

**МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО
РАЗВИТИЯ, СВЯЗИ И МАССОВЫХ
КОММУНИКАЦИЙ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Ордена Трудового Красного Знамени
федеральное государственное
бюджетное образовательное
учреждение высшего образования

**«МОСКОВСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ СВЯЗИ И
ИНФОРМАТИКИ»
(МТУСИ)**



**MINISTRY OF DIGITAL
DEVELOPMENT,
COMMUNICATIONS
AND MASS MEDIA OF
THE RUSSIAN FEDERATION**

**MOSCOW TECHNICAL
UNIVERSITY
OF COMMUNICATIONS
AND INFORMATICS
(MTUCI)**

ул. Авиамоторная, д. 8а, Москва, 111024,
www.mtuci.ru; мтуси.рф; e-mail: kanc@mtuci.ru
Телефон (495) 957-77-31; факс (495) 957-77-36

ОГРН 1027700117191; ИНН/КПП 7722000820/772201001; ОКПО 01179952;
ОКВЭД 85.22, 46.19, 58.19, 61.10, 68.32, 72.19, 85.21, 85.23, 85.42.9, 71.20, 33.13, 26.60 ; ОКТМО 45388000

29.10. 2021 № 2650/02-16
На № 01-14/8014 от 23.09.2021

Ученому секретарю
диссертационного совета Д 308.005.01

Балаханову М.В.

ФГУП «ВНИИФТРИ», г.п. Менделеево
141570, Солнечногорский район
Московская область

Уважаемый Михаил Валентинович!

Направляем в адрес диссертационного совета Д 308.005.01 отзыв официального оппонента Рыжкова А.В., главного научного сотрудника НИО «НОМИК» НИЧ МТУСИ, доктора технических наук, профессора, на диссертационную работу Полякова В.А. «Исследование и разработка водородного генератора с двойной сортировкой атомов для уменьшения нестабильности частоты».

Приложение:

1. Отзыв на диссертационную работу, 8 л., 2 экз.

Начальник НИЧ

Ю.В. Белявский

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Полякова Виктора Александровича по теме «Исследование и разработка водородного генератора с двойной сортировкой атомов для уменьшения нестабильности частоты», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.15 – «Метрология и метрологическое обеспечение».

Актуальность научно-технической задачи

Рецензируемая диссертационная работа посвящена теоретическим и экспериментальным исследованиям по разработке водородного стандарта частоты и времени (ВСЧВ) с улучшенными характеристиками по нестабильности выходной частоты.

Существующие ВСЧВ достигли высоких метрологических характеристик практически до уровня теоретического предела на больших интервалах времени, нашли широкое применение в различных отраслях науки и техники. Тем не менее, в рамках подпрограммы «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС» государственной программы «Космическая деятельность России» для совершенствования комплекса воспроизведения, хранения и передачи единиц времени и частоты предусмотрена разработка водородных хранителей с нестабильностью частоты $1,5 \cdot 10^{-16}$ на интервале времени измерения 1 сутки. Коммерческие водородные стандарты частоты с такими метрологическими характеристиками на данный момент не представлены на рынке.

Актуальность научно-технической задачи, решаемой в диссертационной работе, безусловна, имеет существенное государственное значение и определяется тем, что ВСЧВ являются основным рабочим средством измерения времени и частоты в составе государственной поверочной схемы измерения времени и частоты. Составляют основу

групповых водородных хранителей частоты и времени (ГВХЧВ), первичного и вторичных эталонов Государственной службы времени и частоты, рабочих эталонов гражданских и военных потребителей.

Оценка содержания диссертации

Тема, цель, объект и предмет исследования, научные задачи диссертационного исследования сформулированы четко, правильно отражают содержание работы.

В диссертационной работе поставлена и решена основная актуальная научно-техническая задача, заключающаяся в уменьшении вклада тепловых шумов резонатора в нестабильность частоты ВГ. Цель достижение максимального значения произведения $Q_n \sqrt{P}$, обеспечивающего наименьшую нестабильность частоты ВСЧВ.

