



АО «КОНЦЕРН ВКО «АЛМАЗ – АНТЕЙ»

Акционерное общество
«Корпорация космических систем специального назначения «Комета»
(АО «Корпорация «Комета»)

ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР

Велозаводская ул., д. 5, Москва, 115280. Тел./факс: (495) 674-08-46, e-mail: info@corpkometa.ru;
http://corpkometa.ru; ОГРН 1127746365670, ИНН/КПП 7723836671/772301001

27.10.2021 № 42/5693
На № 01-14/8015 от 23.09.2021

О направлении отзыва официального
оппонента

Ученому секретарю
диссертационного
совета Д308.005.01
при ФГУП «ВНИИФТРИ»
к.ф.-м.н., с.н.с.
Балаханову М.В.

г.п. Менделеево,
Солнечногорский район,
Московская обл., 141570

Уважаемый Михаил Валентинович!

Направляю Вам отзыв официального оппонента, к.т.н., с.н.с. Заска В.С., на диссертацию сотрудника ЗАО «Время-Ч» Полякова В.А. на тему «Исследование и разработка водородного генератора с двойной сортировкой атомов для уменьшения нестабильности частоты», представленную в диссертационный совет Д308.005.01 при ФГУП «ВНИИФТРИ» на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Приложение: на 10 л. в 2 экз.

В.В. Бодин

Заск Виктор Самуилович
(985) 184-68-17

ФГУП «ВНИИФТРИ»		
Вх. №	18 279	
«29»	10	20 21 г.
на	1	листах
		20 листах

Отзыв

официального оппонента на диссертацию
Полякова Виктора Александровича
на тему: «Исследование и разработка водородного генератора с двойной
сортировкой атомов для уменьшения нестабильности частоты»,
представленную в диссертационный совет Д308.005.01
при ФГУП «ВНИИФТРИ»

1. Актуальность избранной темы

Диссертация В.А. Полякова посвящена изучению возможности усовершенствования квантового водородного генератора (ВГ), а именно, его системы сортировки атомов по квантовым состояниям перед их попаданием в накопительную колбу. Это один из неиспользованных пока резервов дополнительного снижения нестабильности частоты в промышленном стандарте частоты.

Известно, что с момента создания в 1960 г. квантовые ВГ заявили о себе как об активном источнике сверхвысокостабильных колебаний, имеющем, благодаря относительно компактной конструкции, хорошие перспективы промышленной реализации. В течение нескольких последних десятилетий созданные промышленные образцы водородных стандартов частоты и времени (ВСЧВ) оправдали эти ожидания и в наши дни действительно превосходят остальные типы микроволновых квантовых стандартов частоты по стабильности частоты на интервалах времени измерения до суток. При этом лучшие отечественные промышленные образцы ВСЧВ, созданные в последние 3-5 лет, на интервалах 10-1000 с достигли метрологических характеристик на уровне теоретического предела, а суточная относительная нестабильность, например, в наземных комплексах на базе ВСЧВ, обеспечивающих работу спутниковой навигации ГЛОНАСС, достигла уровня в $3 \cdot 10^{-16}$.

Значение ВСЧВ для современной науки и техники очень велико. Высокие метрологические характеристики, присущие этим приборам с самого их рождения, фактически обусловили возможность появления и развития таких важнейших научно-технических направлений как спутниковая навигация и радиointерферометрия со сверхдлинными базами (РСДБ). ВСЧВ нашли также применение в тех отраслях, где востребованы метрологически точные частотно-временные измерения. Это – военные технологии, геодезия и картография, служба определения параметров вращения Земли, а также научные исследования по уточнению значений физических постоянных. Именно с помощью ВСЧВ были подтверждены основные положения общей теории относительности, связавшие локальную гравитацию и темп хода времени, а при использовании технологии РСДБ совершены фундаментальные открытия в радиоастрономии.

В Российской Федерации 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.

Государственная метрология по своему прямому назначению должна опережать развитие потребностей промышленности, обороны и науки и соответствовать постоянно растущим требованиям к параметрам и метрологическим характеристикам ВСЧВ, в том числе, промышленных образцов 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 ВСЧВ со среднеквадратическим двухвыборочным отклонением (СКДО) частоты не более $1,5 \cdot 10^{-16}$ на интервале времени измерения 1 сутки.

Таким образом, заявленное соискателем в качестве цели своей работы уменьшение нестабильности частоты промышленного ВСЧВ на всех интервалах времени измерения вплоть до 1 суток за счет использования пучка атомов в одном квантовом состоянии, лежит в русле государственной программы развития космической отрасли и, несомненно, является актуальной и важной задачей.

2. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Выбор одного из двух известных методов двойной сортировки атомов для дальнейшего обстоятельного исследования возможности его использования в промышленных образцах ВСЧВ, а именно, метода адиабатического быстрого прохождения зоны инверсии, автор убедительно обосновал его бóльшей простотой в реализации, более высокими эффективностью сортировки и стабильностью параметров системы двойной сортировки (СДС), подтверждёнными экспериментально, а также совместимостью с конструкцией водородных генераторов серийных промышленных образцов стандартов частоты.

Выбранные соискателем конструкции элементов СДС и оптимальные режимы их использования обоснованы предварительными теоретическими расчётами необходимой структуры и параметров магнитных полей, а также моделированием траекторий движения атомов, находящихся в различных квантовых состояниях, для максимизации вероятности неадиабатического квантового пе-

рехода в инверсионной зоне СДС и достижения тем самым наиболее эффективного отсеивания неактивных атомов.

3. Достоверность и новизна исследования, полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

3.1 Достоверность результатов теоретических исследований в диссертации подтверждена корректным использованием существующей теории водородных квантовых генераторов, теории неадиабатических квантовых переходов, вспомогательных математических методов, значительным количеством публикаций и личных выступлений, в том числе, на международных симпозиумах и конференциях и, наконец, результатами реальных измерений взаимной неустойчивости частоты экспериментальных образцов ВСЧВ с двойной сортировкой состояний атомов, непосредственно подтвердившими достижение поставленной цели. Экспериментальные данные были получены соискателем с помощью калиброванного и поверенного оборудования ЗАО «Время-Ч». Полученные результаты опубликованы в специализированных журналах и сборниках трудов: «Измерительная техника», «Метрология времени и пространства», «Труды института прикладной астрономии РАН», «Вестник метролога». Материалы диссертации докладывались на Международном симпозиуме «Метрология времени и пространства» (2012 г., 2014 г., 2016 г., 2018 г.), Всероссийской конференции «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (2019 г.), Европейском время-частотном форуме и Международном симпозиуме по контролю частоты (EFTF-IFCS 2021). Результаты диссертации отражены в 13 публикациях, 4 из которых – в журналах, входящих в базы данных Web of Science и Scopus, и рекомендованных ВАК. Получены также 1 патент на изобретение и акт внедрения результатов диссертации.

Проведя обстоятельный обзор литературы по теме диссертации и проанализировав достигнутые показатели ВСЧВ, автор показал, что двойная сортировка атомов водорода, обеспечивающая поступление в накопительную колбу водородного генератора максимального количества атомов, находящихся в активном состоянии, характеризуемом квантовыми числами $F=1$, $m_F=0$, является возможным резервом повышения стабильности частоты в промышленных образцах этих приборов, который до настоящего времени ещё не использован. Однако априори не было ясности даже в том, насколько эффективной может стать реализация этого резерва, поскольку оценка достигаемых при этом метрологических характеристик никем не производилась.

3.2 Несколько результатов, полученных соискателем и отражённых в диссертации, объективно являются новыми.

3.2.1 Автор впервые произвёл теоретическую оценку достижимого уменьшения составляющей неустойчивости частоты ВСЧВ, обусловленной теп-

ловыми шумами резонатора, в случае использования СДС атомов по квантовым состояниям в водородном квантовом генераторе. Полученный результат подтвердил целесообразность дальнейшей детальной разработки такого генератора для его дальнейшего использования в промышленных образцах ВСЧВ.

3.2.2 Автор впервые исследовал, разработал и оптимизировал конструкцию СДС с учетом ограничений, связанных с перспективой применения этой системы в ВГ для промышленных стандартов частоты. При этом было выполнено математическое моделирование траекторий движения атомов водорода в СДС для случаев 6-полюсных и 4-полюсных сортирующих магнитов. Произведен расчет относительного количества атомов водорода в неактивных состояниях с $F=1$, $m_F=\pm 1$, попадающих в накопительную колбу, для случая точечного источника атомов водорода, находящегося на оси пучка и смещенного от оси на различные расстояния, что позволило обобщить полученные результаты на случай пространственно-распределенного источника. В результате были определены оптимальные параметры СДС, при которых поток активных атомов водорода, попадающих в накопительную колбу, максимален. Новизна приведенной в диссертации конструкции СДС подтверждена также патентом № 2726851.

