

Акционерное общество
«Российский институт радионавигации и времени»

На правах рукописи

Петров
Александр Анатольевич

**МЕТОДЫ УЛУЧШЕНИЯ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
КВАНТОВЫХ СТАНДАРТОВ ЧАСТОТЫ**

1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики

Научный руководитель
д.ф.-м.н., профессор В.В. Давыдов

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт – Петербург

2021 год

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. КВАНТОВЫЕ СТАНДАРТЫ ЧАСТОТЫ.....	15
1.1 Основные принципы работы квантовых стандартов частоты и времени.....	15
1.1.1 Квантовый стандарт частоты на атомах цезия-133.....	22
1.1.2 Квантовый стандарт частоты на ячейке с атомами рубидия-87.....	32
1.1.3 Стандарты частоты на водородных мазерах	38
1.2 Перспективные модели квантовых стандартов частоты	40
1.2.1 Модели квантовых стандартов частоты с использованием лазерных технологий	41
1.2.2 Оптические стандарты частоты.....	45
1.2.3 Стандарты частоты на основе «ловушки».....	47
1.2.4 Стандарты частоты фонтанного типа	48
1.2.5 Стандарты частоты на основе когерентного пленения населенностей..	48
1.3 Выводы	49
ГЛАВА 2. МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ СИГНАЛА СВЧ ВОЗБУЖДЕНИЯ В КВАНТОВЫХ СТАНДАРТАХ ЧАСТОТЫ НА АТОМАХ ЦЕЗИЯ – 133 И РУБИДИЯ – 87.....	51
2.1.1 Метод формирования сигнала СВЧ - возбуждения в КСЧ на атомах цезия – 133	51
2.1.2 Метод формирования сигнала СВЧ - возбуждения в КСЧ на атомах рубидия – 87	52
2.1.3 Выводы.....	53
2.2. Синтезатор частоты и его влияние на работу квантового стандарта частоты	53
2.3 Обоснование выбора метода синтеза частот для разработки новой	

схемы формирования сигнала СВЧ - возбуждения	57
2.3.1 Системы пассивного синтеза частот.....	58
2.3.2 Системы активного синтеза частот.....	67
2.4 Цифровой синтезатор частоты.....	70
2.4.1 Схема построения и методика расчета характеристик выходного сигнала цифрового синтезатора частоты.....	70
2.4.2 Моделирование работы новой конструкции синтезатора частоты.....	84
2.4.3 Экспериментальное исследование спектральных характеристик синтезатора частоты.....	93
2.5 Выводы.....	98

ГЛАВА 3. МЕТОД СТАБИЛИЗАЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В КВАНТОВЫХ СТАНДАРТАХ ЧАСТОТЫ НА АТОМАХ ЦЕЗИЯ-133 И РУБИДИЯ-87 И МНОГОПОЗИЦИОННОЙ ДЕВИАЦИИ РАБОТЫ КОЛЬЦА АПЧ КВАНТОВОГО СТАНДАРТА ЧАСТОТЫ НА АТОМАХ РУБИДИЯ-87	99
---	----

3.1 Расчет сдвига частоты эталонного перехода атомов цезия, обусловленного флуктуациями магнитного поля.....	99
3.2 Разработка системы стабилизации магнитного поля атомно-лучевой трубки квантового стандарта частоты.....	104
3.3 Экспериментальное исследование работы системы стабилизации магнитного поля атомно-лучевой трубки	107
3.4 Метод многопозиционной девиации работы кольца АПЧ в квантовом стандарте частоты на атомах рубидия-87.....	111

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ КВАНТОВОГО СТАНДАРТА ЧАСТОТЫ НА АТОМАХ ЦЕЗИЯ -133....	114
4.1 Экспериментальная установка и методика измерений	114
4.2 Экспериментальное исследование работы КСЧ на атомах цезия -133 с	

разработанной новой схемой формирования сигнала СВЧ-возбуждения совместно с новой системой стабилизации магнитного поля.....	116
4.3. Выводы.....	120
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	121
ЛИТЕРАТУРА	124
ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ.....	140
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	142
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	143
ПРИЛОЖЕНИЕ 3	145

ВВЕДЕНИЕ

Различные научные разработки в последние несколько десятков лет позволили сделать квантовые стандарты частоты (КСЧ) источником высокостабильных, высокоточных, спектрально-чистых электрических сигналов [1-13]. 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 [1-21].