Решены важные подзадачи:

- произвести теоретическую оценку предельно возможного уменьшения нестабильности частоты ВСЧВ при использовании пучка атомов водорода в одном квантовом состоянии;
- разработать конструкцию сортирующей системы, обеспечивающей эффективную фокусировку активных атомов на вход накопительной колбы и максимальное удаление из пучка ненужных атомов в пределах ограничений на общую длину;
- провести теоретические и экспериментальные исследования методов перевода атомов из одного состояния в другое. Выбрать метод, пригодный для использования в промышленно выпускаемых ВСЧВ;
- оценить эффективность формирования пучка атомов в одном квантовом состоянии;
- провести экспериментальные исследования нестабильности частоты ВСЧВ с СДС, исследовать влияние нестабильности параметров инверсионной области на выходную частоту ВСЧВ.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитируемой литературы из 89 наименования. Общий объем диссертации составляет 135 страниц, включая список цитированной литературы. Диссертация содержит 47 рисунков и 19 таблиц.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту

1. В качестве **первого научного положения** автор обосновывает, что применение ВГ с СДС позволяет уменьшить нестабильность частоты, обусловленную тепловыми шумами резонатора, в 1,6 раза по сравнению с промышленно выпускаемыми ВГ.

2. Вторым **научным положением** является разработанная конструкция СДС с учетом ограничений, связанных с использованием в промышленных ВСЧВ, позволяющая сфокусировать максимальный поток атомов водорода в накопительную колбу, а доля рабочих атомов в пучке достигает 96 %.

3. Третье **научное положение** утверждает, что для метода адиабатического быстрого прохождения вероятность перехода достигает 95 %. Доказаны надежность и воспроизводимость результатов, которые сохраняются неограниченно долго в обычных условиях эксплуатации благодаря меньшей чувствительности к внешним магнитным полям. Утверждается пригодность использования в промышленных ВГ.

4. Четвертое **научное положение** заключается в том, что для ВГ с системой двойной сортировки атомов по квантовым состояниям экспериментально получено увеличение произведения $Q_L \sqrt{P}$ в 1,5 раза по сравнению с промышленными ВГ.

5. В пятом **научном положении** отмечается, что экспериментально достигнута нестабильность частоты на интервале времени измерения 1 сутки $(1,3-1,5) \cdot 10^{-16}$.

Научная новизна

Результаты работы, отраженные в научных положениях, получены впервые.

Практическая значимость

ВГ с СДС 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.

В результате исследования был разработан генератор квантовый водородный ЯКУР.411141.052, входящий в состав перспективного ВСЧВ VCH-2021, что подтверждено актом внедрения, а оригинальность технического решения – патентом на изобретение.

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 инверсионной области по методам быстрого изменения направления магнитного поля и адиабатически быстрого прохождения. Автор разработал конструкцию СДС, провел экспериментальные исследования мощности генерации и добротности спектральной линии, экспериментальные исследования нестабильности частоты, исследовал влияние параметров СДС на выходную частоту ВГ, разработал модуль управления СДС.

Апробация работы

Материалы диссертационной работы, как следует из списка научных трудов, достаточно полно апробированы на научно-практических конференциях и симпозиумах, опубликованы в научно-технических изданиях. В списке 14 наименований, среди них 8 публикаций, входящие в

список реферируемых журналов, рекомендованных ВАК, и патент. К сожалению, нет единоличных работ автора.

Достоверность основных выводов и результатов диссертации

Все основные научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, достаточно полно и убедительно обоснованы. Полученные в итоге работы результаты подтверждаются сравнительными результатами измерений с использованием аттестованных методик и сертифицированных измерительных средств, не противоречат общеизвестным.

Ценность для науки и практики проведенной соискателем работы

На основе проведенных в диссертации исследований разработан опытный образец ВГ с СДС, который будет являться основой перспективных ВСЧВ.

Тема и содержание диссертационной работы соответствует специальности 05.11.15 – «Метрология и метрологическое обеспечение».

