



Петров Александр Анатольевич

**МЕТОДЫ УЛУЧШЕНИЯ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
КВАНТОВЫХ СТАНДАРТОВ ЧАСТОТЫ**

1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико – математических наук

Работа выполнена в АО «Российский институт радионавигации и времени».

Научный руководитель: д. ф. – м. н., профессор Давыдов Вадим Владимирович, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 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, г. Санкт-Петербург.
2. Рождественский Юрий Владимирович - доктор физико-математических наук, профессор факультета Фотоники и оптоинформатики, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», г. Санкт-Петербург.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации», г. Санкт-Петербург.

Защита состоится «22» апреля 2022 года в 12.00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.029.01 на базе Института аналитического приборостроения РАН (ИАП РАН) по адресу: 198095, Санкт-Петербург, улица Ивана Черных, д. 31-33, лит. А.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ИАП РАН по тому же адресу или на сайтах: www.iairas.ru и www.iai.rssi.ru.
Отзывы на диссертацию и автореферат направлять по адресу: 190103, Санкт-Петербург, Институт аналитического приборостроения РАН, а/я 207.

Автореферат разослан « » _____ 2022 года.

Ученый секретарь диссертационного совета, доктор физико-математических наук

А.Л. Буляница

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ

Различные научные разработки в последние несколько десятков лет позволили сделать квантовые стандарты частоты (КСЧ) источником высокостабильных, высокоточных, спектрально-чистых электрических сигналов. Достигнутая точность и стабильность частоты дала возможность эффективно использовать КСЧ в качестве синхронизирующих генераторов в аппаратуре связи и устройствах передачи информации, а также применять их, как опорные источники сигналов в радиоизмерительной аппаратуре и устройствах определения координат объекта.

В настоящее время в мире постоянно расширяется сфера применения спутниковых навигационных систем (СНС) в различных областях человеческой деятельности. В Российской Федерации в последнее десятилетие активно развивается СНС ГЛОНАСС, которая, как показывает опыт её эксплуатации, демонстрирует высокие точностные характеристики определения координат и скорости движения воздушных, морских и наземных подвижных средств. Это позволяет ей быть конкурентно способной с американской (GPS), европейской (Galileo) и китайской (BeiDou).

Одной из основных проблем, которую необходимо решать разработчикам СНС при обеспечении безапробного навигационного определения координат объекта одновременно по нескольким спутникам – это взаимная синхронизация спутниковых шкал времени с точностью до миллиардных долей секунды (наносекунд).

Решение задачи высокоточной синхронизации бортовых шкал времени требует установки на спутниках высокостабильных бортовых синхронизирующих устройств. Бортовое синхронизирующее устройство (БСУ) – это центральный элемент, определяющий точность синхронизации наземных и бортовых элементов навигационных систем. В состав БСУ входит несколько квантовых стандартов частоты различных типов.

Улучшение точностных характеристик навигационных систем, в частности при определении координат в реальном масштабе времени с точностью менее 1 м, а также повышение степени надежности их работы, в первую очередь зависит от улучшения метрологических характеристик КСЧ используемых в БСУ. Для решения этой задачи осуществляется постоянная модернизация цезиевых и рубидиевых атомных часов, находящихся в эксплуатации, а также разработка на основе проведения фундаментальных научных исследований новых моделей КСЧ.

Цель работы.

Настоящая работа посвящена разработке новых методов и систем, а также развитию существующих, для проведения исследований, направленных на улучшение метрологических характеристик квантовых стандартов частоты на атомах цезия - 133 и рубидия - 87.

Достижение поставленной цели обуславливает решение следующих задач в ходе выполнения диссертационной работы:

1. Анализ существующих методов формирования сигнала СВЧ-возбуждения с использованием синтеза частот в квантовых стандартах частоты;
2. Разработка нового метода формирования сигнала СВЧ-возбуждения атомов цезия или рубидия с учетом требований, предъявляемых к синтезатору частоты (СЧ) в квантовых стандартах частоты;
3. Разработка математической модели СЧ;

4. Теоретический расчет характеристик выходного сигнала СЧ, участвующего в формировании сигнала СВЧ-возбуждения;
5. Разработка лабораторного макета системы для формирования сигнала СВЧ возбуждения в КСЧ, программного обеспечения к ней и экспериментальные исследования. Сравнение результатов расчета с экспериментом;
6. Исследование влияния флуктуаций магнитного поля на сдвиг частоты резонансного перехода атомов цезия-133, расчет сдвигов резонансных частот переходов и сравнение результатов расчета с экспериментом;
7. Разработка методов стабилизации магнитного поля в КСЧ на атомах цезия-133 и рубидия-87 и многопозиционной девиации работы кольца АПЧ КСЧ на атомах рубидия-87, а также систем для их практической реализации;
8. Экспериментальное исследование работы системы стабилизации магнитного поля в атомно-лучевой трубке;
9. Экспериментальные исследования выходных характеристик КСЧ, в котором реализованы разработанные методы.

Научная значимость

Научная значимость диссертационной работы определяется тем, что установлены на основе проведенных исследований основные факторы, оказывающие существенное влияние на чистоту спектральных характеристик выходного сигнала синтезатора частоты при использовании в нем метода прямого цифрового синтеза;

Разработан новый метод формирования дробной частоты с разрешением до десятитысячных долей герца для подстройки частоты сигнала СВЧ-возбуждения под частоту резонансного перехода, с широким диапазоном выходных частот и реализации алгоритма многопозиционной девиации работы кольца АПЧ;

Разработана новая математическая модель, описывающая работу синтезатора частоты, в которой учитываются особенности использования метода прямого цифрового синтеза;

Разработана новая математическая модель для проверки достоверности работы разработанного СЧ на основе моделирования режимов работы и обработки экспериментальных данных;

Установлено влияние нестабильности магнитного поля в цезиевых атомных часах на сдвиг разности частот двух резонансных переходов;

Разработан новый метод подстройки магнитного поля по изменению разности между частотами зеемановских резонансов атомов цезия-133 и между частотами резонансов атомов рубидия-87.

Практическая значимость

Практическая значимость диссертационной работы заключается в том, что её результаты могут быть использованы для разработки новых моделей КСЧ на атомах цезия – 133 и рубидия - 87 и алгоритмов для обработки данных для проведения измерений и исследований, направленных на установление фундаментальных ограничений по определению нестабильности частоты в течении определенных интервалов времени.

С использованием предложенного метода синтеза частоты разработана новая универсальная конструкция цифрового СЧ, позволяющая получать выходной сигнал с разрешением до десятитысячных долей герца. Подавление боковых составляющих в спектре выходного сигнала синтезатора частоты на 28 дБ лучше, чем в ранее используемых конструкциях, диапазон получаемых частот выходного сигнала синтезатора частоты увеличился до 500 кГц.

Использование новой схемы построения синтезатора частоты позволило улучшить температурную стабильность выходной частоты КСЧ, а также реализовать новый метод построения магнитного поля в АЛТ в КСЧ на атомах цезия-133.

Разработана принципиально новая автоматическая система стабилизации магнитного поля для цезиевых атомных часов, которая обеспечивает автоматически поддерживаемое на заданном уровне значение магнитного поля, исключая его дрейф. Её использование позволило улучшить одну из главных метрологических характеристик КСЧ на атомах цезия - суточную нестабильность частоты на 15 % по сравнению с ранее используемыми конструкциями КСЧ.