3.2.3 Автор впервые выполнил расчет инвертирующих полей, обеспечивающих максимальную вероятность неадиабатического однонаправленного квантового перехода между неиспользуемыми состояниями при прохождении атомами инвертирующей области в следующую за ней вторую ступень магнитной сортировки, синтезировал конструкцию соленоидов, обеспечивающих эти поля, провёл исследование и сравнение по сложности реализации и эффективности двух вариантов СДС, реализующих метод быстрого изменения направления магнитного поля и метод адиабатического быстрого прохождения.

3.2.4 Автором впервые проведено обстоятельное исследование экспериментального образца водородного генератора 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 исходного пучка атомов водорода. Найдены оптимальные значения этих параметров для достижения максимального и устойчивого значения произведения $Q_L \sqrt{P}$.

3.2.5 Соискателем впервые проведено исследование влияния неустойчивости параметров СДС в инвертирующей области на выходную частоту ВСЧВ.

3.2.6 Впервые исследованы метрологические характеристики ВСЧВ на основе водородного генератора с СДС по методу адиабатического быстрого прохождения. Измеренное при этом среднеквадратическое двухвыборочное отклонение (СКДО) частоты выходного сигнала 5 МГц исследуемого ВСЧВ на

уровне $1,3 \cdot 10^{-16}$ на интервале времени измерения 1 сутки подтвердили достижение поставленной цели.

В автореферате подчёркивается, что все экспериментальные и теоретические результаты, представленные в диссертации, получены автором лично. Ему 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 зависимости мощности генерации и добротности спектральной линии от режимов использования СДС, экспериментальные исследования неустойчивости частоты, исследовал влияние параметров СДС на выходную частоту ВГ, а также разработал модуль управления СДС.

4. Значимость полученных автором результатов для науки и практики

Научная значимость диссертации состоит в проведённой автором предварительной теоретической оценке неустойчивости водородного генератора, достижимой в случае использования в его физической схеме СДС атомов водорода по их квантовым состояниям, а также в расчётных соотношениях для элементов конструкции и оптимизации собственно СДС в выбранном варианте адиабатического быстрого прохождения зоны инверсии, полученных автором с использованием методов классической и квантовой теории, а также путём математического моделирования.

Практическая значимость результатов диссертации заключается в реально достигнутом уменьшении неустойчивости частоты в экспериментальных образцах водородных генераторов, которые следует рассматривать как реализованные прототипы перспективных промышленных образцов с улучшенными метрологическими характеристиками. Более высокие показатели промышленных ВСЧВ, получаемые при использовании двойной сортировки атомов водорода, позволят повысить уровень метрологической точности воспроизведения и хранения физических единиц времени и частоты в национальных эталонах, а также расширить круг потенциальных потребителей этой наукоёмкой продукции в Российской Федерации и в странах зарубежья и поддержать на международном уровне престиж Российской Федерации как одной из ведущих научно-технических держав мира.

5. Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Основной результат диссертации, состоящий в практически достигнутом уменьшении неустойчивости частоты водородного квантового генератора за

счёт использования двойной сортировки атомов, должен использоваться в новых образцах промышленных стандартов частоты. Это заметно поднимет метрологический уровень этих приборов и, очевидно, станет наиболее распространённым применением, прежде всего, в государственной и военной метрологии, в первичных и вторичных эталонах времени и частоты. Повышенные метрологические характеристики этих генераторов будут востребованы также в научных исследованиях: в области радиоинтерферометрий со сверхдлинными базами, в тонких экспериментах по уточнению физических констант и по проверке точности предсказаний общей теории относительности.

6. Оценка содержания диссертации и её завершенности

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитированной литературы из 83 наименований.

Диссертация соответствует паспорту специальности 05.11.15 «Метрология и метрологическое обеспечение», поскольку в ней соискателем проведено фундаментальное исследование возможности практического использования физического принципа двойной сортировки квантовых состояний атомов водорода для достижения наивысших метрологических характеристик ВГ в промышленных образцах ВСЧВ. В результате этого исследования выбран один из двух известных вариантов реализации СДС, найдена оптимальная конструкция СДС, совместимая с типовой конструкцией промышленных ВСЧВ ЗАО «Время-Ч», а также теоретически и экспериментально подтверждена эффективность выбранного варианта СДС для уменьшения нестабильности частоты водородного генератора примерно в 1,5 раза по сравнению с лучшими серийными промышленными образцами ВСЧВ.

Диссертация является завершённым серьёзным исследованием, в котором достижение поставленной цели подтверждено экспериментально.

Основные идеи и выводы диссертации исчерпывающим образом отражены в автореферате, который даёт полное представление о существе выполненной работы.

