

На правах рукописи



Поляков Виктор Александрович

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ВОДОРОДНОГО ГЕНЕРАТОРА
С ДВОЙНОЙ СОРТИРОВКОЙ АТОМОВ
ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ЧАСТОТЫ

05.11.15 – Метрология и метрологическое обеспечение

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Нижний Новгород – 2021

Работа выполнена в Закрытом акционерном обществе (ЗАО) «Время-Ч»

Научный руководитель – доктор технических наук, заместитель генерального директора по науке ЗАО Время-Ч, Демидов Николай Александрович

Официальные оппоненты

Рыжков Анатолий Васильевич – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Московского Технического Университета Связи и Информатики (МТУСИ), Россия, 111024, г. Москва, улица Авиамоторная, 8а;

Закс Виктор Самуилович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Акционерного общества «Корпорация космических систем специального назначения «Комета» (АО «Корпорация Комета»), Россия, 115088, г. Москва, ул. Велозаводская, д. 5, Концерн ВКО «Алмаз-Антей».

Ведущая организация – Физический институт им. Лебедева Российской Академии Наук (ФИАН), 119991, Россия, г. Москва, Ленинский проспект, д.53.

Защита состоится «___» _____ 2021 г. в ___ часов на заседании диссертационного совета Д 308.005.01 в ФГУП «ВНИИФТРИ» по адресу: 141570 п/о Менделеево, Солнечногорский район, Московская обл., тел. 8(495) 744-81-12, 8(495) 526-63-01.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГУП «ВНИИФТРИ».

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук

М.В. Балаханов

Актуальность темы диссертации

Несколько последних десятилетий водородные стандарты частоты и времени (ВСЧВ) превосходят остальные типы микроволновых квантовых стандартов частоты по стабильности частоты на интервалах времени измерения до суток. Поэтому ВСЧВ нашли широкое применение в отраслях науки и техники, требующих метрологически точных частотно-временных измерений. Это – военные технологии, спутниковая навигация, геодезия и картография, радиоинтерферометрия со сверхдлинной базой и служба определения параметров вращения Земли, научные исследования по уточнению физических постоянных.

ВСЧВ являются основным рабочим средством измерения времени и частоты в составе государственной поверочной схемы измерения времени и частоты. Они также составляют основу групповых водородных хранителей частоты и времени (ГВХЧВ), первичного и вторичных эталонов Государственной службы времени и частоты, рабочих эталонов гражданских и военных потребителей.

В рамках реализации Федеральной целевой программы «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012-2020 годы» была проведена модернизация комплексов хранения национальной шкалы времени UTC(SU) в интересах достижения заданных тактико-технических характеристик системы ГЛОНАСС в части разработки базового комплекса времени и частоты, основу которого составляет ВСЧВ с нестабильностью частоты менее $3 \cdot 10^{-16}$ на интервале времени измерения 1 сутки. Кроме того, был разработан ВСЧВ для перевозимых квантовых часов нового поколения. Их основная выполняемая задача – сличение территориально разнесенных эталонов времени. Поэтому прибор должен иметь малые габариты и вес, должен устойчиво работать в условиях больших и резких перепадов температур, при высоких уровнях механических нагрузок, вибраций и ударов. Среди технических требований наиболее жестким является ограничение на погрешность хранения шкалы времени не более ± 1 нс за сутки при времени транспортирования 12 ч, при этом требования к стойкости к механическим воздействиям: широкополосная вибрация – 4 g, удар – 50 g.

Государственная метрология имеет особенность в отношении постановки и решения задач: опережающее развитие уровня потребностей промышленности, обороны, науки. Поэтому требования к параметрам и метрологическим характеристикам ВСЧВ будут расти. Особенно высокие требования к кратковременной нестабильности выходной частоты и спектральной плотности мощности фазовых шумов предъявляются при использовании ВСЧВ в качестве источника опорного сигнала для новейших атомных часов на основе ультрахолодных атомов, а также радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой. Применение ВСЧВ в качестве бортового синхронизирующего устройства на космическом радиотелескопе «РадиоАстрон» позволило создать интерферометр с базой длиной 350 тыс. км. Новый проект наземно-космического радиоинтерферометра «Миллиметрон» предназначен для работы на частотах в 2-3 раза более высоких (до 900 ГГц), что требует дальнейшего соответствующего повышения стабильности частоты опорного сигнала: до $5 \cdot 10^{-14}$ на интервале времени измерения 1 с и $5 \cdot 10^{-16}$ на интервале времени измерения 1000с.

В последние 3-5 лет ВСЧВ достигли высоких метрологических характеристик до уровня теоретического предела. Постоянно растущий спрос на оперативную и точную частотно-временную информацию потребителей из разных областей науки и техники требует проведения работ по повышению метрологических характеристик ВСЧВ. В рамках подпрограммы «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС» государственной программы РФ «Космическая деятельность России» для совершенствования комплекса воспроизведения, хранения единиц времени и частоты и передачи национальной шкалы времени UTC (SU) в интересах достижения заданных ТТХ системы ГЛОНАСС по формированию и поддержанию шкалы времени системы ГЛОНАСС предусмотрена разработка водородных стандартов частоты и времени с СКДО частоты не более $1,5 \cdot 10^{-16}$ на интервале времени измерения 1 сутки.

История развития водородных генераторов насчитывает более полувека. Первый квантовый водородный генератор (ВГ) был создан в 1960 г. в Гарвардском университете группой ученых под руководством Нормана Рэмси, тогда же были

разработаны теория и принципы работы ВГ, основные конструкторские решения. С этого времени работы по исследованию и созданию водородных генераторов начались во многих зарубежных и отечественных лабораториях.

Многолетняя работа по развитию теории работы ВГ, исследованию зависимости его частоты от различных факторов и параметров конструкции, систематическое конструктивное усовершенствование позволили к настоящему времени уменьшить нестабильность частоты ВСЧВ на четыре порядка – практически до теоретического предела, определяемого тепловыми шумами СВЧ резонатора и приемника. Нестабильность выходной частоты промышленно выпускаемых ВСЧВ представлена в Таблице 1.

Таблица 1. Нестабильность частоты ВСЧВ

Интервал времени измерения	Нестабильность частоты выходного сигнала (СКДО)			
	Время-Ч VCH-1003M Option L	НПО им. Фрунзе Ч1-95	Microchip МНМ 2020 LPN	T4Science imaser3000 ST
1 с	$8,0 \times 10^{-14}$	$1,5 \times 10^{-13}$	$8,0 \times 10^{-14}$	$8,0 \times 10^{-14}$
10 с	$1,4 \times 10^{-14}$	$2,5 \times 10^{-14}$	$1,5 \times 10^{-14}$	$1,8 \times 10^{-14}$
100 с	$4,0 \times 10^{-15}$	$5,5 \times 10^{-15}$	$4,0 \times 10^{-15}$	$4,0 \times 10^{-15}$
1000 с	$1,5 \times 10^{-15}$	-	$2,0 \times 10^{-15}$	$2,0 \times 10^{-15}$
3600 с	$1,5 \times 10^{-15}$	$1,5 \times 10^{-15}$	-	-
10000 с	-	-	$1,5 \times 10^{-15}$	$1,2 \times 10^{-15}$
1 сутки	$5,0 \times 10^{-16}$	$5,0 \times 10^{-16}$	$1,0 \times 10^{-15}$	-

