

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА  
24.1.029.01 (Д002.034.01) НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТ АНАЛИТИЧЕСКОГО  
ПРИБОРОСТРОЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК (ИАП РАН), Г. САНКТ-  
ПЕТЕРБУРГ**

ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК  
аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от «22» апреля 2022 г. № 5

о присуждении Петрову Александру Анатольевичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Методы улучшения точностных характеристик квантовых стандартов частоты» по специальности 1.3.2 (01.04.01) – Приборы и методы экспериментальной физики принята к защите 09.02.2022 г., протокол № 2, диссертационным советом 24.1.029.01 (Д002.034.01) на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт аналитического приборостроения Российской академии наук (ИАП РАН), 190103, а/я 207, г. Санкт-Петербург, приказ 714/нк от 02.11.2012 г.

Соискатель: Петров Александр Анатольевич, 1990 года рождения, окончил в 2014 году магистратуру Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет», а в 2018 году окончил аспирантуру Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Диссертация выполнена в Акционерном обществе «Российский институт радионавигации и времени», г. Санкт-Петербург.

**Научный руководитель:**

Давыдов Вадим Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург.

### Официальные оппоненты:

1) Картошкин Виктор Арсеньевич, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки, «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе» Российской академии наук, представил на диссертацию и автореферат **положительный отзыв**, в котором содержатся следующие замечания:

1. В защищаемых положениях и в автореферате и тексте диссертации имеется пункт: «Метод синтеза резонансной частоты атомов цезия-133 и рубидия-87 с дробным коэффициентом преобразования, позволяющий расширить диапазон выходных частот в 5 раз, уменьшить разрешение выходного сигнала до десятитысячных долей герца, улучшить подавление боковых спектральных составляющих...» Представляется спорным, что уменьшение разрешения является достижением, либо в это выражение закладывается смысл, который должен быть объяснен;

2. В диссертации используется большое количество аббревиатур, но далеко не все из них расшифрованы в тексте диссертации. Например, БСУ /бортовое синхронизирующее устройство/ – стр.9, ШВ /шкала времени/ – стр.41 и т.д.;

3. Вызывают удивления выражения типа «влияние на чистоту спектральных характеристик» стр. 10 или «В качестве выхода из стандарта выводятся реперная частота» - стр.37;

4. В работе имеются опечатки. Например, «modulation frequansу» стр. 86 и ряд других;

5. В начале диссертации указано, что основные результаты работы опубликованы в 16 статьях, при этом в конце диссертации приводится список основных публикаций по теме диссертации из 14 наименований (стр. 14 и 119) соответственно.

6. На стр. 98 относительный сдвиг частоты дается в Гц, на стр. 103 неправильно указана величина магнетона Бора;

7. Глава 3 диссертации посвящена описанию «метода стабилизации магнитного поля, разработке системы стабилизации магнитного поля и обсуждению полученных результатов». Однако, в работе отсутствуют численные данные, как по величине прикладываемого магнитного поля, так и по точности его удержания, а также сравнение с ранее реализованными параметрами;

8. В работе проводились температурные исследования, и указывается на зависимость выходных характеристик устройств. При этом в тексте диссертации отсутствует информация о точности удержания температуры в климатической камере.

2) Рождественский Юрий Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор факультета Фотоники и оптоинформатики, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», представил на диссертацию и автореферат **положительный отзыв**, в котором содержатся следующие замечания:

1. В названии диссертации и далее по тексту употреблено слово «точностные» характеристики, по сути являющее слэнгом, и не раскрывающим количественные оценки характеристик выходного сигнала КСЧ;

2. В тексте диссертации желательно представить сравнительный обзор по реализованным методам синтеза СВЧ-сигнала возбуждения и стабилизации магнитного поля в КСЧ на атомах цезия-133 и рубидия-87, которые выпускаются в США, Китае и Европейских странах;

3. В тексте диссертации представлены результаты проверки системы стабилизации магнитного поля в течение 16 дней. Не ясно, почему не представлены результаты работы данной системы за более длительный промежуток времени (миссия спутника длится более десяти лет).