Разработан новый метод многопозиционной девиации работы кольца АПЧ в квантовом стандарте частоты на атомах рубидия-87.

Использование в КСЧ разработанных мною на основе новых методов конструкций СЧ и системы автоматической подстройки магнитного поля позволило также уменьшить в нем энергопотребление и вес прибора по сравнению с ранее используемыми моделями. Это особенно важно при использовании КСЧ в летательных аппаратах различного назначения.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. 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, уменьшить температурную чувствительность цезиевого квантового стандарта частоты в 4 раза;

2. Метод подстройки магнитного поля квантового стандарта частоты на атомах цезия-133 по разности частот между квантовыми переходами $|F = 3, m_f = 1\rangle \leftrightarrow |F = 4, m_f = 1\rangle$ и $|F = 3, m_f = 0\rangle \leftrightarrow |F = 4, m_f = 0\rangle$ и квантового стандарта частоты на атомах рубидия-87 по разности частот между квантовыми переходами $|F = 1, m_f = 1\rangle \leftrightarrow |F = 2, m_f = 1\rangle$ и $|F = 2, m_f = 0\rangle \leftrightarrow |F = 1, m_f = 0\rangle$;

3. Метод многопозиционной девиации работы кольца АПЧ в квантовом стандарте частоты на атомах рубидия-87;

4. Математическая модель для проверки разработанного программного обеспечения и имитации процесса формирования сигнала с дробным коэффициентом преобразования для резонансной частоты атомов цезия - 133 и рубидия - 87, математическая модель для оценки максимального достижимого уровня подавления боковых составляющих в спектре сигнала с дробным коэффициентом преобразования.

Апробация работы.

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих международных и всероссийских конференциях, конгрессах, симпозиумах и других научных встречах, всего было сделано 34 доклада. Наиболее важные из них: Международный молодежный научный форум «ЛОМОНОСОВ-2015», «ЛОМОНОСОВ-2017», «ЛОМОНОСОВ-2018», «Ломоносов - 2019», «Ломоносов -2020» (Москва, 2015 г., 2017 г., 2018 г., 2019 г., 2020 г.), 2-ая Международная школа-конференция «The 2st International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures «Saint – Petersburg OPEN 2015» (Санкт-Петербург, 2015 г.), Международная научно-техническая и научно-методическая конференция «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании «АПИНО-2018» (Санкт-Петербург, 2018 г.), 18-ая международная конференция 18th International Conference on Laser Optics «ICLO 2018» (Санкт-Петербург, 2018 г.), 18-ая международной конференции «The 18

th International Conference, NEW2AN 2018 and 11th Conference, ruSmart 2018 «Internet of Things, Smart Spaces and Next Generation Networks and Systems» (Санкт-Петербург, 2018 г.), 6-ой Международный симпозиум «Метрология времени и пространства» (Москва, Менделеево, 2018 г.), Международная конференция «International conference PhysicA.SPb» (Санкт-Петербург, 2016, 2018, 2019 г.), Седьмая всероссийская конференция «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (КВНО-2019) (Санкт-Петербург, 2019 г.), Международная конференция «EEhPolytech-2019: Electrical Engineering and Photonics» (Санкт-Петербург, 2019 г.), Международная конференция «EEhPolytech-2020: Electrical Engineering and Photonics» (Санкт-Петербург, 2020 г.)

Публикации.

Основные результаты диссертационной работы изложены в 33 публикациях, из них 5 в научных журналах, рекомендованных ВАК, 16 в изданиях, индексируемых базами цитирования SCOPUS и Web of Science.

Личный вклад автора.

Настоящая диссертация обобщает результаты научной деятельности автора в лабораториях Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого и АО «РИПВ». Все эксперименты, разработка методов и математических моделей, а также расчеты проводились лично автором диссертации, либо при его непосредственном участии. Автор диссертации принимал непосредственное участие в постановке задач и обсуждении новых научных гипотез. Обработка экспериментальных результатов осуществлялась лично автором.

Структура диссертации.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 120 наименований, трех приложений. Работа содержит 66 рисунков и 5 таблиц, полный объем диссертации с приложениями – 145 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность темы диссертационной работы, выбор направлений исследований, сформулирована цель работы и решаемые задачи для её реализации. Во введении также определена научная новизна и практическая значимость полученных результатов, изложены защищаемые положения.

Глава 1. Подробно представлен обзор квантовых стандартов частоты классического типа на атомах цезия - 133 и рубидия - 87, приведен краткий обзор разработок различных типов КСЧ, работающих на других физических принципах. Поскольку данная диссертационная работа посвящена модернизации и улучшению характеристик квантовых стандартов частоты классического типа, большая часть главы представляет собой подробное рассмотрение физических основ работы данных КСЧ.

Принцип работы квантового стандарта частоты (цезиевых атомных часов) основан на принципе подстройки частоты высокостабильного кварцевого генератора по частоте квантового перехода атомов цезия 133 в атомно-лучевой трубки (АЛТ). АЛТ используется в качестве высокочастотного дискриминатора, по которому производится подстройка частоты кварцевого генератора (КГ). Структурная схема квантового стандарта частоты на атомах цезия – 133 представлена на рис.1.

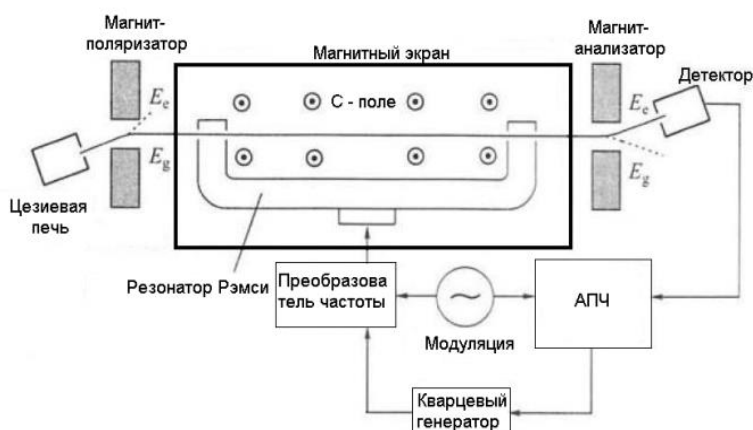


Рис. 1 Структурная схема квантового стандарта частоты на атомах цезия – 133.

Сигнал с выхода АЛТ поступает на вход системы автоматической подстройки частоты (АПЧ), которая формирует управляющее напряжение такой величины, чтобы компенсировать уход действительного значения частоты (ДЗЧ) кварцевого генератора относительно значения, соответствующего частоте атомного перехода АЛТ.

Цезиевые стандарты частоты являются серийно производящимися приборами. По габаритам они подходят для размещения в 19-дюймовой приборной стойке и имеют массу около 25 кг, потребляя менее 50 Вт. Погрешность действительного значения частоты серийных стандартов лежит в диапазоне от $2 \cdot 10^{-12}$ до $5 \cdot 10^{-13}$. На длительных интервалах измерений (более 30 суток) нестабильность частоты достигает значений $5 \cdot 10^{-15}$ (соответствует уровню фликкерного шума).

Принцип работы КСЧ на атомах рубидия - 87 основан на стабилизации частоты КГ по узкой спектральной линии радиочастотного резонанса в оптически ориентированных атомах рубидия.