7. Достоинства и недостатки в содержании и оформлении диссертации. Мнение о научной работе соискателя в целом

Достоинствами диссертации является её цельность и завершенность. Чётко сформулирована цель исследования и получено экспериментальное подтверждение её достижения при использовании предложенной автором конструкции СДС атомов, имеющей реальную перспективу дальнейшего практического применения в промышленных ВСЧВ. Судя по представленной диссертации, автор проявил себя как зрелый учёный с широким кругозором, владеющий глубокими физическими знаниями и имеющий при этом основательный опыт тонкого экс-

периментирования. Это нечастое сочетание компетенций позволило ему выполнить добротную и серьёзную работу и добиться убедительного решения актуальной научной задачи.

Серьёзных недостатков не обнаружено. Однако, на мой взгляд, есть несколько незначительных упущений, которые несколько снижают ясность изложения.

7.1 При формулировании основной научной задачи (стр. 9) полезно было бы подчеркнуть, что речь идёт об уменьшении относительного вклада тепловых шумов резонатора в нестабильность частоты водородного генератора (ВГ) при использовании СДС атомов по квантовым состояниям за счёт повышения добротности спектральной линии и мощности генерации.

7.2 Структура энергетических уровней основного состояния атомов водорода характеризуется целыми числами F и m_F , однако их физический смысл, в отличие от других обозначений, автором нигде не поясняется.

7.3 В диссертации часто упоминаются термины: «Частота Зеемана», «Зависимость от частоты Зеемана». Однако понятие «частота Зеемана», в отличие от «эффекта Зеемана», не является общепринятым и в тексте диссертации не поясняется. Особенно «режет глаз» второй из этих терминов, подменяющий по смыслу физически более ясное словосочетание: «зависимость от величины магнитного поля». По-видимому, автор привычно использовал узкопрофессиональный сленг, т.е. речь идёт не о конкретной частоте, а о частоте перехода между энергетическими подуровнями с квантовыми числами $F=1$, $m_F=\pm 1$ в атомах водорода, вызванном магнитным полем и пропорциональном его величине.

7.4 Под словами «**аппроксимация по методу наименьших квадратов**» (например, на стр. 118) автор часто подразумевает именно линейную аппроксимацию экспериментальных данных, но это не тождественные понятия, поэтому была бы полезна конкретизация.

В то же время, на стр. 122, 123 при аппроксимации экспериментальных данных квадратичными зависимостями не указан метод, использованный для нахождения коэффициента при квадрате аргумента.

7.5 Ключевой вывод к главе 5 (стр. 125) и в разделе «Заключение» (стр. 127) о том, что «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 промышленных ВСЧВ», для большей ясности следовало бы дополнить пояснениями о том, как именно он получен и в каком интервале значений τ он справедлив. По-видимому, речь идёт об экстраполяции участка экспериментальной зависимости нестабильности частоты от времени усреднения, зафиксированной на рис. 5.12 на стр. 119 и в таблице 19 на стр. 120 для двух пар экспериментальных водородных генераторов ВГ1-ВГ2 и ВГ3-ВГ1 с СДС в интервале 10-1000 с. Правомерность этой экстраполяции авто-

ром обоснована ранее, на рис. 1.4 (стр. 25), где отдельно показан предсказанный теорией вклад тепловых шумов резонатора и приёмника в результирующую нестабильность частоты водородного генератора при типичных значениях мощности излучения пучка атомов, а также добротностях спектральной линии и резонатора.

7.6 Вывод пункта 1 «Заключения» (стр. 126) о том, что «... применение ВГ с системой двойной сортировки атомов по квантовым состояниям позволит теоретически уменьшить нестабильность частоты, обусловленную тепловыми шумами, в 1,6 раза по сравнению с промышленно выпускаемыми ВСЧВ», сформулирован, на мой взгляд, неудачно. Следовало бы акцентировать внимание потенциального читателя на том, что этот вывод является теоретической оценкой ожидаемого эффекта применения СДС, которая с хорошей точностью (около 90%) предвосхитила реальный выигрыш в 1,4-1,5 раза, полученный автором в эксперименте.

7.7 В диссертации в разных местах приведены не совпадающие оценки степени прогресса в части снижения нестабильности частоты водородных стандартов частоты и времени, достигнутого за время, прошедшее с момента их создания. Так, на стр. 6 говорится об уменьшении нестабильности частоты на 4 порядка вплоть до теоретического предела, определяемого тепловыми шумами, а на стр. 26 – об уменьшении почти в 1000 раз до того же теоретического предела. Аналогичное несоответствие имеется и в автореферате (стр. 5 и 13).