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации», г. Санкт-Петербург, **в своем положительном заключении**, подписанном Крыжановским Георгием Алексеевичем, доктором технических наук, профессором кафедры организации и управления в транспортных системах Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации, заслуженным деятелем науки и техники РСФСР, а также Шестаковым Иваном Николаевичем, доктором технических наук, доцентом, заведующим кафедрой организации и управления в транспортных системах, утвержденном проректором по науке и цифровизации, доктором технических наук, доцентом Костиным Геннадием Александровичем, указала, что диссертация Петрова А.А. соответствует всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а соискатель заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 (01.04.01), и отметила следующие замечания:

1. Первая глава диссертации перегружена дополнительной информацией о существующих типах квантовых стандартов частоты. Более рационально было бы остановиться на рассмотрении только тех стандартов частоты, по которым проводились

исследования.

2. В тексте желательно дать общее описание элементной базы, реализуемого автором синтезатора частоты и системы стабилизации магнитного поля.

3. В работе приведены основные характеристики реализованного частотного синтезатора, но отсутствует информация относительно оценки спектральной плотности фазовых шумов, что наиболее важно для анализа и практической реализации.

4. В работе приведены малоинформативные фотографии внешнего вида климатической и термовакуумной камер, которые не дают новых знаний в исследуемой области наук.

Соискатель имеет **14 (четырнадцать)** опубликованных работ в рецензируемых научных изданиях. Из них **5 (пять)** работ входят в перечень ВАК РФ, **12 (двенадцать)** публикаций входит в базу SCOPUS, а также **12 (двенадцать)** публикаций в материалах всероссийских и международных научных конференций.

К наиболее значительным работам, отражающим основное содержание диссертации, относятся:

1. **Петров А.А.**, Давыдов В.В. Цифровой синтезатор частоты для атомных часов на парах  $^{133}\text{Cs}$ . // Радиотехника и электроника. 2017. Т. 62. №. 3. С. 300 – 306.

2. **Петров А.А.**, Давыдов В.В., Гребеникова Н.М. О возможности применения метода прямого цифрового синтеза при разработке синтезаторов частоты для квантовых стандартов частоты. // Радиотехника и электроника. 2018. Т. 63. № 11. С. 1159-1164.

3. **Петров А.А.**, Залетов Д.В., Давыдов В.В., Шаповалов Д.В. Особенности построения схемы формирования сигнала возбуждения сверхвысокой частоты в цезиевых атомных часах. // Радиотехника и электроника. 2021. Т. 66. № 3. С. 285-290.

4. Lukashev N.A., **Petrov A.A.**, Davydov V.V., Grebenikova N.M., Valov A.P. Improving performance of quantum frequency standard with laser pumping.// Proceedings - International Conference Laser Optics 2018. ICLO 2018. 2018. 8435889. P. 271.

5. **Petrov A.A.**, Grebenikova N.M., Lukashev N.A., Rodygina N.S., Moroz A.V. Features of magnetic field stabilization in caesium atomic clock for satellite navigation system. // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1038(1). P. 012032.

6. **Petrov A.A.**, Davydov V.V., Grebenikova N.M. Some Directions of Quantum Frequency Standard Modernization for Telecommunication Systems.// Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). 2018. 11118 LNCS. P. 641-648.

7. **Petrov A.A.**, Davydov V.V., Zalyotov D.V., Shabanov V.E., Shapovalov D.V. Features of direct digital synthesis applications for microwave excitation signal formation in quantum frequency standard on the atoms of cesium. // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1124(4). P. 041004.

8. **Petrov A.A.**, Davydov V.V., Shapovalov D.V. About the microwave excitation signal formation in the quantum frequency standard on cesium atoms-133. // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1400(4). P. 044008.

9. **Петров А.А.**, Кильговатов В.П., Григорьев В.И., Залетов Д.В., Шабанов В.Е., Шаповалов Д.В. Некоторые направления модернизации квантового стандарта частоты на атомах цезия – 133. 6-ой Международный симпозиум «Метрология времени и пространства», Менделеево, Россия, 2018, с. 39-42.

10. **Петров А.А.**, Григорьев В.И., Залетов Д.В. Результаты наземной отработки модернизированного квантового стандарта частоты на атомах цезия-133. Седьмая всероссийская конференция «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (КВНО-2019). СПб.: ИПА РАН, 2019. – с. 45-46.

**На автореферат диссертации поступили следующие отзывы:**

1. От Полякова Петра Александровича, профессора физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, доктора физико-математических наук.

**Замечание:**

представлено очень много материала, что привело к тому, что ряд рисунков представлен в маленьком формате, сложном для восприятия и анализа. Следовало более сдержанно представить материал, которого у автора явно в избытке и остановиться на самых ключевых моментах. Совершенно не обязательно рассматривать даже кратко все методы синтеза частот. Достаточно двух предложений.