Квантовые стандарты частоты на ячейках с атомами рубидия - 87 получили широкое распространение в различных областях благодаря тому, что для них был разработан эффективный способ оптической ориентации атомов. Это позволило сделать его конструкцию более миниатюрной по сравнению со стандартом частоты на атомах цезия-133.

Классическая структурная схема квантового стандарта частоты на атомах рубидия – 87 представлена на рис.2.

В зависимости от смещения подаваемого в резонатор СВЧ-частоты относительно центра линии поглощения, у амплитуды первой гармоники выходного сигнала КД меняется фаза сигнала. Это позволяет, используя систему АПЧ, сформировать управляющее напряжение такой величины, чтобы компенсировать уход действительного значения частоты (ДЗЧ) кварцевого генератора относительно значения, соответствующего частоте перехода атомов рубидия-87.

Нестабильность частоты рубидиевых стандартов находится на уровне $1 \cdot 10^{-12}/(\tau/c)^{0.5}$ для времени измерения τ от 1 с до 1000 с. При этом в зависимости от условий работы и конкретного прибора относительная нестабильность частоты может находиться в пределах уровня фликкерного пола до 10^{-13} примерно через 1000 с. Для времен, превышающих 10^4 с, девиация Аллана начинает расти в основном из-за флуктуаций частотных сдвигов, обусловленных столкновениями рубидия с атомами и молекулами буферного газа, и флуктуациями световых сдвигов.

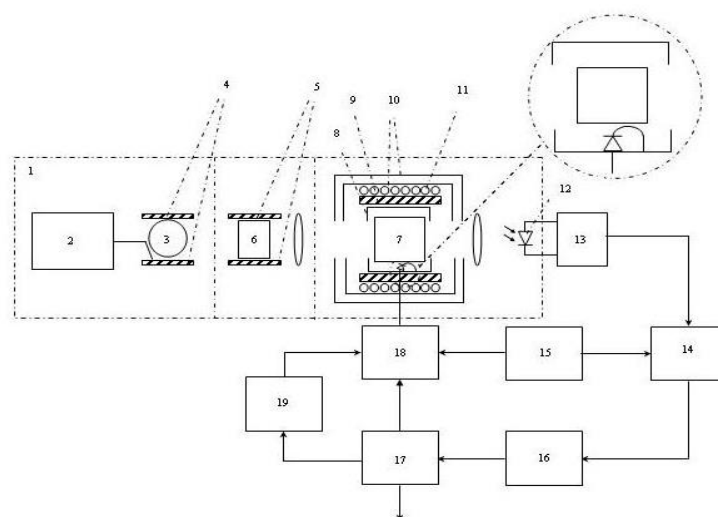


Рис. 2. Структурная схема КСЧ на ячейке с атомами рубидия Rb87 (классическая схема): 1 – квантовый дискриминатор; 2 – ВЧ генератор; 3 – газоразрядная безэлектродная спектральная лампа; 4 – термостатирование лампы; 5 – термостат ячейки-фильтра; 6 – ячейка-фильтр; 7 – газовая ячейка; 8 – резонатор; 9 – термостат газовой ячейки; 10 – магнитные экраны; 11 – катушка магнитного поля; 12 – фотодетектор; 13 – усилитель сигнала; 14 – синхронный детектор; 15 – НЧ генератор; 16 – фильтр нижних частот; 17 – кварцевый генератор; 18 – умножитель частоты; 19 – синтезатор частоты.

В завершении главы обоснованы причины необходимости продолжения работ по модернизации действующих конструкции КСЧ на атомах цезия - 133 и рубидия – 87 параллельно с исследованиями, направленными на разработку КСЧ на базе новых технологий. К ним, в первую очередь, относятся лазерные технологии, оптические стандарты, стандарты частоты фонтанного типа и стандарты частоты на основе ионных ловушек.

Глава 2 посвящена подробному теоретическому описанию различных методов синтеза частот, а также работы одного из функциональных блоков КСЧ – синтезатора частоты. Также подробно представлено влияние характеристик выходного сигнала СЧ на характеристики выходного сигнала КСЧ.

Основная функция СЧ в работе КСЧ - это формирование сигнала с частотой 12,6317727 МГц для КСЧ на атомах цезия-133 или формирование сигнала с частотой 5,313500 МГц для КСЧ на атомах рубидия-87. Данные сигналы необходимы для формирования СВЧ – частоты квантового перехода атомов цезия или рубидия соответственно. Кроме этого, СЧ формирует низкочастотные сигналы, используемые в работе системы АПЧ КСЧ.

В главе сформулированы основные требования к характеристикам выходных сигналов СЧ. Подробно разобрана теория пассивных и активных методов синтеза частот. Сформирована таблица, в которой для сравнения приведены основные параметры современных синтезаторов частоты, реализованных на различных методах синтеза. Анализ её данных, а также установленные в результате рассмотрения различных методов их преимущества и недостатки позволяют сделать заключение, что метод прямого цифрового синтеза обладает наилучшим сочетанием параметров и характеристик для выбора его за основу проектирования СЧ для применения в квантовом стандарте частоты классического типа на атомах цезия или рубидия.

На рис. 3 представлена наиболее часто используемая в устройствах формирования частот структурная схема метода прямого цифрового синтеза.

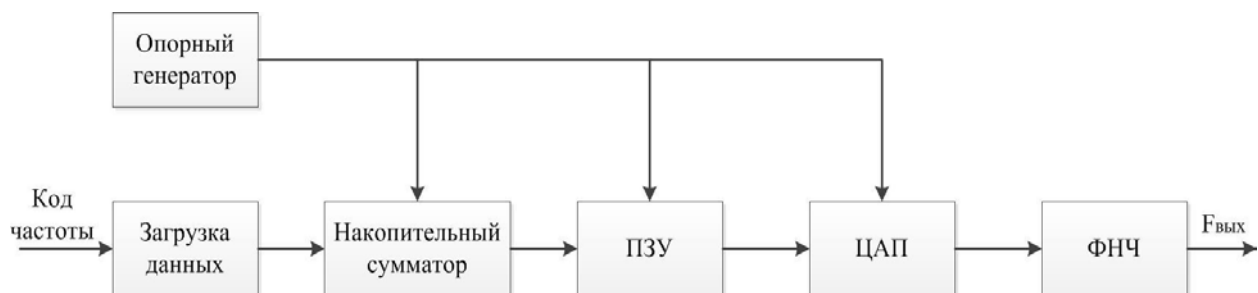


Рис. 3. Структурная схема метода прямого цифрового синтеза.

Стандартная схема метода прямого цифрового синтеза или как его называют в англоязычной литературе Direct Digital Synthesis (DDS) состоит из накопительного сумматора, перекодирующей таблицы, заложенной в память ПЗУ, цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) и фильтра нижних частот (ФНЧ). Также на рисунке представлен блок загрузки данных, отвечающий за формирование кода частоты выходного сигнала.

Вторая часть главы посвящена подробному описанию разработанного нового метода формирования дробной части частоты. Приведены расчеты основных характеристик выходного сигнала СЧ сформированного с использованием нового метода. Представлены математическая модель СЧ, в которой реализован новый метод, результаты моделирования работы ПО цифровой части СЧ, сам разработанный синтезатор и экспериментальные исследования характеристик выходного сигнала разработанного СЧ.

