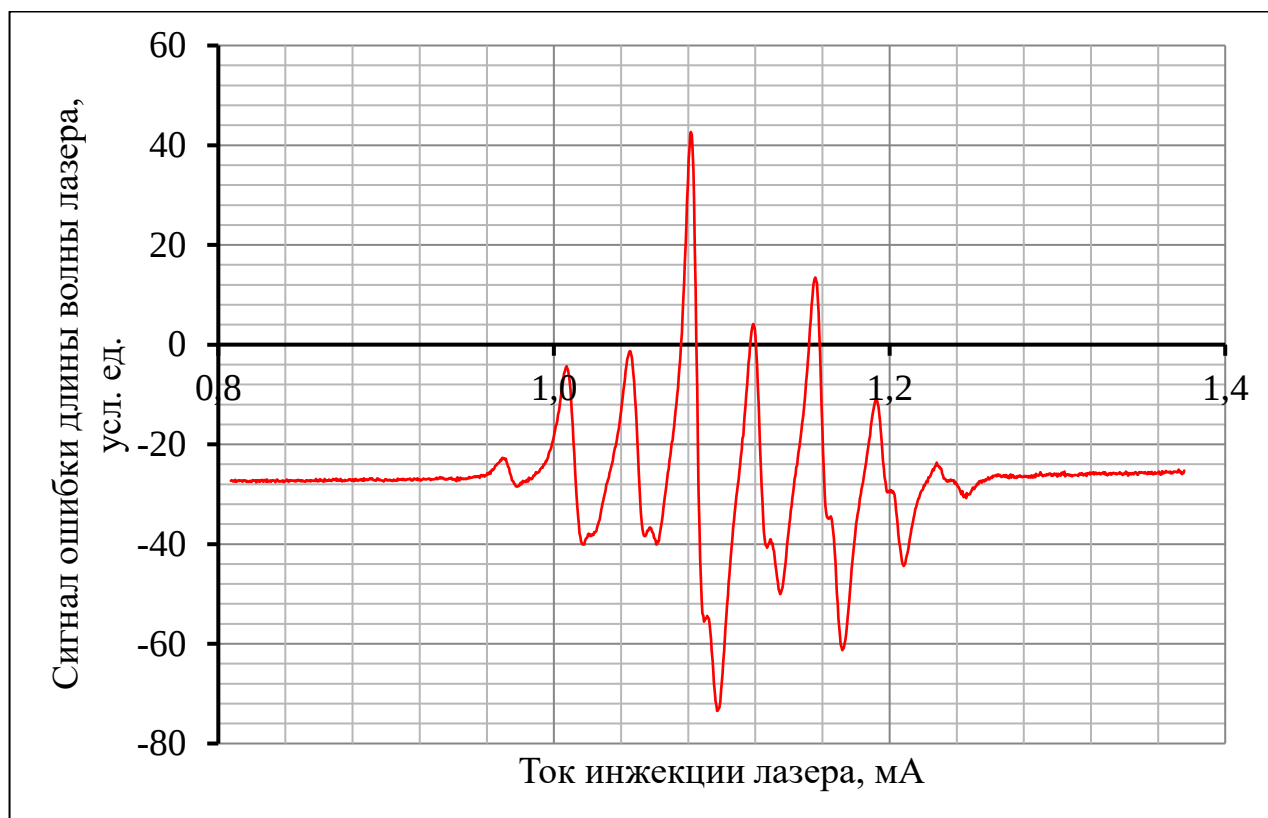


Рисунок 6 - Зависимость сигнала ошибки длины волны от тока инжекции лазера

Также в разделе 3.3 описан метод расчёта значения поправки в сигнал ошибки длины волны лазера. В данном методе значение поправки определяется по среднему значению сигнала синхронного детектора длины волны для двух различных значений смещения длины волны лазера относительно центра спектра поглощения, при которых поглощение не наблюдается (смещение длины волны лазера $\pm 0,05$ нм). Данное среднее значение сигнала синхронного детектора используется в качестве поправки для сигнала ошибки системы стабилизации длины волны лазера, что позволяет уменьшить влияние асимметрии оптического спектра лазера на метрологические характеристики КСЧ КПН в 25 раз.