Среднеквадратическое двухвыборочное отклонение (СКДО), определяемое тепловыми шумами резонатора и приемника, имеет следующий вид:

$$\sigma_y(\tau) = \sqrt{\frac{1}{Q^2 P} \frac{k_B T_p}{2\tau} + \frac{1}{4\pi^2 \nu^2} \frac{k_B T_n F B}{P \tau^2} \frac{1 + \beta}{\beta}} \quad (1)$$

где P – мощность, генерируемая атомами в резонаторе; k_B – постоянная Больцмана; T_p – температура резонатора в Кельвинах; τ – интервал времени измерения; Q, ν – добротность и частота атомной спектральной линии; F, B, T_n – шум-фактор, полоса

и температура приёмника соответственно; $\beta = P_n / (P - P_n)$ – коэффициент связи с приемником; P_n – мощность на входе приемника. Первый член суммы обусловлен тепловыми шумами резонатора, второй – шумами приемника. Как видно из (1), для уменьшения нестабильности частоты ВСЧВ на всех интервалах времени измерения необходимо увеличивать значение параметра $Q_n \sqrt{P}$. В Таблице 2 представлена зависимость типичных значений СКДО от величины интервала времени измерения для промышленно выпускаемых ВСЧВ VCH-1003M, а также значение теоретического предела, обусловленного тепловыми шумами резонатора и приемника.

Таблица 2. СКДО ВСЧВ VCH-1003M и предельно достижимое СКДО

Интервал времени измерения, τ	Типичные значения СКДО для ВСЧВ VCH-1003M	СКДО, обусловленное тепловыми шумами резонатора и приемника для ВСЧВ VCH-1003M
1 с	$6,5 \cdot 10^{-14}$	$5,2 \cdot 10^{-14}$
10 с	$1,1 \cdot 10^{-14}$	$1,05 \cdot 10^{-14}$
100 с	$3,1 \cdot 10^{-15}$	$3,0 \cdot 10^{-15}$
1 000 с	$1,1 \cdot 10^{-15}$	$9,6 \cdot 10^{-16}$
1 час	$8,5 \cdot 10^{-16}$	$5,0 \cdot 10^{-16}$
10 000 с	$7,0 \cdot 10^{-16}$	$3,0 \cdot 10^{-16}$
1 сутки	$2,7 \cdot 10^{-16}$	$1,0 \cdot 10^{-16}$

Из Таблицы 2 видно, что на интервалах времени измерения от 10 с до 3600 с достигнуты предельные характеристики ВСЧВ по СКДО, а требования к приборам по нестабильности частоты неуклонно растут. Таким образом, возникает **противоречие** между достигнутым уровнем СКДО ВСЧВ и требованиями к стабильности частоты опорных источников, связанных с развитием науки, промышленных и оборонных технологий, поэтому задача уменьшения нестабильности частоты ВСЧВ является актуальной и важной.

Одной из возможностей, позволяющей улучшить предельные характеристики ВСЧВ, является использование пучка атомов водорода в одном квантовом состоянии. Структура энергетических уровней сверхтонкого расщепления атома водорода во внешнем магнитном поле состоит из четырех равно населенных подуровней. Генерация происходит на частоте 1,4204 ГГц между подуровнями с $F=1, m_F=0$ и $F=0, m_F=0$. Пучок атомарного водорода вылетает из источника водорода и разделяется по траекториям в четырех- или шестиполюсном сортирующем магните. Атомы в состояниях $F=0, m_F=0$ и $F=1, m_F=-1$ удаляются из пучка, атомы в состояниях с $F=1, m_F=0$ и $F=1, m_F=1$ приблизительно в равных количествах направляются в накопительную колбу, находящуюся внутри СВЧ-резонатора. Атомы с $F=1, m_F=1$ не участвуют в образовании полезного сигнала, но через механизм спин-обменных взаимодействий уширяют спектральную линию и препятствуют увеличению мощности генерации при увеличении интенсивности пучка.

Использование пучка атомов в одном квантовом состоянии в ВГ впервые упоминается в работе Schermann J.P. в 1966 г. [1]. Для устранения нерабочих атомов была предложена система двойной сортировки (СДС) с двумя шестиполюсными магнитами и инвертирующей области между ними, в которой атомы в состоянии с $F=1, m_F=1$ переходят в состояние с $F=1, m_F=-1$ и затем отсортировываются вторым сортирующим магнитом. В дальнейшем исследованиях в этой области занимались также Audoin C. [1], Mattison E.M., Vessot R.F.C. [2, 3], Urabe S., Ohta Y., Saburi Y [4]. Результатам исследований и разработок конструкции системы магнитной сортировки посвящены труды Алейникова М.С., Бойко А.И., Елкина Г.А. [5, 6, 7]. На сегодняшний день известны два метода по созданию инвертирующей области: метод быстрого изменения направления магнитного поля и метод адиабатического быстрого прохождения. Проведенные экспериментальные исследования показали принципиальную работоспособность методов, согласно опубликованным оценкам, были получены пучки атомов водорода с содержанием рабочих атомов от 67% до 90%. Однако используемые установки конструктивно были совершенно не приспособлены для

применения в промышленных ВСЧВ, экспериментальных результатов по измерению нестабильности частоты ВСЧВ до сих пор не получено, также отсутствуют сведения о применении СДС в промышленно выпускаемых приборах.

Цель работы

Уменьшение нестабильности частоты ВСЧВ промышленного применения на интервале времени измерения до суток путем создания и использования пучка атомов в одном квантовом состоянии.

Объект исследований

Водородный генератор с системой двойной сортировки атомов по квантовым состояниям.

Предмет исследований

Методы и средства создания пучка атомов водорода в одном квантовом состоянии для ВГ с двойной сортировкой атомов по квантовым состояниям.

Основная научная задача

Уменьшение вклада тепловых шумов резонатора в нестабильность частоты ВГ.

Частные научные задачи

1. Произвести теоретическую оценку предельно возможного уменьшения нестабильности частоты при использовании двойной сортировки атомов.
2. Разработать конструкцию сортирующей системы, обеспечивающей эффективную фокусировку активных атомов и удаление из пучка нерабочих атомов.
3. Провести теоретическое и экспериментальное исследование методов перевода атомов из состояния с $F=1, m_F=1$ в $F=1, m_F=-1$. Выбрать наиболее подходящий метод.

4. Провести экспериментальные исследования мощности генерации, добротности спектральной линии и параметра $Q_L \sqrt{P}$ ВГ с двойной сортировкой атомов.

5. Провести экспериментальные исследования нестабильности частоты ВГ с двойной сортировкой атомов.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту

1. Для ВГ с двойной сортировкой атомов достижимо уменьшение нестабильности частоты, обусловленной тепловыми шумами резонатора, в 1,6 раза по сравнению с промышленно выпускаемыми ВГ.

2. Разработанная конструкция СДС с учетом ограничений, связанных с использованием в промышленных ВСЧВ, обеспечивает фокусировку максимального количества атомов водорода в накопительную колбу, при этом доля рабочих атомов в пучке достигает 96 %.

3. Метод адиабатического быстрого прохождения обеспечивает надежность и воспроизводимость результатов в обычных условиях эксплуатации промышленно выпускаемых ВГ.