В настоящее время в мире постоянно расширяется сфера применения спутниковых навигационных систем (СНС) в различных областях человеческой деятельности [18-25]. В Российской Федерации в последнее десятилетие активно развивается СНС ГЛОНАСС, которая, как показывает опыт её эксплуатации, демонстрирует высокие точностные характеристики определения координат, скорости и времени воздушных, морских и наземных подвижных средств и обладает высокой конкурентной способностью по сравнению с американской (GPS), европейской (Galileo) и китайской (БейДоу) [26-33].

Спутниковые навигационные системы (другое название - спутниковые радионавигационные системы) относятся к одной из наиболее динамично развивающихся областей приборостроения и радиотехники [33-39]. Постоянное расширение круга задач, решение которых должны обеспечивать СНС различных модификаций от обеспечения безопасности страны до координации маршрутов движения при организации путешествий и различных соревнований (например, морская регата и т.д.) требует, как разработки новых систем, так и модификации действующих.

Одной из основных проблем, которую необходимо решать разработчикам СНС при обеспечении беззапросного навигационного

определения координат объекта одновременно по нескольким спутникам – это взаимная синхронизация спутниковых шкал времени с точностью до миллиардных долей секунды (наносекунд) [40-44].

Решение задачи высокоточной синхронизации бортовых шкал времени потребовало установки на спутниках высокостабильных бортовых синхронизирующих устройств. Бортовое синхронизирующее устройство (БСУ) является центральным элементом, который определяет точность синхронизации всех наземных и бортовых элементов навигационных систем. В состав БСУ входит несколько квантовых стандартов частоты (КСЧ) различных типов [40, 41, 46].

Квантовые стандарты частоты на атомах цезия-133 (цезиевые атомные часы) играют в БСУ ключевую роль, поскольку обладают наилучшей суточной стабильностью частоты по сравнению с другими КСЧ. Учитывая, что в спутниковой навигационной системе ГЛОНАСС корректировка временных шкал происходит 2 раза в сутки, суточная стабильность частоты КСЧ – очень важный параметр [29, 46, 47].

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

Процесс разработки новых типов КСЧ на основе фундаментальных научных исследований и ввод их в эксплуатацию довольно долгий процесс, который также требует значительных материальных ресурсов. Поэтому в некоторых случаях для решения конкретных задач в навигационных системах и других сферах применения КСЧ, проводятся научные

исследования с целью модернизации его отдельных узлов и блоков. На основе проведенных исследований в процессе модернизации уменьшается масса и размеры КСЧ, снижается энергопотребление, а также улучшаются метрологические (точностные) характеристики стандарта.

Такой процесс модернизации с проведением научных исследований достаточно многообразный и трудоемкий процесс. Поэтому в большинстве случаев модернизации на основе проведенных исследований подвергается не вся конструкция стандарта, а отдельные её узлы и блоки в зависимости от решаемых задач.

Поэтому, в моей диссертационной работе рассматриваются только два блока входящих в состав КСЧ – это синтезатор частоты и устройство стабилизации магнитного поля. Синтезатор частоты является основным элементом конструкции всех типов КСЧ. Это универсальный блок, который при незначительных изменениях в конструкции, может быть использован, к примеру, как в стандарте частоты на атомах цезия – 133, так и рубидия – 87.

Проведенные мною исследования и реализованные на их основе методы обработки сигналов, и конструкторские решения обладают высокой степенью универсальности, и применимы также в КСЧ для устройств наземного и морского применения.

Все это показывает важность, необходимость и актуальность исследований, проводимых в диссертационной работе.

Цель работы

Настоящая работа посвящена разработке новых методов и систем, а также развитию существующих, для проведения исследований, направленных на улучшение метрологических (точностных) 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, 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.

Актуальность исследования

Современные концепции развития космической навигационной системы и метрологической службы исходит из необходимости постоянной модернизации используемых в настоящее время моделей КСЧ или разработке новых на основе фундаментальных научных исследований с целью улучшения их метрологических характеристик для решения различных задач. Процесс модернизации КСЧ также связан с проведением различных прикладных исследований, которые в ряде случаев способствуют успешной реализации фундаментальных научных исследований для разработки новых типов КСЧ.

В последние годы одним из приоритетных направлений повышения тактико-технических характеристик системы ГЛОНАСС является развитие и внедрение технологий создания БСУ с высокой стабильностью выходных сигналов [26, 36-41]. Достижение требуемых точностных характеристик ГЛОНАСС необходимо для сохранения её конкурентоспособного уровня с зарубежными Глобальными Навигационными Спутниковыми Системами (ГНСС) при существующих в системе ГЛОНАСС технологиях закладки эфемеридно-временной информации.