В **Главе 4** представлены результаты влияния температуры окружающей среды на действительное значение частоты (см. Рисунок 7).

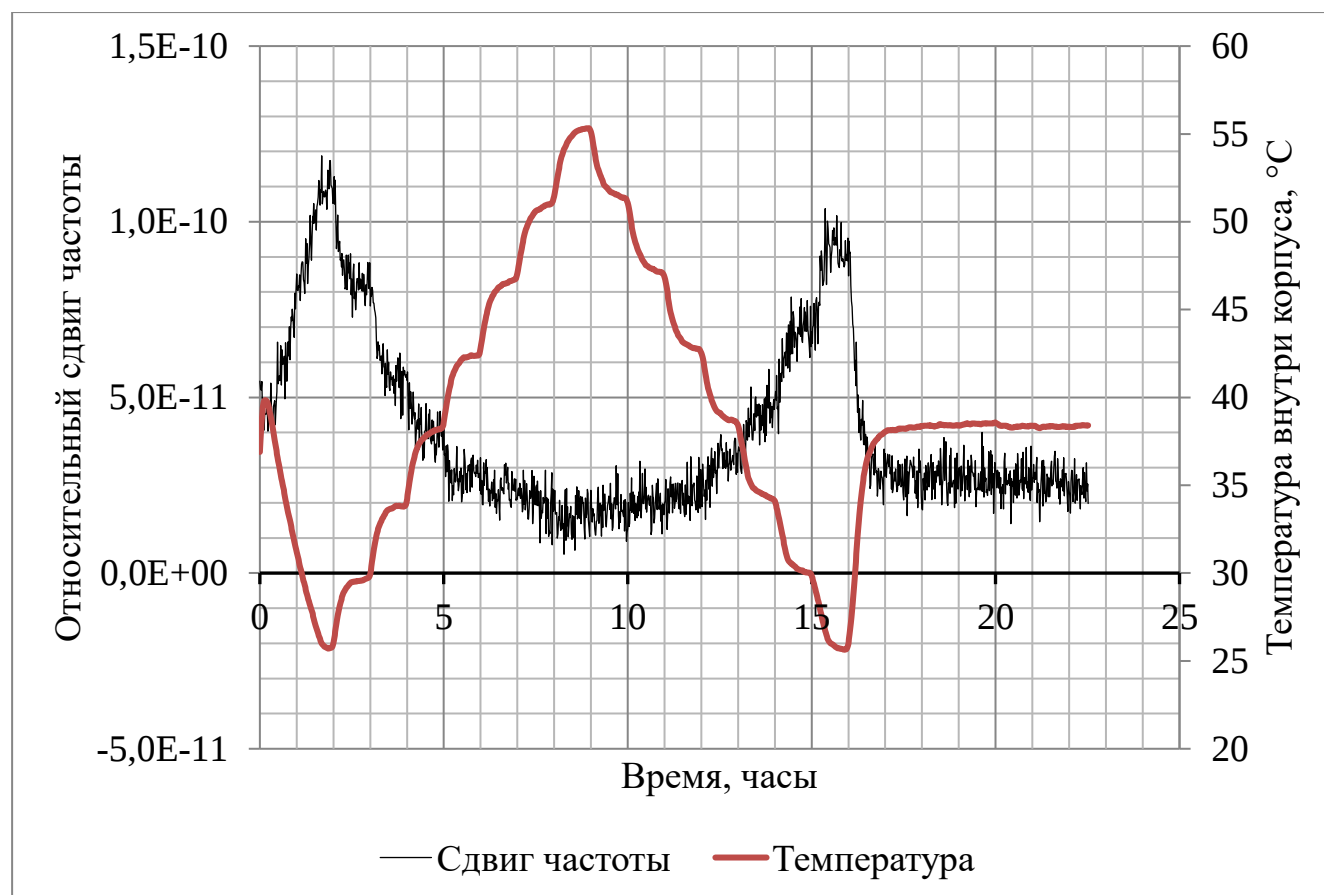


Рисунок 7 - Зависимость относительного сдвига действительного значения и температуры внутри корпуса от времени хода эксперимента

Далее, в главе 4 приведены результаты измерений метрологических характеристик разработанного опытного образца КСЧ КПН (см. Рисунок 8) в полевых условиях и при проведении приёмочных испытаний, проводимых в

рамках ОКР «Создание сверхминиатюрного квантового стандарта частоты для прецизионной аппаратуры потребителей системы ГЛОНАСС» (см. Таблица 2). Так же в 4 главе описан метод термокомпенсации для КСЧ КПН.