Для оценки степени подавления побочных комбинационных составляющих в спектре выходного сигнала СЧ, которая является одной из основных характеристик, была рассмотрена математическая модель работы синтезатора частоты, в которой реализован новый метод формирования дробной части частоты (рис.4).

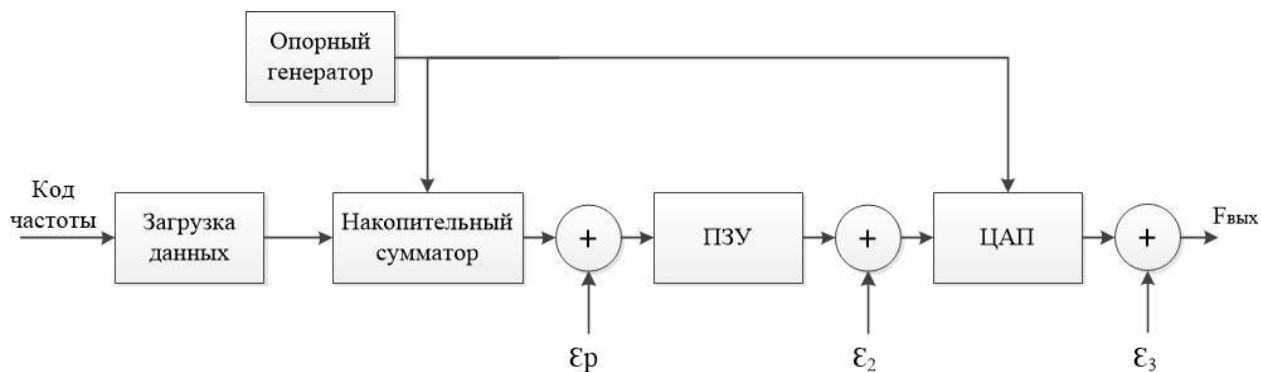


Рис. 4. Математическая модель конструкции синтезатора частоты: ϵ_p - ошибка, вызванная округлением фазы при адресации ПЗУ, ϵ_2 - ошибка, связанная с конечной разрядностью шины данных и разрядностью ЦАП, ϵ_3 - ошибка, вызванная нелинейностью ЦАП.

Подробно рассмотрены причины возникновения ошибок ϵ_p , ϵ_2 , ϵ_3 , а также представлены формулы для подробного расчета спектра выходного сигнала СЧ:

$$A = \frac{2^{L-T}}{\text{НОД}(M, 2^{L-T})} - \text{количество побочных составляющих в спектре,}$$

$$F_K = \langle \Gamma + 2^T \Gamma \rangle \frac{2^L}{\text{НОД}(M, 2^T)} - \text{частота } K\text{-ой составляющей спектра } \varepsilon_p,$$

$$A_K = \frac{1}{2^T} \frac{\frac{\pi}{2\Delta}}{\sin\left(\frac{K\pi}{2\Delta}\right)} - \text{амплитуда } K\text{-ой составляющей},$$

$$\Gamma = \frac{M}{\text{НОД}(M, 2^{L-T})},$$

L – разрядность аккумулятора фазы, M – код частоты, T – число разрядов кода частоты, передаваемое в ЦАП.

Используя выражение для амплитуды A_K , максимальный уровень побочных составляющих, обусловленных усечением фазы, может быть оценен как: $(-6,02 \cdot T + 3,9)$ дБ,

В разработанной конструкции СЧ установлена еще одна причина, по которой ухудшается спектральная чистота выходного сигнала. Ограниченное число разрядов ЦАП обуславливает ступенчатый характер выходного сигнала. Поэтому спектр этого сигнала содержит большое число высших гармоник рис.5, огибающая амплитуд которых описывается функцией:

$$A(nf_{\text{ВЫХ}}) = \frac{\sin\left(\frac{\pi n f_{\text{ВЫХ}}}{f_0}\right)}{\left(\frac{\pi n f_{\text{ВЫХ}}}{f_0}\right)}, \quad (1)$$

где $A(nf_{\text{ВЫХ}})$ - амплитуда n -ой гармоники сигнала на выходе ЦАП.

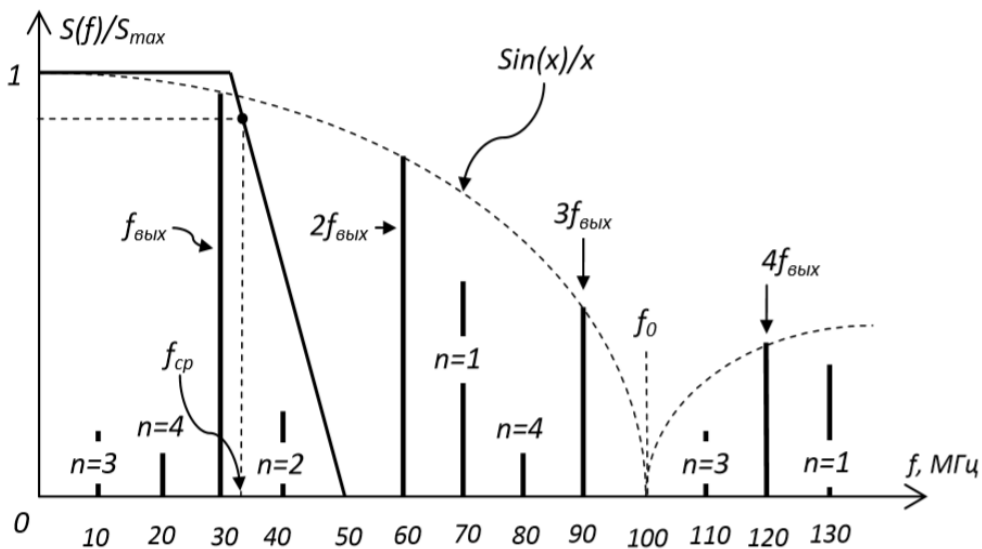


Рис. 5. Распределение гармоник в спектре выходного сигнала синтезатора DDS.

Кроме того, в спектре могут присутствовать комбинационные гармоники вида $f_n = f_0 \pm nf_{\text{ВЫХ}}$, где n – номер гармоники выходного сигнала, находящиеся в полосе пропускания выходного фильтра. Такие составляющие подавить с помощью ФНЧ невозможно.

Также необходимо учитывать, что применяемые ФНЧ отличаются от идеальных. На рис. 6 (а, б) приведена типичная АЧХ для идеального и реального ФНЧ.

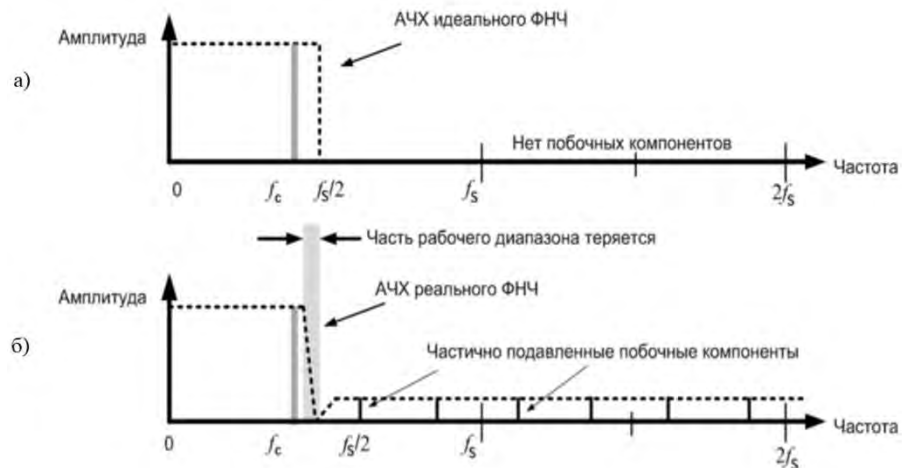


Рис. 6. Характеристики идеального (а) и реального (б) ФНЧ.