2. От Непомнящего Олега Владимировича, кандидата технических наук, доцента, профессора, заведующего кафедрой «Вычислительная техника» Института космических и информационных технологий ФГАОУ ВО Сибирского федерального университета.

**Замечания:**

- На мой взгляд, в тексте автореферата следовало бы детально выделить положения научной новизны исследований, указав те несомненные преимущества, которые то или иное положение предоставляет.

- Некоторые рисунки, например Рис.15 и 17 имеют плохо видимые надписи, которые без особого ущерба могут быть увеличены.

- В тексте автореферата довольно скудно представлен такой важный, полученный автором результат, как практическая реализация СЧ /синтезатор частоты/, что, по-видимому, связано с ограничениями на допустимый объем страниц.

3. От Бутырского Евгения Юрьевича, профессора кафедры теории управления факультета прикладной математики – процессов управления Санкт-Петербургского государственного университета, доктора физико-математических наук.

Замечания:

- Рисунки 12 и 13 автором не прокомментированы. Не понятно, каким образом автор уменьшил боковые лепестки.

- Автор утверждает, что анализ данных показывает улучшение спектральных характеристик. При этом, не указано насколько и какие критерии качества при этом использовались.

4. От Кузнецова Кирилла Андреевича, старшего научного сотрудника физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, кандидата физико-математических наук.

Замечание:

в автореферате затронут вопрос перехода к новым стандартам частоты, обеспечивающим точность определения координат на уровне менее 1 метра. По мировым прогнозам в этот рынок в ближайшие годы планируются вложения сотен миллиардов долларов. Было бы интересно более детально оценить возможности перехода к этим технологиям с помощью методов, развиваемых А.А. Петровым.

5. От Козловой Елены Сергеевны, кандидата физико-математических наук, научного сотрудника лаборатории лазерных измерений Института систем обработки изображений РАН – филиала Федерального государственного учреждения «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук».

Замечание:

защищаемое положение 3: «Метод многопозиционной девиации работы кольца АПЧ /автоматическая подстройка частоты/ в квантовом стандарте частоты на атомах рубидия-87» стоило бы написать более подробно. В автореферате это есть, но лучше, когда это сразу представлено в защищаемом положении.

6. От Подстригаева Алексея Сергеевича, кандидата технических наук, доцента, начальника научно-исследовательской лаборатории АО «НИИ «Вектор».

Замечания:

- Автореферат содержит много вспомогательной информации, вместо которой целесообразно было бы привести результаты экспериментальных исследований;
- В автореферате отсутствует оценка массогабаритных характеристик основных предложенных технических решений.

7. От Богачева Юрия Владимировича, кандидата физико-математических наук, заместитель заведующего кафедрой физики СПбГЭТУ «ЛЭТИ» по научной работе. Без замечаний.

**Все отзывы на автореферат диссертации положительные.**

**Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их большим опытом работы в областях физики, радиофизики, квантовых стандартов частоты, радиоизмерительной аппаратуры систем и комплексов навигации, приборостроения и радиотехники, что подтверждается публикациями, в которых рассматриваются различные вопросы, решению которых посвящена диссертация.**

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

**разработан** новый способ формирования сигнала СВЧ-возбуждения атомов цезия-133 и рубидия-87 с дробным коэффициентом преобразования, позволяющий в отличие от ранее применяемых, расширить диапазон выходных частот в 5 раз, увеличить разрешение выходного сигнала до десятитысячных долей герца, улучшить подавление боковых спектральных составляющих, уменьшить температурную чувствительность цезиевого квантового стандарта частоты в 4 раза;

**реализована** новая система стабилизации магнитного поля в КСЧ (квантовый стандарт частоты) на атомах цезия-133 и рубидия-87, использование которой позволяет исключить влияние ряда негативных эффектов, например, долговременный дрейф источника тока, температурная зависимость, влияние внешнего магнитного поля и т.д.;

**предложена** оригинальная методика реализации алгоритма многопозиционной девиации работы кольца АПЧ в квантовом стандарте частоты на атомах рубидия-87, приводящая к улучшению долговременной стабильности частоты выходного сигнала стандарта частоты. Её использование позволяет отслеживать изменение не только линейного дрейфа, но и нелинейные изменения частоты выходного сигнала квантового стандарта частоты на атомах рубидия-87, обусловленные различными внешними факторами, за счет измерения сигнала ошибки по контрольной частоте девиации на длительных временах наблюдения;

**исследовано** влияние флуктуаций магнитного поля на сдвиг частоты резонансного перехода атомов цезия-133 и рубидия-87;

**выявлено**, что флуктуации магнитного поля вызывают непрогнозируемый сдвиг частоты резонансных переходов, что в свою очередь создает дополнительные погрешности в определении действительного значения выходной частоты КСЧ, приводящие к ухудшению долговременной стабильности частоты КСЧ на длительных временах наблюдения.