7.8 Понятия «теоретического предела», «предельных характеристик», используемые в диссертации, с моей точки зрения, требуют дополнительных пояснений. Ведь если с самого начала утверждается, что на практике к сегодняшнему дню уже достигнут некий теоретический предел, то о его преодолении, как правило, не может быть речи. В противном случае, это означало бы, что теория неверна и требует пересмотра.

В данном случае достижение теоретического предела означает только, что за прошедшие полвека наиболее значимые механизмы кратковременной и средневременной нестабильности частоты промышленных образцов водородного генератора, обусловленные затягиванием его частоты резонатором, удалось купировать, и остались неустранимые тепловые шумы. Всё это время исходная физическая схема водородного генератора в части принципа сортировки квантовых состояний не изменялась. Из материалов диссертации следует также, что и источники этих шумов (резонатор и приёмник) не подвергались каким-либо изменениям. Однако именно в результате применения автором диссертации системы двойной сортировки и использования пучка атомов в одном квантовом состоянии физическая схема водородного квантового генератора была изменена и улучшена и именно ей соответствуют более высокие параметры водородного генератора, входящие в ту же формулу для нестабильности частоты.

Благодаря этому, оказалось возможным повысить значение произведения $Q_n \sqrt{P}$, что и привело к дополнительному реальному снижению нестабильности частоты в 1,5 раза. Теория при этом оказалась инвариантной относительно используемой системы сортировки атомов и получила дополнительное подтверждение своей справедливости.

7.9 При определении требований к конструкции СДС, совместимой с промышленными образцами ВСЧВ, для большей ясности было бы также полезно дополнительно пояснить, что ограничение конкретно в 340 мм на величину возможного расстояния от источника атомов водорода до входа в накопительную колбу (стр. 36, 55) связано с понятным и вполне разумным желанием автора в дальнейшем «вписаться» в отработанную конструкцию промышленных активных ВСЧВ, используемую именно в ЗАО «Время-Ч».

7.10 Кратковременная нестабильность частоты водородного квантового генератора и стандарта частоты на его основе отличаются на величину динамической ошибки кольца фазовой автоподстройки частоты в ВСЧВ, зависящей не только от тепловых шумов приёмника, но и от собственной нестабильности подстраиваемого кварцевого генератора на коротких интервалах времени. Однако ни наличие этого фактора нестабильности частоты ВСЧВ, ни его относительная значимость не проанализированы автором.

7.11 На стр. 15 даны две ошибочные ссылки [32, 33] на статьи отечественных специалистов в иностранных изданиях как на работы иностранных исследователей.

Указанные замечания не снижают значимости полученных результатов.

8. Заключение


Отмеченные выше недостатки не влияют на безусловно положительную оценку диссертации, все разделы которой обладают внутренним единством и подчинены главной цели – уменьшению нестабильности частоты водородного генератора, достигаемой за счёт применения высокоэффективной СДС атомов по квантовым состояниям и использования преимущественно только активных атомов, находящихся в одном из них. Наиболее значимыми с точки зрения практики представляются оригинальные исследования автора в области создания и оптимизации конструкции СДС атомов по квантовым состояниям и обоснованный выбор одного из двух возможных вариантов её реализации, потенциально совместимого с освоенными промышленными образцами ВСЧВ. При этом ожидаемая эффективность использования этой системы в составе водородного генератора, исследованная автором теоретически, убедительно подтверждена результатами экспериментов.

Таким образом, диссертация Полякова В.А. является законченной научно-квалификационной работой, обладающей внутренним единством, в которой со-

держится решение практически важной научной задачи повышения точности воспроизведения и хранения единиц времени и частоты микроволновыми промышленными стандартами частоты на основе водородного квантового генератора, и тем самым внесён существенный вклад в развитие отечественной метрологии пространства, времени и частоты.

По критериям актуальности, научной новизны, достоверности и обоснованности выводов диссертация Полякова В.А. соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, а её автор, несомненно, заслуживает присуждения ему искомой учёной степени.

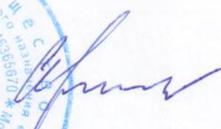
Официальный оппонент,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
ведущий научный сотрудник
Акционерного общества
«Корпорация космических систем
специального назначения «Комета»
(АО «Корпорация «Комета»),
115280, г. Москва, Велозаводская ул., д. 5,
тел. +7 (495) 675-07-01, +7 (495) 674-08-46,
E-mail: info@corpkometa.ru


26.10.2021г.

В.С. Закс

Подпись к.т.н., с.н.с. В.С. Закса удостоверяю:
Учёный секретарь
диссертационного совета
АО «Корпорация «Комета», д.т.н.





Н.И. Аржененко