Это означает, что шумовые компоненты в спектре формируемого сигнала такой ФНЧ будет подавлять лишь частично.

Программное обеспечение для цифровой части СЧ разрабатывалось в специализированной среде программирования ПЛИС, позволяющей учесть особенности работы схемы на логическом уровне, внутренние задержки переключения элементов и дополнительные задержки при трассировке соединений элементов, требующей значительные ресурсы персонального компьютера (ПК).

Результат разработки цифровой части синтезатора частоты на основе системы автоматизированного проектирования представлен на рис. 7.

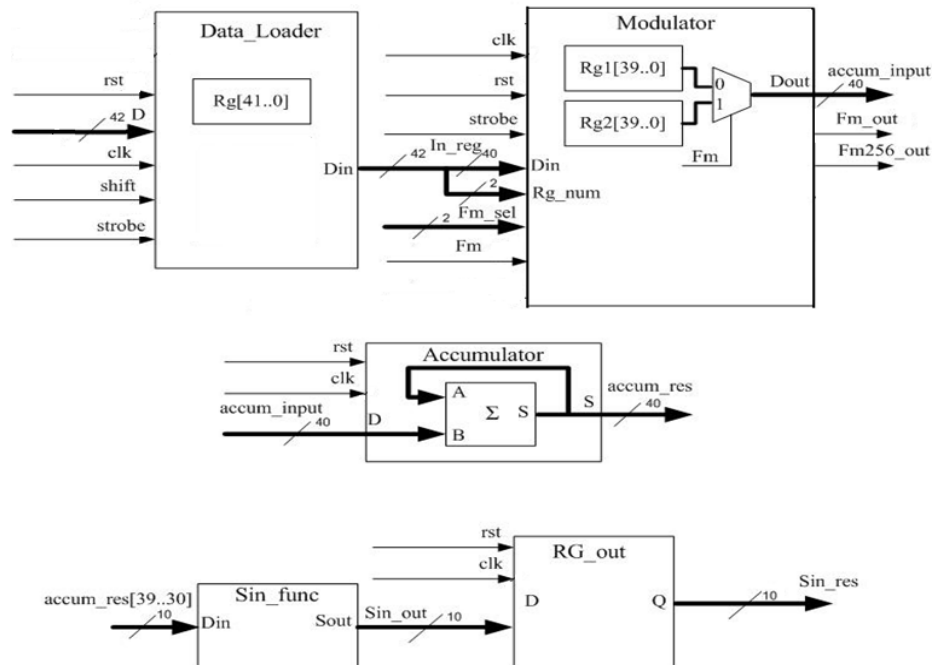


Рис. 7. Цифровая часть синтезатора частоты

Моделирование работы схемы разработанного СЧ было осуществлено в программе ModelSim. На рис. 8, как один из примеров, представлен синусоидальный сигнал, меняющий свою частоту при изменении управляющего сигнала модуляции.

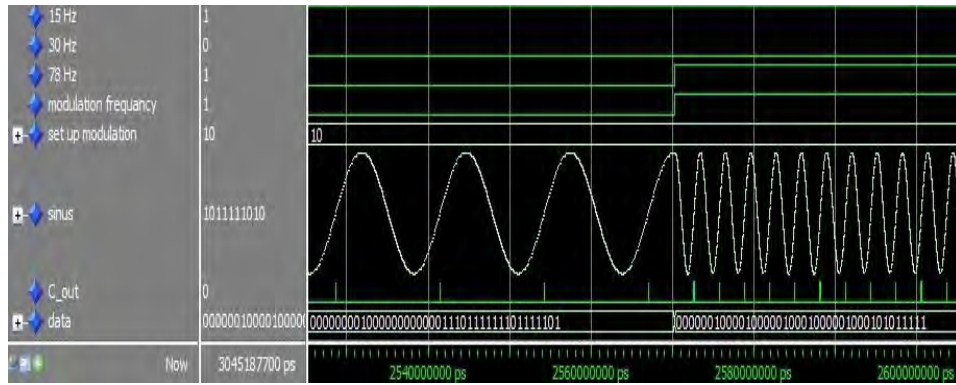


Рис.8. Результат моделирования работы схемы СЧ.

Для проверки спектральных характеристик выходного сигнала СЧ было проведено моделирование режимов его работы в программе MatLab. На рис. 9 представлена математическая модель метода прямого цифрового синтеза, позволяющая с помощью математического моделирования, оценить уровень подавления боковых спектральных составляющих в спектре выходного сигнала СЧ.

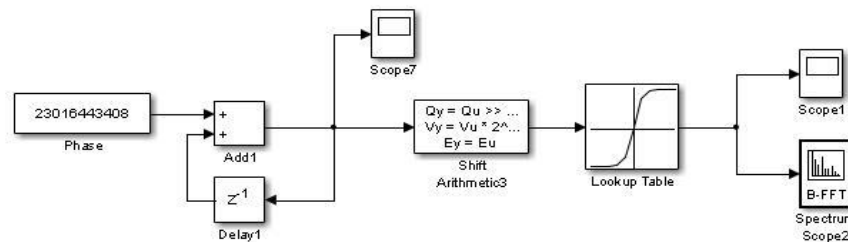


Рис. 9. Схема для исследования спектральных характеристик выходного сигнала.

На рис. 10 и 11 представлены спектральные характеристики выходного сигнала цезиевого синтезатора частоты в разных полосах – 6 кГц и 600 кГц соответственно, полученные в результате моделирования.

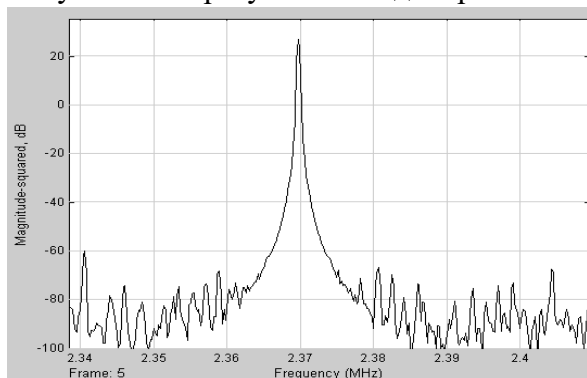


Рис. 10. Спектр выходного сигнала частоты $F=2.369$ МГц в полосе 6 кГц

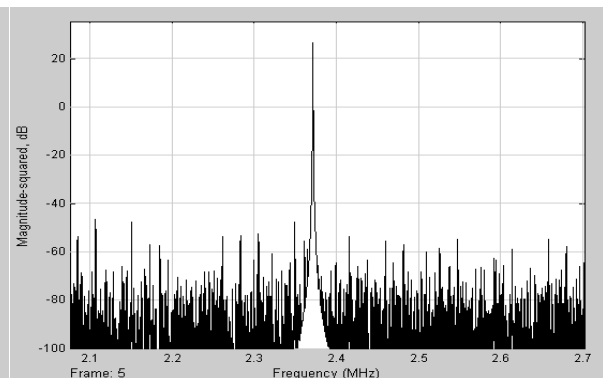


Рис. 11. Спектр выходного сигнала частоты $F=2.369$ МГц в полосе 600 кГц

В качестве примера, на рис. 12 и 13 представлены сравнительные спектральные характеристики выходного сигнала разработанного (а) и ранее применявшегося (б) рубидиевого СЧ, полученные в ходе проведения экспериментов в разных полосах – 6 кГц и 600 кГц соответственно.