4. Применение ВГ с системой двойной сортировки атомов позволяет увеличить параметр $Q_L \sqrt{P}$ промышленно выпускаемых ВГ в 1,5 раза.

5. Нестабильность частоты ВГ с системой двойной сортировки атомов на интервале времени измерения 1 сутки составляет $(1,3-1,5) \cdot 10^{-16}$.

Научная новизна

1. Впервые выполнена оценка возможного уменьшения нестабильности частоты ВГ, обусловленной тепловыми шумами резонатора, за счет использования двойной сортировки атомов по квантовым состояниям.

2. Впервые исследована и разработана конструкция системы двойной сортировки с учетом ограничений, связанных с использованием в промышленных стандартах частоты. Выполнено математическое моделирование траекторий движения атомов водорода в СДС для случая шестиполусных и четырехполусных

сортирующих магнитов. Произведен расчет относительного количества атомов водорода в состояниях с $F = 1, m_F = 0, \pm 1$, попадающих в накопительную колбу.

3. Впервые проведен расчет инвертирующих полей, разработана конструкция, проведено исследование и сравнение эффективности и сложности реализации двух конструкций инвертирующей области, реализующих методы быстрого изменения направления магнитного поля и адиабатического быстрого прохождения.

4. Впервые проведено экспериментальное исследование ВГ с СДС по методу адиабатического быстрого прохождения. Определены зависимости мощности генерации и добротности спектральной линии от различных параметров СДС: величины и градиента продольного магнитного поля, частоты и амплитуды переменного поперечного магнитного поля, интенсивности пучка атомов водорода.

5. Впервые исследовано влияние неустойчивости параметров инвертирующей области на выходную частоту ВГ.

6. Впервые проведено исследование метрологических характеристик ВГ с СДС по методу адиабатического быстрого прохождения. Определено СКДО выходного сигнала 5 МГц.

Практическая значимость

ВГ с двойной сортировкой атомов будут являться основой перспективных ВСЧВ для множества приложений: модернизация водородных хранителей; создание перевозимых и бортовых космических квантовых часов нового поколения; модернизация ВСЧВ, вырабатывающих опорный сигнал для фонтанов на основе охлажденных атомов цезия или рубидия. Результаты исследования были использованы при разработке генератора квантового водородного ЯКУР.411141.052, входящего в состав перспективного Стандарта частоты и времени водородного VCH-2021, что подтверждено актом внедрения, а оригинальность технического решения – патентом на изобретение № 2726851 от 05.03.2020 «Квантовый водородный генератор стандарта частоты».

Личный вклад автора

Все экспериментальные и теоретические результаты, представленные в настоящей работе, получены автором лично. Автору диссертации принадлежат результаты математического моделирования траекторий движения атомов водорода в системе двойной сортировки, результаты расчетов количества атомов в накопительной колбе в зависимости от параметров сортирующей системы, результаты теоретических исследований инвертирующей области по методам быстрого изменения направления магнитного поля и адиабатического быстрого прохождения. Автор разработал конструкцию СДС, проводил экспериментальные исследования мощности генерации и добротности спектральной линии, экспериментальные исследования нестабильности частоты, исследовал влияние параметров СДС на выходную частоту ВГ, разработал модуль управления СДС.

Степень достоверности и апробация работы

Результаты теоретических исследований и математического моделирования подтверждены результатами проведенных экспериментальных исследований. Экспериментальные данные были получены с помощью калиброванного и поверенного оборудования ЗАО «Время-Ч». Полученные результаты

опубликованы в следующих журналах и сборниках трудов: «Измерительная техника», «Метрология времени и пространства», «Труды института прикладной астрономии РАН», «Вестник метролога». Материалы диссертации докладывались на Европейском время-частотном форуме и Международном симпозиуме по контролю частоты (EFTF-IFCS 2021), Международном симпозиуме «Метрология времени и пространства» (2012 г., 2014г., 2016 г., 2018 г.), Всероссийской конференции «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (2019 г.). Результаты диссертационного исследования отражены в 13 публикациях, в том числе 4 – в журналах, входящих в базы данных Web of Science и Scopus, и рекомендованных ВАК, получен 1 патент на изобретение, получен акт внедрения результатов диссертации.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитируемой литературы из 83 наименований. Общий объем диссертации составляет 135 страниц, включая список цитированной литературы. Диссертация содержит 47 рисунков и 20 таблиц.

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, указаны цели и задачи исследования, сформулированы выносимые на защиту основные положения, обозначена практическая значимость и личный вклад автора, обсуждается возможность улучшения предельных метрологических характеристик ВСЧВ за счет использования пучка атомов в одном квантовом состоянии.

В **Главе 1** изложены физические принципы работы и краткая теория ВГ, дается описание основных элементов конструкции. Далее приведен краткий обзор работ, посвященных исследованию ВГ с двойной сортировкой атомов, и оценка возможного уменьшения нестабильности частоты по сравнению с промышленными ВГ.

В 1960 г. в США в Гарвардском университете группой ученых под руководством Нормана Рэмси был создан первый квантовый водородный генератор. Исследованию и разработке квантовых водородных стандартов частоты

посвящены труды Демидова Н. А., Сахарова Б. А., Беляева А. А., Ежова Е. М., Тимофеева Ю. В., Логачева В. А., Ульянова А. А., Фатеева Б. П., Гайгерова Б. А., Ёлкина Г. А., Бойко А. И., Алейникова М.С. и др. За рубежом данным вопросом занимались N. Ramsey, D. Kleppner, H. Goldenberg, S.B. Crampton, C. Audoin, J.P. Schermann, E. Mattison, R. Vessot, и др. Теория водородного мазера впервые была описана в работах N. Ramsey, где были определены частоты и амплитуды колебаний, условия самовозбуждения, зависимость мощности генерации и добротности спектральной линии от интенсивности пучка атомов водорода.

Предельно возможная нестабильность частоты ВГ, обусловленная тепловыми шумами СВЧ резонатора, определяется следующим выражением:

$$\sigma_p(\tau) = \frac{1}{Q_l \sqrt{P}} \sqrt{\frac{k_B T_p}{2\tau}} \quad (2)$$

где k – постоянная Больцмана; T_p – температура резонатора в Кельвинах; τ – интервал времени измерения. Влияние шумов СВЧ резонатора будет преобладающим, начиная $\tau \approx 10$ с. На меньших интервалах времени измерения преобладает шум приемной аппаратуры, вносимая им нестабильность частоты определяется следующим образом:

$$\sigma_{np}(\tau) = \frac{1}{2\pi\nu} \sqrt{\frac{k_B T_n F B (1 + \beta)}{P \tau^2 \beta}} \quad (3)$$

где F , B , T_{np} – шум-фактор, полоса и температура приемника соответственно, β – коэффициент связи с приемником.

Из выражения (2) следует, что для уменьшения вносимой тепловыми шумами резонатора нестабильности частоты необходимо увеличивать значение параметра $Q_l \sqrt{P}$. За более чем полувековую историю своего развития в результате экспериментальных и теоретических исследований по выявлению и устранению причин, влияющих на частоту и нестабильность ВГ, нестабильность частоты ВСЧВ уменьшилась почти в 1000 раз с единиц 10^{-13} до 10^{-16} и достигла практически предела, определяемого тепловыми шумами резонатора. Одной из возможностей, позволяющей теоретически еще несколько отодвинуть этот предел, является

получение и использование в ВГ системы двойной сортировки атомов по квантовым состояниям, до сих пор не реализованная на промышленно выпускаемых ВСЧВ (Рис. 1).