Рисунок 8 - Внешний вид КСЧ КПН.

Таблица 2 - Основные характеристики разработанного КСЧ КПН

Размеры, см	5,00×5,00×2,40
Номинальное значение выходной частоты, МГц	5,10
СКДО на интервале времени измерения 1 с, отн. ед.	$1,2 \times 10^{-11}$
СКДО на интервале времени измерения 10 с, отн. ед.	$3,8 \times 10^{-12}$
СКДО на интервале времени измерения 100 с, отн. ед.	$1,2 \times 10^{-12}$
СКДО на интервале времени измерения 1 ч, отн. ед.	$7,0 \times 10^{-13}$
Энергопотребление не более, мВт	300
Время выхода на рабочий режим ($\pm 1 \times 10^{-10}$) не более, с	180
Относительная погрешность частоты, отн. ед.	$\pm 4 \times 10^{-11}$
Температурный коэффициент частоты, 1/°C	$6,4 \times 10^{-13}$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе поставлена и решена актуальная научно - техническая задача - разработка методов управления составными частями квантового стандарта частоты, обеспечивающих требуемые метрологические и эксплуатационные характеристики квантового стандарта частоты на основе эффекта когерентного пленения населённости в парах рубидия.

В диссертационной работе представлены доказательства следующих положений, выносимых на защиту:

- Разработанный метод стабилизации КПН - резонанса, основанный на изменении выходной мощности СВЧ - генератора и тока лазера, обеспечивает воспроизводимость частоты выходного сигнала от включения к включению в пределах $\pm 4,0 \times 10^{-11}$ при времени выхода на рабочий режим менее 180 с.
- Предложенный и реализованный метод настройки КСЧ КПН, основанный на определении экстремумов зависимостей частоты от интенсивности лазера, выходной мощности СВЧ - генератора и температуры ячейки, обеспечивает нестабильность частоты КСЧ КПН меньше $3,0 \times 10^{-11}$ на интервале времени измерения 1 с.
- Разработанный метод стабилизации длины волны лазера по линии поглощения рубидия, основанный на регулировании мощности нагрева лазера, обеспечивает нестабильность частоты меньше $3,0 \times 10^{-12}$ на интервале времени измерения 100 с.
- Разработанный метод калибровки системы стабилизации длины волны лазера, основанный на измерении асимметрии пика поглощения в ячейке, обеспечивает нестабильность частоты меньше $1,0 \times 10^{-12}$ на интервале времени измерения 1000 с.

Для доказательства этих положений, в ходе диссертационного исследования, были решены следующие частные научные задачи:

- Исследовано влияние интенсивности излучения лазера, температуры ячейки с парами щелочного металла, мощности СВЧ - генератора, на сдвиг частоты

регистрируемого сверхтонкого перехода атома рубидия, наблюдаемого посредством эффекта КПН.

- Исследована зависимость контраста КПН - резонанса от выходной мощности и девиации частоты СВЧ - генератора, а также от интенсивности излучения лазера.
- Исследовано влияние эффекта Зеемана на сдвиг частоты КПН - резонанса, обусловленное взаимодействием атомов ^{87}Rb с магнитными полями создаваемыми катушками подмагничивания. Определено минимальное магнитное поле, для которого отсутствует влияние магниточувствительных резонансов при опросе КПН резонанса методом Паунда-Древера-Холла.
- Проведён анализ зависимости нестабильности КСЧ КПН от выходной мощности и девиации частоты СВЧ - генератора, а также от интенсивности излучения лазера.