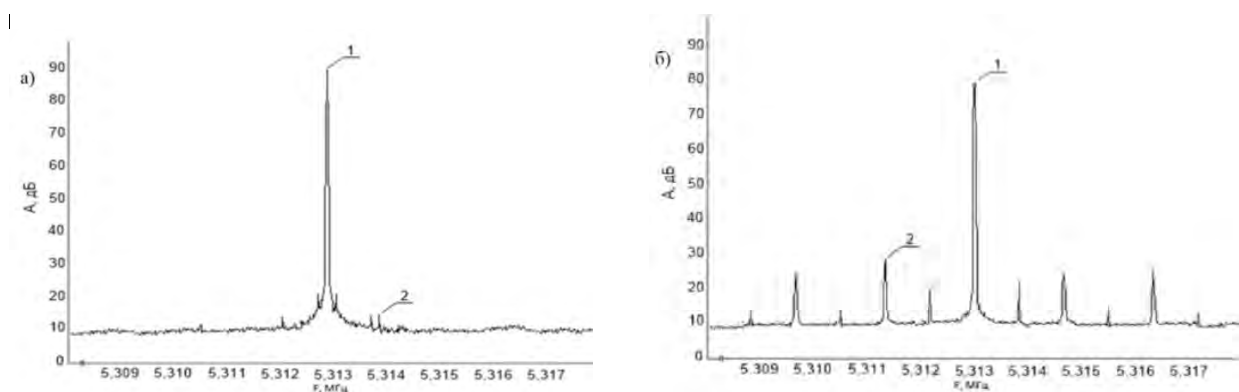


Рис. 12. Подавление амплитуды боковых составляющих в полосе 6 кГц.

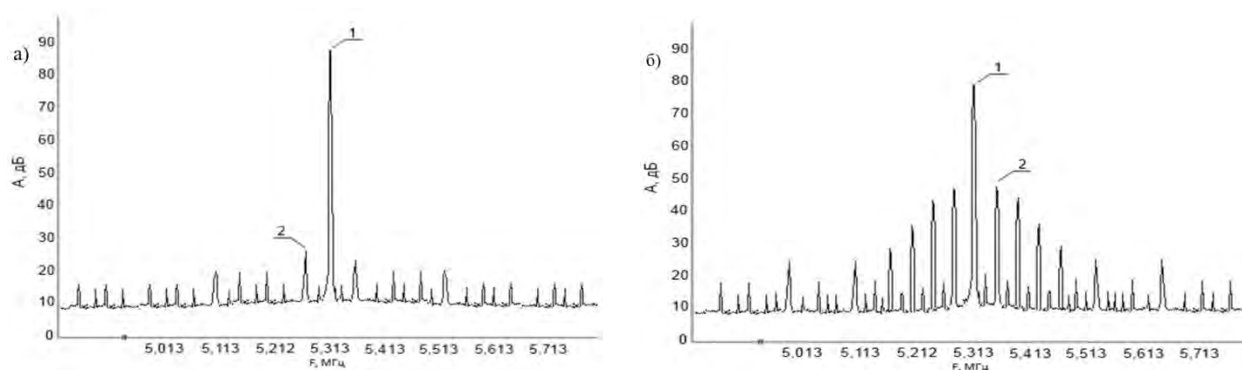


Рис. 13. Подавление амплитуды боковых составляющих в полосе 600 кГц.

Анализ полученных данных показывает улучшение спектральных характеристик выходного сигнала СЧ. Проведенные экспериментальные исследования характеристик выходного сигнала разработанной конструкции СЧ, подтвердили результаты моделирования и показали её большие преимущества в работе по сравнению с ранее используемыми.

Кроме улучшенных спектральных характеристик, напрямую влияющих на характеристики выходного сигнала КСЧ, возможность перестройки выходной частоты СЧ в широком диапазоне позволяет реализовать новый метод стабилизации магнитного поля атомно-лучевой трубки цезиевого стандарта частоты.

Глава 3 посвящена описанию нового метода стабилизации магнитного поля, разработанной системы стабилизации магнитного поля и обсуждению полученных результатов экспериментальных исследований различных характеристик.

Определены все известные эффекты, создающие систематические сдвиги частоты эталонного атомного перехода в атомно-лучевом цезиевом стандарте частоты по величине $> 1 \cdot 10^{-14}$ (Таблица 1).

Анализ данных, представленных в таблице 1, показывает, что влияние нестабильности магнитного поля на величину сдвига частоты центрального резонанса – наибольшее.

Для описания функциональной зависимости частотного сдвига центрального и боковых резонансов от величины магнитной индукции - B и от атомных констант было использовано уравнение Брайта-Раби:

$$E(F, m_F) = -\frac{h\nu}{2(2I+1)} - g_I \mu_B B m_F + \varepsilon \frac{h\nu}{2} \left(1 + \frac{4m_F}{2I+1} x + x^2\right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

Таблица 1. Эффекты, создающие систематические сдвиги частоты центрального перехода $|F=3, m_f=0\rangle \leftrightarrow |F=4, m_f=0\rangle$.

Причина сдвига частоты центрального перехода $ F=3, m_f=0\rangle \leftrightarrow F=4, m_f=0\rangle$	Порядок величины сдвига, относительно частоты центрального перехода атома цезия-133
Влияние магнитного поля (эффект Зеемана)	$\sim 10^{-10}$
Эффект соседних переходов	$\sim 10^{-13}$
Эффект Доплера второго порядка	$\sim 10^{-13}$
Затягивание резонатором	$\sim 10^{-13}$
Чистота спектра сигнала СВЧ возбуждения	$\sim 10^{-13}$
Неоднородность магнитного поля	$\sim 10^{-14}$
Излучение абсолютно черного тела	$\sim 10^{-14}$

Расчет частотных сдвигов резонансных переходов с использованием (2) позволил установить следующее. Резонансный переход $|F=3, m_f=1\rangle \leftrightarrow |F=4, m_f=1\rangle$, отмеченный на рис.14, как «5», имеет линейную зависимость от величины магнитного поля, и при малых величинах магнитного поля сдвиг частоты имеет намного большее значение, чем у перехода $|F=3, m_f=0\rangle \leftrightarrow |F=4, m_f=0\rangle$, отмеченного на рис.14, как «4». Амплитуда частотного отклика резонансного перехода $|F=3, m_f=1\rangle \leftrightarrow |F=4, m_f=1\rangle$ (рис. 14) достаточно велика, что позволяет провести частотную модуляцию по этому резонансному переходу.