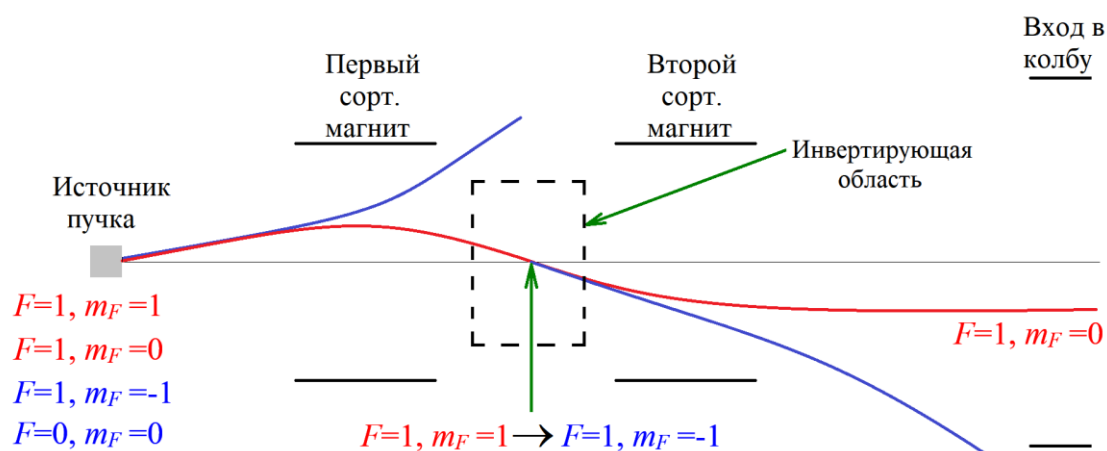


Рис. 1. Схема получения пучка атомов в одном квантовом состоянии

Согласно схеме двойной сортировки пучок атомов водорода выходит из коллиматора и последовательно проходит два сортирующих магнита. Атомы водорода в состояниях с $F = 1, m_F = 0$ и $F = 1, m_F = 1$ сфокусированные первым сортирующим магнитом, проходят область перехода Майорана. В этой области совершается переход атомов из состояния с $F = 1, m_F = 1$ в состояние $F = 1, m_F = -1$ и их сортировка вторым сортирующим магнитом. Таким образом, в колбу попадают только активные атомы в состоянии $F = 1, m_F = 0$.

В работе J.P. Schermann и С. Audoin в 1966 г. впервые упоминается о применении двойной сортировки атомов, разработан метод для расчета оптимальных размеров конструкции, описан метод для измерения населенностей магнитных подуровней в накопительной колбе, приведены экспериментальные результаты по измерению населённости. Система двойной сортировки включала в себя источник атомного пучка, два шестиполюсных магнита, разделенных инвертирующей областью по методу адиабатического быстрого прохождения, вход в накопительную колбу. R.F.C. Vessot в 1969 использовал во многом схожую конструкцию. Основным недостатком являлось то, что в результате установки собранной системы в ВГ происходило ухудшение параметра качества, также

практическое применение описанной системы в современных приборах затруднительно, поскольку ее длина составляет около 1,2 м.

В работе S. Urabe и др. в 1980 г. впервые описана конструкция инвертирующей области по методу быстрого изменения направления поля. В работах Алейникова М.С. и Бойко А.И. с 2013 по 2017 гг. опубликованы результаты экспериментов с ВГ подобной конструкции. В этом методе атомы пролетали ограниченную область пространства с очень быстрым изменением направления слабого магнитного поля, где величина магнитного поля должна быть много меньше 20 мГс, а величина остаточного магнитного поля – много меньше 200 мкГс. Это трудно реализуемо на практике, поскольку проникновение даже слабых внешних неконтролируемых магнитных полей нарушает работу устройства. К таким полям можно отнести в первую очередь поля рассеяния сортирующих магнитов, а в случае миниатюризации системы для применения в промышленном ВГ расстояние от сортирующих магнитов до области инверсии значительно сокращается, что делает метод быстрого изменения направления поля непригодным для использования в ВСЧВ.

Была проведена оценка возможного уменьшения нестабильности частоты ВСЧВ за счет применения ВГ с двойной сортировкой атомов по квантовым состояниям. В результате было показано, что за счет применения пучка атомов в одном квантовом состоянии возможно увеличить значение параметра в 1,6 раза по сравнению с промышленно выпускаемыми ВГ.

В **Главе 2** приведены результаты расчета количества атомов водорода в различных состояниях, попадающих в накопительную колбу, в зависимости от параметров сортирующих магнитов и их взаимного расположения.

Для вычисления соотношения попадающих в накопительную колбу атомов в состояниях с $F=1, m_F=0$, $F=1, m_F=+1$ и $F=1, m_F=-1$, рассчитывались траектории полёта атомов через два сортирующих магнита с учетом максвелловского распределения атомов в пучке по скоростям, углам их вылета из источника и смены знака магнитного квантового числа $m_F=\pm 1$ на противоположный в пространстве между магнитами. При этом учитывали следующие ограничения: длина

сортирующей системы не более 340 мм (расстояние от источника атомов водорода до входа в накопительную колбу); максимальная индукция магнитного поля сортирующих магнитов 1,0 Тл. При этом расстояние от второго сортирующего магнита до входа в накопительную колбу определяется конструкцией ВГ и составляет 140 мм, таким образом, ограничение на сумму длин сортирующим магнитов и расстояния между ними составляет 200 мм.

Расчёты выполняли при различных значениях следующих параметров сортирующей системы: количество полюсов магнитов, длины сортирующих магнитов; радиуса межполюсного зазора; расстояния между магнитами; расстояния от коллиматора до первого магнита; радиуса входа в накопительную колбу. Наилучшей конфигурацией являлась система, в которой в колбу попадает наибольшее количество атомов с $F=1$, $m_F=0$ и отношение количества атомов с $F=1$, $m_F=\pm 1$ к количеству атомов с $F=1$, $m_F=0$ не более 10%.

В результате были найдены оптимальные параметры для СДС, состоящей из четырехполюсных магнитов: расстояние от источника до первого сортирующего магнита 10 мм, длина и радиус межполюсного зазора первого сортирующего магнита 50 мм и 0,85 мм соответственно, расстояние между магнитами 65 мм, длина и радиус межполюсного зазора второго сортирующего магнита 70 мм и 1,2 мм соответственно, радиус входного отверстия накопительной колбы 2,7 мм. В этом случае удается минимизировать потери рабочих атомов на уровне 6 % по сравнению с классической системой сортировки, при этом доля рабочих атомов в пучке достигает 96 %. При использовании шестиполюсных магнитов потери рабочих атомов в 1,9 раза больше по сравнению с системой из четырехполюсных магнитов тех же размеров. Основной причиной этого является применение мишени радиусом 0,2 мм из-за плохого качества сортировки в центральной области магнита. Внедрение шестиполюсной системы не рационально из-за меньшей эффективности использования пучка атомов водорода.