- **Список публикаций по теме диссертации**

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Блинов И.Ю., Пальчиков В.Г., Самохвалов Ю.С., Парёхин Д.А., Скворцов М.Н., Игнатович С.М., Вишняков В.И., Квашнин Н.Л., Месензова И.С., Бражников Д.В., Васильев В.А., Тайченачев А.В., Юдин В.И., Багаев С.Н., Миниатюрный квантовый стандарт частоты на основе явления когерентного пленения населённостей в парах атомов ^{87}Rb // Квант. Электроника, 2020, 50 (6), 576–580.
2. Пальчиков В.Г., Самохвалов Ю.С., Парёхин Д.А., Сверхминиатюрный атомный стандарт частоты на основе эффекта когерентного пленения населённостей. // Радиотехника, 2022, 86 (12), 152-154.
3. Гайслер В.А., Дербезов И.А., Гайслер А.В., Дмитриев Д.В., Бакаров А.К., Торопов А.И., Качанова М.М., Живодков Ю.А., Латышев А.В., Скворцов М.Н., Игнатович С.М., Вишняков В.И., Квашнин Н.Л., Месензова И.С., Тайченачев А.В., Багаев С.Н., Блинов И.Ю., Пальчиков В.Г., Самохвалов Ю.С., Парёхин Д.А., Лазеры с вертикальным резонатором для миниатюрных квантовых стандартов частоты. // Автометрия, 2021. 57 (5), 4-10.
4. Парёхин Д.А., Алгоритмы управления в квантовых стандартах частоты на основе эффекта когерентного пленения населённостей. // Измерительная техника, 2021. 64 (1), 28-33.
5. Парёхин Д.А., Термокомпенсация в квантовых стандартах частоты на основе эффекта когерентного пленения населённостей. // Измерительная техника, 2021. 64 (6), 440-444.
6. Парёхин Д.А., Особенности сдвига частоты от эффекта Зеемана в квантовых стандартах частоты на основе эффекта когерентного пленения населённостей. // Вестник метролога, 2021. № 2, 15-19.
7. Зотов Е.А., Парёхин Д.А., Исследование метрологических характеристик сверхминиатюрного квантового стандарта частоты. // Альманах современной метрологии, 2020, 3 (23), 128-136.

Публикации в других изданиях

8. Парёхин Д.А., Разработка метрологически значимого программного обеспечения для сверхминиатюрного квантового стандарта частоты. // В книге: Метрология в XXI веке. Материалы VIII научно-практической конференции молодых учёных, аспирантов и специалистов. Менделеево, 2021, 103-105.

9. Пьявкина В.В., Парёхин Д.А., Термокомпенсация в квантовом стандарте частоты на основе эффекта когерентного пленения населенностей. // В книге: Метрология в XXI веке. Материалы VIII научно-практической конференции молодых учёных, аспирантов и специалистов. Менделеево, 2021, 106-108.

10. Самохвалов Ю.С., Парёхин Д.А., «Дисциплинирование» стандарта частоты на КППН-эффекте с использованием внешнего опорного сигнала 1 Гц // В книге: Метрология времени и пространства. Материалы X Международного симпозиума. Менделеево, 2021, 210-211.

11. Игнатович С.М., Скворцов М.Н., Вишняков В.И., Квашнин Н.Л., Васильев В.А., Бражников Д.В., Юдин В.И., Тайченачев А.В., Багаев С.Н., Блинов И.Ю., Пальчиков В.Г., Самохвалов Ю.С., Парёхин Д.А., Зотов Е.А. Малах М.П., Смирнов Ф.Р., Результаты наземных и бортовых метрологических испытаний сверхминиатюрного квантового стандарта частоты. // Сборник научных трудов VII Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии - ЛАПЛАЗ-2021» 2021, 48-49.

12. Игнатович С.М., Скворцов М.Н., Вишняков В.И., Квашнин Н.Л., Васильев В.А., Бражников Д.В., Юдин В.И., Тайченачев А.В., Багаев С.Н., Блинов И.Ю., Пальчиков В.Г., Самохвалов Ю.С., Парёхин Д.А., Зотов Е.А., Малах М.П., Кобцев С.М., Гайслер В.А., Метрологические характеристики сверхминиатюрного квантового стандарта частоты. // Сборник научных трудов VI Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии - ЛАПЛАЗ-2020». 2020, 64-65.

13. Блинов И.Ю., Пальчиков В.Г., Самохвалов Ю.С., Парёхин Д.А., Зотов Е.А., Малах М.П., Игнатович С.М., Скворцов М.Н., Вишняков В.И., Квашнин Н.Л., Васильев В.А., Бражников Д.В., Юдин В.И., Тайченачев А.В., Багаев С.Н., Сверхминиатюрный рубидиевый атомный стандарт частоты, основанный на использовании эффекта когерентного пленения населённости. // Сборник научных трудов V Международная конференция «Лазерные плазменные исследования и технологии - ЛАПЛАЗ-2019», Москва, 2019, 25-27.