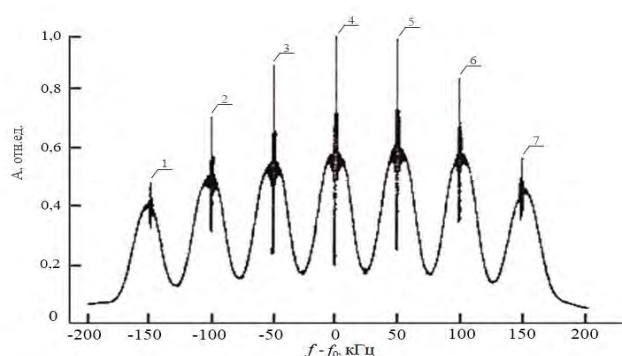


Рис. 14. Структура СВЧ-резонансов в цезиевой атомно-лучевой трубке.

Полученные результаты позволили реализовать новый метод стабилизации магнитного поля цезиевого КСЧ, который заключается в следующем. В ходе работы системы подстройки магнитного поля, среднее значение частоты опроса ν_i изменяется на доли секунды от значения частоты основного перехода атома цезия ν_{Cs} на $\Delta\nu$ - величину разности между переходами при заданном значении магнитного поля. При любом изменении магнитного поля магнитозависимый переход испытывает сдвиг частоты. Это фиксирует система автоматической подстройки и выдает сигнал ошибки, который несет информацию о величине и знаке сдвига частоты. Для определения знака сдвига резонансной частоты магнитозависимого перехода относительно его номинального значения осуществляется частотная модуляция низкочастотным сигналом прямоугольной формы типа меандр. Полученные при этом параметры сигнала ошибки используются системой автоматической подстройки магнитного поля для того, чтобы изменить ток соленоида, пропорционально изменению магнитного поля от его установленного значения. Такая подстройка магнитного поля производится автоматически несколько раз в минуту. Значение магнитного поля автоматически поддерживается на заданном уровне.

В новом методе, поочередно замыкая кольца автоподстройки на центральном и соседнем переходе, система автоподстройки подстраивает и частоту кварцевого генератора к частоте атомного перехода и поддерживает заданное значение магнитного поля внутри атомно-лучевой трубки КСЧ на постоянном уровне.

Использование нового метода позволяет исключить эффекты, связанные с изменениями магнитного поля (например, долговременный дрейф источника тока, температурная зависимость, влияние внешнего магнитного поля и т.д.)

Работа системы стабилизации магнитного поля, реализованная с использованием нового метода, была проверена в составе КСЧ. Квантовый стандарт частоты был размещен в климатической камере для создания разных температурных режимов его работы. В ходе эксперимента происходила непрерывная запись кодов подстройки тока соленоида при различных температурах. Полученная зависимость изменения кодов подстройки тока соленоида от изменения температуры представлена на рис. 15. На рис. 16 представлена зависимость изменения кодов подстройки тока соленоида при 16-ти дневной непрерывной работе КСЧ с новой системой стабилизации магнитного поля в климатической камере при постоянной температуре. Анализ полученных результатов показывает, что с течением времени происходит плавное изменение значений кодов подстройки тока соленоида (здесь изменение кодов подстройки тока также выражено в единицах мА).

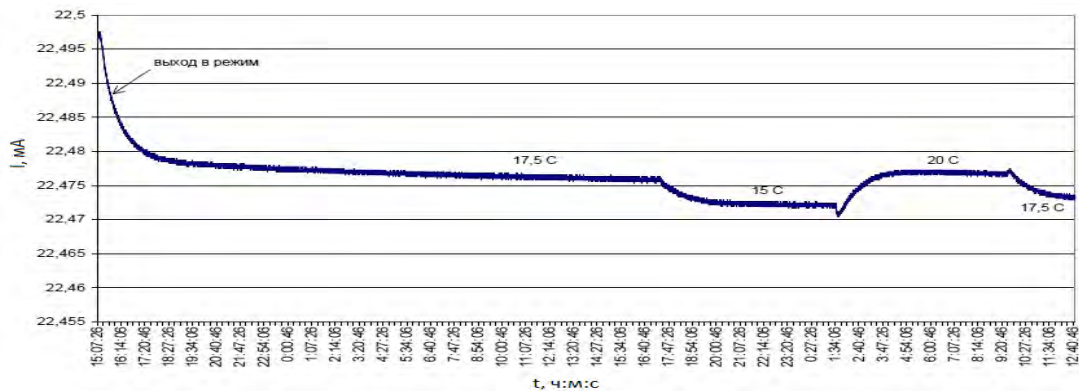


Рис. 15. График изменения кодов подстройки тока соленоида в зависимости от изменения температуры.

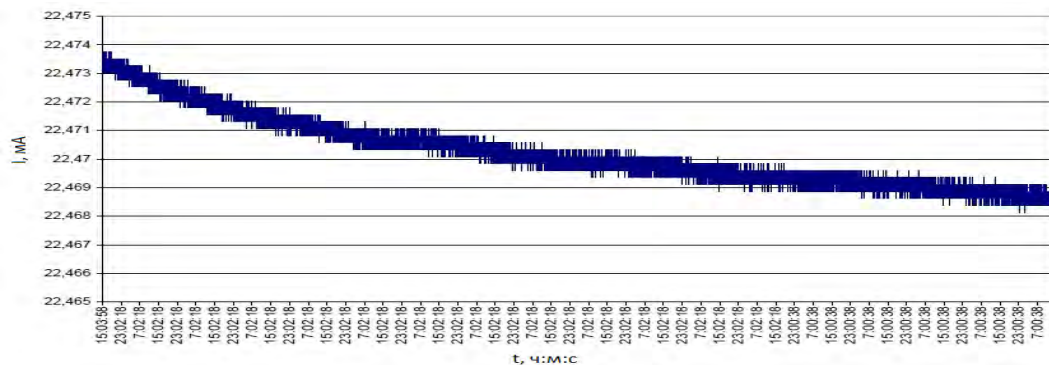


Рис. 16. Дрейф источника тока соленоида при 16-ти дневной непрерывной работе КСЧ.

Это связано с тем, что с течением времени источник тока дрейфует, изменяя при этом значение тока, задающего магнитное поле. Система стабилизации обрабатывает полученный сигнал ошибки и выдает код подстройки тока соленоида, компенсируя дрейф источника тока, и поддерживает значение магнитного поля на заданном уровне.

Разработка системы стабилизации магнитного поля позволяет обеспечивать автоматическое поддержание на заданном уровне значения магнитного поля, исключая

его дрейф. Это приводит к улучшению одной из главных метрологических характеристик цезиевого квантового стандарта частоты - долговременной стабильности частоты.

Использование новой разработанной конструкции СЧ позволила реализовать новый метод многопозиционной девиации работы кольца АПЧ КСЧ на атомах рубидия-87. Этот метод заключается в последовательном переключении рабочей Δf_1 и контрольной Δf_2 частот девиации, как представлено на рис.17.

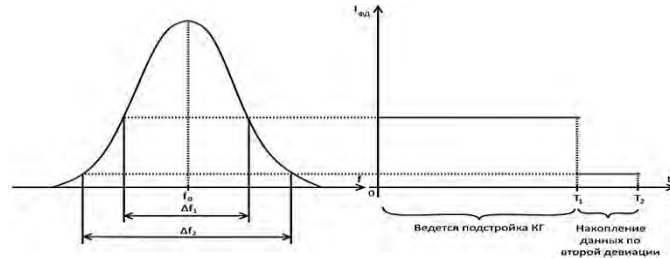


Рис. 17 – Режим работы КСЧ на разных девиациях частоты

По рабочей частоте девиации Δf_1 производится подстройка частоты кварцевого генератора, по контрольной частоте девиации Δf_2 ведется накопление данных о сигнале ошибке I_ϕ , получаемого с выхода квантового дискриминатора, для последующей обработки и оценки ухода выходного сигнала КСЧ.