В **Главе 3** вводятся понятия адиабатических и неадиабатических переходов, обсуждаются два наиболее известных метода перевода атомов из состояния с $F=1$, $m_F = +1$ в состояние с $F=1$, $m_F = -1$. Для каждого метода

приведены основные физические принципы, результаты моделирования и разработки конструкции.

В настоящее время наиболее эффективны два метода перевода атомов водорода из состояния с $F=1, m_F=+1$ в состояние с $F=1, m_F=-1$: метод быстрого изменения направления магнитного поля и метод адиабатического быстрого прохождения. Суть обоих методов заключается в создании области, где возникают неадиабатические майорановские переходы. В результате при прохождении этой области происходит перераспределение населённости магнитных подуровней сверхтонкой структуры атомов. Вероятность квантового перехода в общем виде при заданной конфигурации внешнего магнитного поля необходимо рассчитывать в соответствии с формулами Майорана. Однако для некоторых частных случаев можно применять полуклассический подход для описания взаимодействия магнитного момента атома с внешним магнитным полем.

Метод быстрого изменения направления магнитного поля. Суть метода заключается в создании области быстрого изменения направления внешнего магнитного поля на противоположное с помощью антигельмгольцевских катушек. Оси катушек совпадают с осью пучка атомов водорода, а магнитные поля, создаваемые катушками, направлены навстречу друг другу. Магнитный момент атома, например сонаправленный вектору внешнего магнитного поля в начале взаимодействия, после прохождения области нулевого поля должен сохранить свою ориентацию в пространстве и стать противоположно направленным вектору внешнего магнитного поля в конце взаимодействия, т. е. атомы из состояния $m_F=+1$ должны перейти в состояние $m_F=-1$. Атомы в состоянии $F=1, m_F=0$ не должны изменять данное квантовое состояние, поскольку проекция магнитного момента на направление внешнего магнитного поля в результате взаимодействия не изменяется. Для вычисления вероятности перехода между магнитными подуровнями рассматривается поведение классического магнитного момента при взаимодействии с полем антигельмгольцевских катушек в течении заданного промежутка времени. В результате математического моделирования была

рассчитана сила тока в катушках, их геометрические параметры и взаимное расположение.

Метод адиабатического быстрого прохождения. В этом методе переход атомов водорода из состояния $m_F = +1$ в состояние $m_F = -1$ происходит при взаимодействии с суперпозицией магнитных полей. Суперпозиция образована перпендикулярным оси пучка переменным магнитным полем и изменяющимся по величине вдоль оси пучка продольным магнитным полем. Для создания такой конфигурации магнитных полей в области между сортирующими магнитами устанавливается соленоид переменного радиуса, создающий медленно меняющееся вдоль оси пучка магнитное поле H . По центру соленоида в области длиной около 10 мм располагаются катушки, которые могут создавать переменное магнитное поле, резонансное частоте зеемановских переходов (порядка единиц мегагерц), поперечное оси пучка.

Для изменения ориентации магнитного момента относительно направления внешнего медленно меняющегося магнитного поля используется явление магнитного резонанса. Во взаимно-перпендикулярных постоянном H и переменном $H_1 \cdot \sin(\omega t)$ магнитных полях магнитный момент прецессирует вокруг вектора эффективного магнитного поля $H_{\text{эфф}}$, определяемого их векторной суммой. При влёте атомов в область взаимодействия с переменным полем напряжённость продольного магнитного поля больше резонансного значения (Рис. 2, случай А). В центре этой области выполняется условие резонанса (Рис. 2, случай В), при этом $H_{\text{эфф}}$ равно H_1 и перпендикулярно H . При вылете из области взаимодействия напряжённость продольного магнитного поля становится меньше резонансного значения (Рис. 2, случай С), и $H_{\text{эфф}}$ противоположно направлено H .

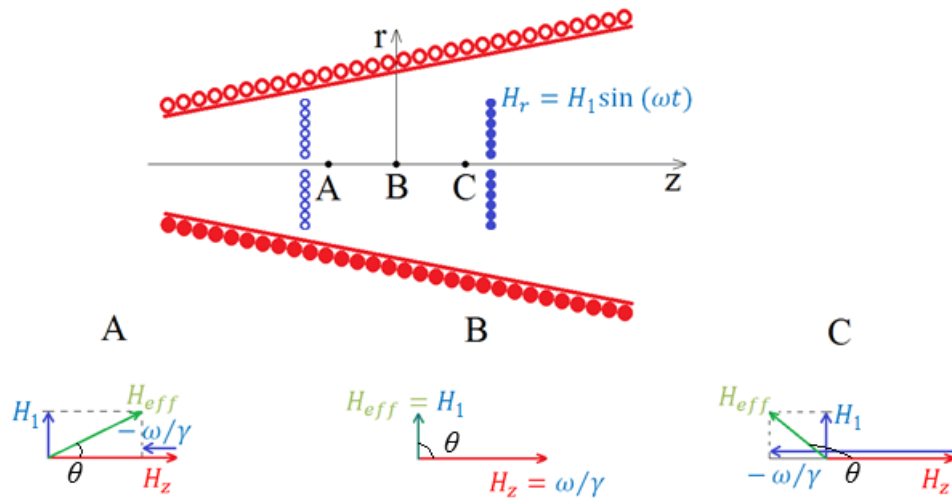


Рис. 2. Схема расположения катушек и соленоида, поворот вектора эффективного магнитного поля в методе адиабатического быстрого прохождения: А – при влете в область взаимодействия ($H_{eff} \neq H_1$),
 В – в центре области взаимодействия ($H_{eff} = H_1$), С – при вылете из области взаимодействия ($H_{eff} \neq H_1$)

Для корректной реализации метода необходимо соблюдение условий для H и H_1 , которые схематически приведены на Рис. 3.

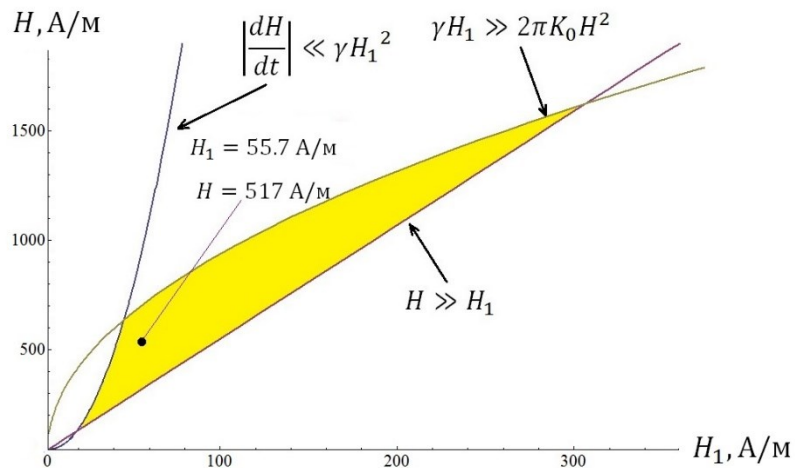


Рис. 3. Схематическое изображение ограничений на напряженности магнитного поля H и H_1 в методе адиабатического быстрого прохождения

Решение неравенств было выполнено с помощью численных методов для заданного времени взаимодействия и скорости атомов, на основании рассчитанных значений с помощью математического моделирования были определены геометрические размеры соленоида и катушек, разработана конструкция инвертирующей области.