Автореферат в достаточной степени отражает основное содержание диссертации.

В качестве замечаний по диссертации необходимо отметить:

1. В главе 1 в качестве основного метода... предложен метод двойной сортировки. Корректнее было бы - отдано предпочтение. А еще точнее – разработана оригинальная конструкция двойной сортировки.

2. Глава 4 носит обособленный характер и не связана с последующим материалом. Создается впечатление, что она демонстрирует лишь эрудицию автора. В заключении главы следовало бы указать чем были полезны рассмотренные методы и что из них использовано.

3. Не изложена суть Вашего патента. Следовало бы указать его использование в предложенной конструкции сортировки атомов, что еще подняло бы вес работы.

4. Нет публикаций без соавторства. Объясняю отсутствие таковых культурой автора.

5. Следовало бы сравнить эффективность Вашего решения задачи с решением по патенту ВНИИФТРИ № 2741476С1, 2021г. На мой взгляд, предложенная автоподстройка резонатора под спектральную линию водородного перехода наиболее эффективна (по заявлению авторов патента 2 - 5 раз на любом интервале наблюдения) У Вас 1,5. Хотя увеличение мощности в резонаторе (самостоятельная задача) дает дополнительный выигрыш, а в совокупности с автоподстройкой получится больший суммарный эффект. Ваше решение правильно. С шумами надо бороться в начале цепи.

6. Следовало бы оценить влияние нагрузки (приемника). Возможно, она является ограничивающим фактором полученного эффекта.

Заключение

В целом диссертация Полякова Д. А. является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком научном уровне. Представляет собой весьма актуальную разработку перспективного ВГ, содержит ряд новых научных и практических результатов. В работе решена важная **научно-техническая задача** уменьшения нестабильности частоты ВСЧВ:

1. Предложенный ВГ с системой двойной сортировки атомов по квантовым состояниям позволяет уменьшить нестабильность частоты, обусловленную тепловыми шумами, в 1,6 раза по сравнению с промышленно выпускаемыми ВСЧВ.

2. Исследована и разработана конструкция системы двойной сортировки с учетом ограничений, связанных с использованием в

промышленных ВСЧВ. Выполнено математическое моделирование траекторий движения атомов в системе двойной сортировки и определены оптимальные параметры, при которых поток атомов водорода, попадающих в накопительную колбу, максимален, а доля рабочих атомов в пучке достигает 96 %.

3. Проведены исследование, разработка конструкции и сравнение инверсионных областей, реализующих методы быстрого изменения направления магнитного поля и адиабатически быстрого прохождения. Для метода адиабатически быстрого прохождения экспериментально достигнута вероятность перехода 95 %, доказана надежность и воспроизводимость результатов благодаря меньшей чувствительности к внешним магнитным полям, обеспечивающей пригодность разработанного метода для использования в промышленно выпускаемых ВСЧВ.

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

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

6. Экспериментально достигнута нестабильность частоты, обусловленная тепловыми шумами резонатора, в 1,5 раза ниже, чем у промышленных ВСЧВ, например, Ч1–1003М и Ч1–1035. СКДО на интервале времени измерения 1 сутки составило $(1,3-1,5) \cdot 10^{-16}$ и отвечает требованиям ФЦП.

7. Экспериментально подтверждена выполнимость требований по стабилизации параметров двойной сортировки атомов, предложена схема для практической реализации модуля управления СДС.

В результате проведенных в диссертации исследований разработан защищенный патентом опытный образец ВГ с СДС.

Таким образом, диссертационная работа Виктора Александровича Полякова удовлетворяет требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения учёных степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, безусловно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук.

Официальный оппонент

Главный научный сотрудник НИО «НОМИК» НИЧ МТУСИ
доктор технических наук, профессор

«29» октября 2021 г.

А.В. РЫЖКОВ

Подпись доктора технических наук, профессора Рыжкова А.В. заверяю

Начальник НИЧ МТУСИ



Белявский Ю.В.