Оценка результатов, полученных в результате экспериментальных исследований макетного образца квантового стандарта частоты на атомах рубидия-87, показала, что сигнал ошибки I_ϕ по контрольной частоте девиации имеет схожий вид с выходным сигналом исследуемого квантового стандарта частоты, при этом сигнал имеет форму, отличную от линейной. Этот факт показывает возможность отслеживать изменение не только линейного дрейфа, но и более сложные 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, приводящую к улучшению долговременной стабильности частоты выходного сигнала стандарта частоты.

Глава 4 посвящена проведению экспериментов по исследованию метрологических характеристик КСЧ на атомах цезия-133.

На рис. 17 для примера приведены графики зависимости значений дисперсии Аллана от времени для новой и предыдущей конструкции.

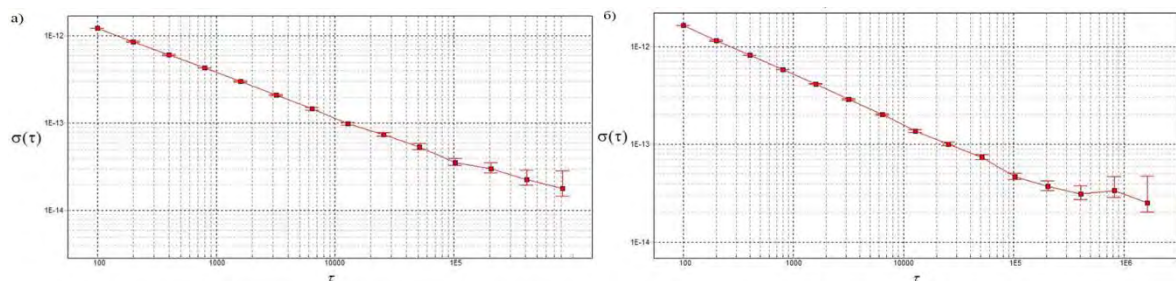


Рис. 17. График зависимости значений дисперсии Аллана от времени: (а) – новая конструкция КСЧ, (б) – ранее используемая.

Анализ полученных результатов экспериментов показал улучшение в новой конструкции КСЧ кратковременной и долговременной нестабильности частоты на 20 %, по сравнению с ранее используемыми КСЧ.

Заключение.

В результате выполнения диссертационной работы были получены следующие результаты:

1. Разработана новая схема построения цифрового синтезатора частоты, позволяющая получать выходной сигнал с установкой менее десятитысячных долей герца. По сравнению с предыдущими схемами построения подавление боковых составляющих в спектре выходного сигнала синтезатора частоты улучшено на 28 дБ, диапазон получаемых частот выходного сигнала синтезатора частоты увеличен на два порядка (до 500 кГц);

2. Установлены основные факторы, оказывающие существенное влияние на чистоту спектральных характеристик выходного сигнала СЧ при использовании в нем метода прямого цифрового синтеза;

3. Использование новой схемы построения синтезатора частоты позволило улучшить температурную стабильность выходной частоты КСЧ, поскольку из новой конструкции СЧ был исключен кварцевый фильтр (элемент, обладающий высокой чувствительностью к изменению температуры). Температурный коэффициент частоты улучшен в 4 раза;

4. Разработана математическая модель процесса синтеза выходной частоты СЧ, учитывающая особенности использования в нем метода прямого цифрового синтеза;

5. Разработана математическая модель для проверки разработанного программного обеспечения и имитации выходных сигналов синтезатора частоты, а также для оценки максимально достижимого уровня подавления боковых составляющих в спектре выходного сигнала синтезатора частоты;

6. Разработан принципиально новый метод автоматической стабилизации магнитного поля для цезиевых и рубидиевых атомных часов, позволяющий поддерживать на заданном уровне значение магнитного поля, исключая его дрейф. Его использование позволило улучшить одну из главных метрологических характеристик КСЧ на атомах цезия - суточную нестабильность частоты на 20 % по сравнению с ранее используемыми конструкциями КСЧ;

7. Разработан принципиально новый метод многопозиционной девиации работы кольца АПЧ в квантовом стандарте частоты на атомах рубидия-87 для улучшения долговременной нестабильности частоты выходного сигнала КСЧ;

8. Использование разработанных новых подходов к синтезу сигнала СВЧ - возбуждения и процессу стабилизации магнитного поля позволило, кроме улучшения метрологических характеристик повысить степень надежности работы стандарта.

Основные публикации по теме диссертации:**Статьи в журналах из перечня ВАК РФ:**

1. **Петров А.А.**, Давыдов В.В. Цифровой синтезатор частоты для квантового стандарта частоты на атомах цезия - 133. // НТВ СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление, Проблемы передачи и обработки информации, НТВ-ИТУ. 2013. № 6(186). С. 45-52.
2. Давыдов В.В., Дудкин В.И., **Петров А.А.** О чувствительности ядерно-резонансных магнитометров с текущей жидкостью. // ПЖТФ. 2016. Т. 42. № 13. С. 64 – 71.
3. **Петров А.А.**, Давыдов В.В. Цифровой синтезатор частоты для атомных часов на парах ¹³³Cs. // Радиотехника и электроника. 2017. Т. 62. №. 3. С. 300 – 306.
4. **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.

5. **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.

Статьи в иностранных журналах, включенных в базу цитирования SCOPUS и Web of Science:

6. **Petrov A.A.**, Vologdin V.A., Davydov V.V., Zalyotov D.V. Dependence of microwave – excitation signal parameters on frequency stability caesium atomic clock. // Journal of Physics: Conference Series. 2015. Vol 643 (1). P. 012087.
7. **Petrov A.A.** Improvement frequency stability of cesium atomic clock satellite communication system. // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). 2015. Vol. 9247. P. 739-744.
8. **Petrov A.A.**, Davydov V.V. New microwave excitation signal generating circuit for quantum frequency standard on the atoms of caesium Cs133. // International Journal of Modern Physics: Conference Series. 2016. Vol. 41. P. 1660142.
9. **Petrov A.A.**, Davydov V.V. New scheme of the microwave signal formation for quantum frequency standard on the atoms of caesium-133. // Journal of Physics: Conference Series. 2016. Vol. 769 (1). P. 012065.
10. **Petrov A.A.**, Davydov V.V., Myazin N.S. Rubidium atomic clock with improved metrological characteristics for satellite communication system. Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). 2017. 10531 LNCS. P. 561-568.
11. 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.
12. **Petrov A.A.**, Shabanov V.E., Zalyotov D.V., Bulyanitsa A.L. // Modernization of the frequency synthesizer of cesium atomic clock. // Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics. EEx-Polytech 2018. 2018. 8564389. P. 52.
13. **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.
14. **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.
15. **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.
16. **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.

Материалы наиболее значимых конференций:

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

всероссийской конференции «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (КВНО-2019). СПб.: ИПА РАН, 2019. – с. 45-46.

3. Улучшение метрологических характеристик квантового стандарта частоты на атомах цезия-133. А.А. Петров, А.П. Валов, Н.М. Гребенникова, В.В. Давыдов. Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании «АПИНО-2018», Санкт-Петербург, Россия, 2018, с. 156-159.