В результате теоретических исследований Главы 3 были рассмотрены два метода, позволяющих обеспечить совершение квантового перехода между подуровнями сверхтонкой структуры с $F=1$. В каждом случае приведены основные физические принципы, сформулированы условия для корректной работы метода, проведено моделирование и необходимые конструктивные расчеты.

В Главе 4 описаны методы оценки эффективности формирования пучка атомов в одном квантовом состоянии. В результате обработки экспериментальных данных ВГ с двойной сортировкой атомов возможно исследовать атомный состав в накопительной колбе, т.е. вычислить параметр сортировки α . В первом методе изменение величины параметра α определяется по изменению параметра качества q , который в свою очередь рассчитывается по экспериментальным данным зависимости мощности генерации от добротности спектральной линии при включении и выключении системы двойной сортировки. Вторым методом, позволяющим вычислить параметр α , является вычисление населенностей магнитных подуровней атомов с $F=1$, основанное на эффекте Ауслера-Таунса. Третий метод по величине сдвига выходной частоты из-за неоднородности магнитного поля дает возможность экспериментально вычислить разность населенностей между магнитными подуровнями $F=1$ $m_F=\pm 1$, по величине которой можно судить об эффективности отсеивания нерабочих атомов.

Для каждого метода определены преимуществами и недостатками. Наиболее информативный метод – метод, основанный на эффекте Ауслера-Таунса, позволяющий вычислить населенности трех магнитных подуровней с $F=1$ $m_F=0, \pm 1$. Однако этот метод имеет наиболее серьезные ограничения по применению и является наиболее трудоемким.

В Главе 5 описывается разработанная конструкция СДС согласно результатам теоретических исследований. Приведены экспериментальные результаты по измерению мощности генерации, добротности спектральной линии и параметра $Q_L \sqrt{P}$, проведено сравнение этих величин с расчетными и достигаемыми на промышленно выпускаемых ВГ. Описана упрощенная схема модуля управления СДС, исследовано влияние параметров СДС на выходную частоту ВГ, определены требования по уровню стабилизации выходных характеристик модуля управления. Представлены результаты экспериментальных исследований неустойчивости частоты ВГ с СДС по сравнению с серийно выпускаемыми ВСЧВ.

Для проведения экспериментальных исследований были выпущена опытная партия ВГ с СДС: ВГ-1, ВГ-2, ВГ-3 с инвертирующей областью по методу адиабатически быстрого прохождения и ВГ-4 с инвертирующей областью по методу быстрого изменения направления магнитного поля. При отсутствии квантового перехода в инвертирующей области достигаются значения параметра $Q_L \sqrt{P}$ не хуже, чем на ВГ с классической системой сортировки атомов. Далее был проведен подбор параметров инвертирующей области и проведены измерения мощности генерации, добротности спектральной линии и параметра $Q_L \sqrt{P}$ в присутствии квантового перехода в инвертирующей области. Экспериментальные результаты по увеличению максимального значения $Q_L \sqrt{P}$, достигаемого за счёт использования пучка атомов в одном квантовом состоянии, представлены в Таблице 2.

Таблица 2. Отношение максимальных значений $Q_L \sqrt{P}$ с включённой и выключенной инвертирующей областью

	ВГ-1	ВГ-2	ВГ-3	ВГ-4
$\frac{(Q_L \sqrt{P})_{\max} - \text{вкл}}{(Q_L \sqrt{P})_{\max} - \text{выкл}}$	1,512±0,004	1,488±0,005	1,533±0,008	1,202±0,004

Увеличение параметра $Q_n\sqrt{P}$ за счет двойной сортировки атомов с инвертирующей областью по методу быстрого изменения направления магнитного поля составляет приблизительно 1,2 раза. Незначительное увеличение параметра $Q_n\sqrt{P}$ обусловлено сложностями при практической реализации этого метода: создании и экранировании области нулевого продольного магнитного поля, поскольку проникновение даже слабых внешних магнитных полей нарушает работу устройства. К таким полям можно отнести поля рассеяния сортирующих магнитов, остаточную намагниченность магнитных экранов, неполную симметрию полей катушек. Из-за ограничения на размер инвертирующей области, полученного в результате теоретических исследований Главы 2, расстояние от сортирующих магнитов до плоскости нулевого магнитного поля было всего около 30 мм. Несмотря на установку системы катушек в трёхслойный магнитный экран, не удалось добиться эффективной работы метода. При некотором увеличении мощности генерации ВГ добротность линии практически не увеличивалась, что свидетельствует о внешних неконтролируемых магнитных полях в нулевой области. При этом мощность генерации была чувствительна к изменению внешнего магнитного поля, в результате чего отсутствовала воспроизводимость результатов. Авторы Алейникова М.С. и Бойко А.И. [6] дополнительно установили систему катушек, создающих поперечные взаимно-перпендикулярные поля в нулевой плоскости. При этом использовали шестиполюсные сортирующие магниты, имеющие меньшие чем у четырёхполюсных поля рассеяния, затем подобрали величину и направление тока в каждой катушке и получили пучок атомов водорода с долей активных атомов до 75 %. Однако такая система также чувствительна к изменениям внешних полей и требует постоянной регулировки величины токов в компенсирующих катушках. Поэтому, несмотря на кажущуюся простоту метода и устройства для его реализации, не удалось получить положительные результаты.

Увеличение параметра $Q_n\sqrt{P}$ за счет двойной сортировки атомов с инвертирующей областью по методу адиабатического быстрого прохождения составляет приблизительно 1,5 раза. При этом полученный результат хорошо и

устойчиво воспроизводится в обычных условиях эксплуатации и сохраняется неограниченно долго. Это связано с гораздо меньшей чувствительностью инвертирующей области к внешним магнитным полям, обеспечивая тем самым устойчиво высокую вероятность неадиабатического перехода. Таким образом, экспериментально доказано что на ВГ с СДС по методу адиабатического быстрого прохождения получено стабильно высокое значение параметра $Q_n \sqrt{P}$, что важно при использовании в промышленно выпускаемых ВГ. На разработанную конструкцию инвертирующей области получен патент на изобретение.

Для сравнения метрологических характеристик ВСЧВ с СДС с серийно-выпускаемыми ВСЧВ проведено измерение нестабильности частоты ВСЧВ с СДС с помощью компаратора фазового многоканального Ч7-315 с полосой пропускания 3 Гц при использовании кросскорреляционной обработки. Сравнение проведено с ВСЧВ Ч1-1003М и Ч1-1035. Результаты измерений представлены на Рис. 4 и Таблице 3.