14. Зотов Е.А., Малах М.П., Парёхин Д.А., Пьявкина В.В., Миниатюрные часы на эффекте когерентного пленения населённости. // В книге: Метрология в XXI веке Материалы VII научно-практической конференции молодых учёных, аспирантов и специалистов. Менделеево, 2019, 21-23.

Изобретения

15. Патент на полезную модель RU 197054 U1, 26.03.2020. Заявка №2019141134 от 12.12.2019., Сверхминиатюрный квантовый стандарт частоты, Атутов С.Н., Багаев С.Н., Басалаев М.Ю., Блинов И.Ю., Бражников Д.В., Васильев В.А., Вишняков В.И., Гайслер В.А., Денисов В.И., Донченко С.И., Игнатович С.М., Квашнин Н.Л., Месензова И.С., Пальчиков В.Г., Парёхин Д.А., Самохвалов Ю.С., Скворцов М.Н., Тайченачев А.В., Юдин В.И.,

16. Патент на полезную модель RU 195880 U1, 07.02.2020. Заявка №2019141136 от 12.12.2019., Испытательный стенд для компонентов дискриминатора стандарта частоты на основе эффекта когерентного пленения населённости, Самохвалов Ю.С., Парёхин Д.А., Блинов И.Ю., Зотов Е.А., Месензова И.С., Васильев В.А., Квашнин Н.Л.

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ

17. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019667330, 23.12.2019. Заявка №2019666085 от 09.12.2019., Программное обеспечение встраиваемого микроконтроллера системы управления малогабаритным квантовым стандартом частоты, Васильев В.А., Парёхин Д.А., Абрамов М.А.

18. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019667332, 23.12.2019. Заявка №2019666068 от 09.12.2019., Прикладное программное обеспечение испытательного стенда для компонентов дискриминатора стандарта частоты на основе эффекта когерентного пленения населённости, Самохвалов Ю.С., Парёхин Д.А.

Библиография

1. Alzetta G, Gozzini A, Moi L, Orriols G, Experimental method for observation of Rf transitions and laser beat resonances in oriented Na vapor. // Nuovo Cim. 1976, 36, 5–20
2. Tench R E, Peuse B W, Hemmer P R, Thomas J E, Ezekiel S, Leiby C C, Picard R H, Willis C R Laser raman difference technique applied to high-precision spectroscopy. // 1981 J. de Phys. 42, 45–51
3. Смирнов В.С., Тумайкин А.М., Юдин В.И. Стационарные когерентные состояния атомов при резонансном взаимодействии с эллиптически поляризованным светом. Когерентное пленение населённостей (общая теория), // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1989. Т. 96. № 5. С. 1613
4. Зибров С.А., Величанский В.Л., Зибров А.С., Тайченачев А.В., Юдин В.И. Экспериментальное исследование тёмного псевдорезонанса. // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2005. Т. 82. № 7-8. С. 534-538.
5. Смирнов В.С., Тумайкин А.М., Юдин В.И. Стационарные когерентные состояния атомов при резонансном взаимодействии с эллиптически поляризованным светом. Когерентное пленение населённостей (общая теория), // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1989. Т. 96. № 5. С. 1613.
6. Блинов И.Ю., Пальчиков В.Г., Самохвалов Ю.С., Парёхин Д.А., Скворцов М.Н., Игнатович С.М., Вишняков В.И., Квашинин Н.Л., Месенцова И.С., Бражников Д.В., Васильев В.А., Тайченачев А.В., Юдин В.И., Багаев С.Н., Миниатюрный квантовый стандарт частоты на основе явления когерентного пленения населённостей в парах атомов ^{87}Rb // Квант. Электроника, 2020, 50 (6), 576–580.
7. Vanier J., Kunski R., Cyr N., Savard J., Tetu M., On hyperfine frequency shifts caused by buffer gases: Application to the optically pumped passive rubidium frequency standard. // Journal of Applied Physics, 1982, vol. 53, no. 8, pp. 5387–5391.