**Теоретическая значимость** исследования обоснована тем, что:

1. **разработана** модель, описывающая работу синтезатора частоты, реализованного на основе метода прямого цифрового синтеза, с учетом особенностей работы в составе КСЧ. Указанная математическая модель позволяет провести верификацию работы интерфейса передачи данных, накопительного сумматора с увеличенным числом разрядов, перекодировочной таблицы синусов, а также формирования сигналов для работы системы автоматической подстройки частоты КСЧ с возможностью выбора различных частот модуляции под разные виды КСЧ на раннем этапе разработки, что позволяет провести качественную отладку разрабатываемого программного обеспечения и существенно сократить трудозатраты на дальнейших этапах разработки;

2. **разработана** модель, позволяющая оценить максимально достижимые спектральные характеристики выходного сигнала разработанного синтезатора частоты. Данная модель позволяет определить оптимальное соотношение между необходимыми спектральными характеристиками выходного сигнала синтезатора частоты, сохранением ресурсов базового-матричного кристалла для его производительной работы и возможностью выбора цифро-аналогового преобразователя для его дальнейшего использования в бортовой аппаратуре. Модификации этой модели могут быть применимы и к другим типам КСЧ.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики** подтверждается тем, что:



разработанные на основе предложенных методов и подходов конструкции синтезаторов частоты и системы автоматической подстройки магнитного поля, внедренные в опытные модели квантовых стандартов частоты на атомах цезия-133 и рубидия-87, позволили улучшить точностные (в частности, величину долговременного дрейфа и относительную погрешность частоты) и эксплуатационные характеристики КСЧ, а также уменьшить в них энергопотребление и вес приборов по сравнению с ранее используемыми моделями.

Предложенные методы и алгоритмы в модифицированном виде могут быть использованы в КСЧ, работающих на других физических принципах.

**Оценка достоверности результатов исследования выявила**, что научные положения, выводы и результаты, содержащиеся в диссертационной работе, подтверждаются использованием общеизвестных, апробированных и обоснованных физических методов, комплексным характером выполненных экспериментальных исследований и численных расчетов с использованием корректных допущений и приближений. Достоверность экспериментальных данных подтверждается использованием современного оборудования. Результаты эксперимента согласуются с аналитическими исследованиями, а также с данными полученными другими научными группами исследователей, где возможно сравнение.

**Личный вклад соискателя** заключается в:

- постановке цели и формулировке задач исследования;
- создании модели цифрового синтезатора на основе метода прямого цифрового синтеза, ее технической и практической реализации;
- разработке модели для проверки программного обеспечения и имитации выходных сигналов синтезатора частоты, а также для оценки максимально достижимого уровня подавления боковых составляющих в спектре выходного сигнала синтезатора частоты;
- разработке системы стабилизации магнитного поля в квантовом стандарте частоты на атомах цезия-133;
- разработке алгоритма многопозиционной девиации работы кольца АПЧ в КСЧ на атомах рубидия-87;
- разработке схем измерения в экспериментах по исследованию характеристик выходного сигнала синтезатора частоты и системы стабилизации магнитного поля;
- проведении экспериментов с КСЧ и обработки полученных экспериментальных данных;

- проведении численных расчетов параметров выходного сигнала разработанного синтезатора частоты, а также расчетов сдвига резонансных частот переходов атомов цезия-133;
- подготовке всех основных публикаций по выполненным исследованиям, представленных в диссертационной работе.

На заседании 22 апреля 2022 года диссертационный совет принял решение присудить Петрову Александру Анатольевичу ученую степень кандидата физико-математических наук.

Для проведения тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 17 докторов наук, участвовавших в заседании, из 21 человека входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за – 16, против – нет, недействительных бюллетеней – 1.

Председатель  
Диссертационного совета  
д.т.н., профессор

В.Е. Курочкин

Ученый секретарь  
Диссертационного совета  
д.ф.-м.н.

А.Л. Буляница

Дата оформления заключения:

22 апреля 2022 г.

М.П.