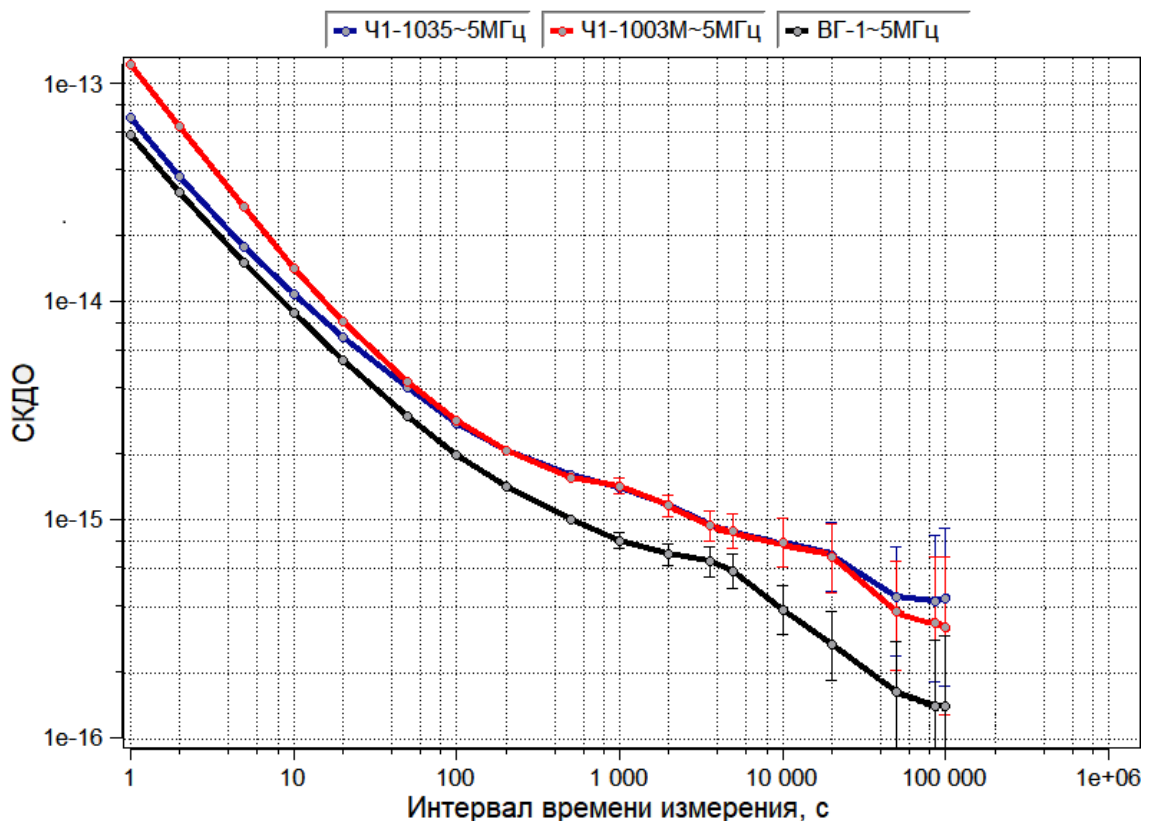


Рис. 4. Зависимость нестабильности частоты ВСЧВ с СДС от интервала времени измерения по сравнению нестабильностью серийно-выпускаемых ВСЧВ Ч1-1003М и Ч1-1035

Таблица 3. Нестабильность частоты ВСЧВ с СДС от интервала времени измерения после кросскорреляционной обработки по сравнению нестабильностью серийно-выпускаемых ВСЧВ Ч1-1003М и Ч1-1035.

Интервал времени измерения, τ	ВГ-1	Ч1-1003М	Ч1-1035
1 с	$5,8 \cdot 10^{-14}$	$1,3 \cdot 10^{-13}$	$7,0 \cdot 10^{-14}$
10 с	$9,0 \cdot 10^{-15}$	$1,4 \cdot 10^{-14}$	$1,1 \cdot 10^{-14}$
100 с	$2,0 \cdot 10^{-15}$	$2,9 \cdot 10^{-15}$	$2,8 \cdot 10^{-15}$
1000 с	$8,1 \cdot 10^{-16}$	$1,4 \cdot 10^{-15}$	$1,4 \cdot 10^{-15}$
1 час	$6,5 \cdot 10^{-16}$	$9,5 \cdot 10^{-16}$	$9,3 \cdot 10^{-16}$
10 000 с	$3,9 \cdot 10^{-16}$	$8,0 \cdot 10^{-16}$	$7,9 \cdot 10^{-16}$
1 сутки	$1,3 \cdot 10^{-16}$	$3,4 \cdot 10^{-16}$	$4,1 \cdot 10^{-16}$

Согласно экспериментальным результатам по установлению метрологических характеристик ВСЧВ с СДС, за счет использования пучка атомов в одном квантовом состоянии удалось экспериментально уменьшить нестабильность частоты, обусловленную тепловыми шумами резонатора, до $2 \cdot 10^{-14} \cdot \tau^{-1/2}$, что в 1,4-1,5 раза меньше, чем у серийно-выпускаемых ВСЧВ Ч1-1003М и Ч1-1035. СКДО на интервале времени измерения 1 сутки при этом составило $(1,3-1,5) \cdot 10^{-16}$.

Экспериментально показано, что использование катушки инверсии, выравнивающей населенности магнитных подуровней с $F=1 m_F=1$ и $F=1 m_F=-1$, позволяет приблизительно в 3,5 раза ослабить требования по стабилизации параметров СДС, что необходимо учитывать при разработке конструкции ВГ и модуля управления СДС.

В **заключении** приводятся основные научные результаты диссертации и выводы о проделанной работе.

Основные результаты и выводы

В диссертационной работе была поставлена и решена актуальная научно-техническая задача об уменьшении нестабильности частоты ВСЧВ.

1. Показано, что применение ВГ с системой двойной сортировки атомов позволит теоретически уменьшить нестабильность частоты, обусловленную тепловыми шумами, в 1,6 раза по сравнению с промышленно выпускаемыми ВСЧВ.

2. Исследована и разработана конструкция СДС с учетом ограничений, связанных с использованием в промышленных ВСЧВ. Выполнено математическое моделирование траекторий движения атомов в СДС и определены оптимальные параметры, при которых поток атомов водорода, попадающих в накопительную колбу, максимален, а доля рабочих атомов в пучке достигает 96 %.

3. Проведено исследование и разработка конструкций, реализующих методы быстрого изменения направления магнитного поля и адиабатического быстрого прохождения. Для метода адиабатического быстрого прохождения доказана надежность и воспроизводимость результатов, что обеспечивает пригодность для использования в промышленно выпускаемых ВСЧВ.

4. Разработаны методы оценки эффективности формирования пучка атомов в одном квантовом состоянии.

5. Для ВГ с системой двойной сортировки атомов по квантовым состояниям экспериментально получено увеличение параметра $Q_n \sqrt{P}$ в 1,5 раза по сравнению с промышленно выпускаемыми ВГ.

6. Экспериментально достигнута нестабильность частоты, обусловленная тепловыми шумами резонатора, на уровне $\sigma(\tau) \leq 2 \cdot 10^{-14} (\tau)^{-1/2}$, что 1,5 раза ниже, чем у промышленных ВСЧВ Ч1–1003М и Ч1–1035. СКДО на интервале времени измерения 1 сутки при этом составило $(1,3-1,5) \cdot 10^{-16}$.

7. Экспериментально определены требования по стабилизации параметров двойной сортировки атомов, предложена схема для практической реализации модуля управления СДС.

8. Результаты диссертационной работы использованы при разработке генератора квантового водородного ЯКУР.411141.052, входящего в состав перспективного стандарта частоты и времени водородного VCH-2021, получен акт внедрения.

Список публикаций по теме диссертации

Материалы конференций:

1. В.А. Поляков, А.А. Беляев, Н.А. Демидов, Ю.В. Тимофеев. Математическое моделирование системы сортировки пучка атомов водорода с целью повышения кратковременной стабильности частоты водородного генератора // Метрология времени и пространства: Материалы симпозиума, Менделеево, ВНИИФТРИ, 17–19 сентября, 2012, С. 354–355.
2. В.А. Поляков, Н.А. Демидов, Ю.В. Тимофеев, А.В. Урутин. Водородный стандарт частоты с двойной сортировкой атомов водорода по энергетическим состояниям // Метрология времени и пространства: Материалы симпозиума. Менделеево, ВНИИФТРИ, 17–19 сентября, 2014, С. 100–102.
3. В.Г. Воронцов, А.А. Беляев, Н.А. Демидов, В.А. Поляков, Б.А. Сахаров, М.Л. Гладильщиков. Разработка активного водородного стандарта частоты и времени нового поколения для базового комплекса времени и частоты // Метрология времени и пространства: Материалы симпозиума. Менделеево, ВНИИФТРИ, 14–16 сентября, 2016, С. 55–57.
4. В.Г. Воронцов, А.А. Беляев, Н.А. Демидов, В.А. Поляков, Б.А. Сахаров. Перевозимые квантовые часы нового поколения на основе активного водородного стандарта частоты и времени, // Метрология времени и пространства: Материалы симпозиума. Менделеево, ВНИИФТРИ, 12–14 сентября, 2018, С. 262.
5. В.Г. Воронцов, А.А. Беляев, Н.А. Демидов, В.А. Поляков, Б.А. Сахаров. Основные области применения и перспективы развития активных водородных стандартов частоты, // Метрология времени и пространства: Материалы симпозиума. Менделеево, ВНИИФТРИ, 12–14 сентября, 2018, С. 258-259.

6. В.А. Поляков, А.А. Беляев, В.Г. Воронцов, Н.А. Демидов, Б.А. Сахаров, Ю.В. Тимофеев. Активный водородный стандарт частоты с двойной сортировкой атомов по квантовым состояниям, // Метрология времени и пространства: Материалы симпозиума. Менделеево, ВНИИФТРИ, 12–14 сентября, 2018, С. 55-56.

7. В.А. Поляков, А.А. Беляев, В.Г. Воронцов, Н.А. Демидов, Б.А. Сахаров, Ю.В. Тимофеев. Активный водородный стандарт частоты с двойной сортировкой атомов по квантовым состояниям, КВНО-2019, 15-19 апреля 2019, программа конференции.

8. Polyakov V., Timofeev Y., Demidov N. Frequency Stability Improvement of an Active Hydrogen Maser with a Single-State Selection System, *EFTF-IFCS 2021 conference program*, p. 38.

Публикации в журналах, входящих в базы данных Web of Science и Scopus, и рекомендованных ВАК:

1. А.А. Беляев, Н.А. Демидов, В.А. Поляков, Ю.В. Тимофеев, «Оценка возможного уменьшения нестабильности частоты водородного генератора при использовании пучка атомов в одном квантовом состоянии», *Измерительная техника*, вып. 8, сс. 28-31, 2018. Версия: Belyaev, A.A., Demidov, N.A., Polyakov, V.A. *et al.* Estimation of the Possible Reduction of the Limit Frequency Instability of a Hydrogen Generator Using an Atom Beam in One Quantum State. *Meas Tech* **61**, 779–783 (2018). <https://doi.org/10.1007/s11018-018-1501-7>.

2. В.А. Поляков, А.А. Беляев, Н.А. Демидов, Ю.В. Тимофеев, «Система двойной сортировки атомов по квантовым состояниям для промышленного водородного стандарта частоты», *Измерительная техника*, вып. 8, сс. 31-36, 2018. Версия: Polyakov, V.A., Belyaev, A.A., Demidov, N.A. *et al.* System for Double Sorting of Atoms by Quantum State for a Commercial Hydrogen Frequency Standard. *Meas Tech* **61**, 784–790 (2018). <https://doi.org/10.1007/s11018-018-1502-6>.

3. Ю.В. Тимофеев, В.А. Поляков, А.А. Беляев, Н.А. Демидов, «Результаты экспериментальных исследований водородного генератора с двойной сортировкой атомов по квантовым состояниям», *Измерительная техника*, вып. 8, сс. 40-43, 2018.

Версия: Timofeev, Y.V., Polyakov, V.A., Belyaev, A.A. *et al.* Results of Experimental Studies of a Hydrogen Generator with Double Selection of Atoms by Quantum State. *Meas Tech* **61**, 797–801 (2018). <https://doi.org/10.1007/s11018-018-1504-4>.

4. Н.А. Демидов, А.А. Беляев, В.А. Поляков, Ю.В. Тимофеев, «Бортовой водородный стандарт частоты для космической обсерватории Миллиметрон», Измерительная техника, вып. 8, сс. 36-40, 2018. Версия: Demidov, N.A., Belyaev, A.A., Polyakov, V.A. *et al.* Onboard Hydrogen Frequency Standard for the Millimetron Space Observatory. *Meas Tech* **61**, 791–796 (2018). <https://doi.org/10.1007/s11018-018-1503-5>.

Публикации в других журналах:

1. Н.А. Демидов, В.А. Поляков, Ю.В. Тимофеев, А.В. Урутин. Водородный стандарт частоты для космической обсерватории «Миллиметрон». Труды института прикладной астрономии РАН, выпуск 27, Санкт-Петербург, 2013 г. С. 178-183.

2. А.А. Беляев, В.Г. Воронцов, Н.А. Демидов, Б.А. Сахаров, В.А. Поляков. Исследование метрологических характеристик активных водородных стандартов частоты и времени, «Вестник метролога» №3, 2018, с.8-11.

Патент на изобретение:

1. Беляев А.А., Демидов Н.А., Поляков В.А., Тимофеев Ю.В. «Квантовый водородный генератор стандарта частоты», патент на изобретение № 2726851 от 05.03.2020.

Список литературы

1. Audoin C., Desaintfuscien M., Petit P., Schermann J.-P., "Design of a double focalization in a hydrogen maser", *IEEE Trans. Instrum. Mass.*, IM-17, 1968, pp. 351-353.
2. Lacey R. F., Vessot R. F. C., "Improved state selection for hydrogen masers", *Proc. 23rd Freq. Control Symp.*, 1969, pp. 279-283.
3. Mattison E. M., Vessot R.F.C., "Single State Selection System for Hydrogen Masers," *Proceedings of the 19th Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting*, 1987, pp. 107-112.
4. Urabe S, Nakagiri K, Ohta Y, Kobayashi M, Saburi Y., "Majorana effect on atomic frequency standards", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, IM-29, 1980, pp. 304-310.
5. A.I. Boyko, M.S. Aleynikov. "Active H-maser with increased power of the output signal", *Proceedings EFTF 2013 Prague*, 2013, pp. 245-248.
6. Aleynikov M. S., Boyko A. I. "On the single-state selection for H-maser and its signal application for fountain atomic standard", *Proceedings EFTF 2014 Neuchatel*, 2014, pp. 169-172.
7. Aleynikov M. S. "Majorana atomic transition research in H-maser's magnetic state selection region", *Proceedings IFCS-EFTF 2015 Denver*, 2015, pp. 480-482.