Эти обстоятельства указывают на необходимость в продолжении исследований по улучшению точностных параметров КСЧ на атомах цезия - 133 и рубидия – 87, в настоящее время успешно применяющихся в различных сферах науки и техники, которые я и проводил в рамках подготовки диссертационной работы.

В ведущих научных мировых лабораториях и космических компаниях кроме разработки КСЧ на новых технологиях, также уделяется большое внимание процессу модернизации находящихся в эксплуатации КСЧ. Обзор современных зарубежных публикаций [29, 30, 49-54] это подтверждает. Это еще раз подтверждает, что проводимая мною работа является актуальной и востребованной.

Научная новизна

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 для 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.

Практическая значимость работы

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 течение 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 постройки магнитного поля в АЛТ в КСЧ на атомах цезия-133 и рубидия-87, а также реализовать метод многопозиционной девиации работы кольца АПЧ в КСЧ на атомах рубидия-87.

Разработана принципиально новая автоматическая система стабилизации магнитного поля в КСЧ, которая обеспечивает автоматически поддерживаемое на заданном уровне значение магнитного поля, исключая его дрейф. Её использование позволило улучшить одну из главных точностных 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.

Достоверность и апробация результатов работы

Достоверность научных положений, выводов и результатов, содержащихся в диссертационной работе, подтверждается использованием общеизвестных, апробированных и обоснованных физических методов, комплексным характером выполненных экспериментальных исследований и численных расчетов. Достоверность экспериментальных данных

подтверждается использованием современного высококласного оборудования. Результаты эксперимента согласуются с аналитическими исследованиями, а также с данными полученными другими научными группами исследователей, где возможно сравнение.

Подтверждением полученных результатов, также является опубликование их в статьях различных журналов, входящих в перечень ВАК и индексируемых в международных базах цитирования SCOPUS и WoS и сделанные на международных и всероссийских конференциях доклады с обсуждением полученных результатов исследований.

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались с коллегами на различных конференциях и научных форумах: Международный молодежный научный форум «ЛОМОНОСОВ-2015», «ЛОМОНОСОВ-2017», «ЛОМОНОСОВ-2018», «Ломоносов - 2019» (Москва, 2015 г., 2017 г., 2018 г., 2018 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-технической и научно-методической 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 18th 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-2018: Electrical Engineering and Photonics» (Санкт-Петербург, 2019 г.).

Личный вклад автора:

Все эксперименты, создание математической модели, моделирование и 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.

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.

Структура и объем 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.

ГЛАВА 1. КВАНТОВЫЕ СТАНДАРТЫ ЧАСТОТЫ

1.1. Основные принципы работы квантовых стандартов частоты и времени

Принцип работы квантовых стандартов частоты и времени основан на стабилизации частоты кварцевых генераторов по частоте спектральной линии квантовых переходов атомов или молекул и последующем формировании из сигнала кварцевого генератора сигналов времени [1-13].

Стандарт частоты, в котором используется в качестве опорной частота одной из спектральных линий атомов выбранного вещества, называют атомным. Если в качестве опорной частоты используется одна из спектральных линий молекул выбранного вещества, то его называют молекулярным. Это квантовые стандарты частоты.

Кварцевым называют стандарт, частота колебаний которого определяется собственной частотой кварцевого резонатора.

Стабильность частоты спектральной линии квантового перехода является следствием постоянства атомных констант. Энергия атомов и молекул может принимать лишь вполне определенные дискретные значения. При взаимодействии с внешним электромагнитным полем в определенных условиях могут иметь место переходы с одного энергетического уровня на другой. При этом атом или молекула может поглотить квант энергии электромагнитного поля и перейти на более высокий энергетический уровень или излучить квант энергии и перейти на более низкий энергетический уровень. Переходы под действием внешнего электромагнитного поля носят название вынужденных или индуцированных квантовых переходов, а излучение (поглощение) энергии – вынужденного или индуцированного излучения (поглощения) [1-13].

Переходы с одного энергетического уровня на другой происходят, если выполняется правило частот:

$$f = (E_2 - E_1)/h \quad (1.1)$$

где f – частота внешнего электромагнитного поля; E_1, E_2 - энергии уровней, между которыми происходит переход; h – постоянная Планка.

Квантовые переходы, которые в настоящее время используются для стабилизации частоты, обусловлены магнитными силами взаимодействия валентных электронов и ядер в атомах элементов первой и третьей групп периодической системы Д. И. Менделеева (водород, натрий, рубидий, цезий, талий). Они связаны с изменением ориентации магнитного момента электрона μ_e относительно магнитного момента ядра μ_I , которые в сумме образуют полный магнитный момент атома (рис. 1.1).

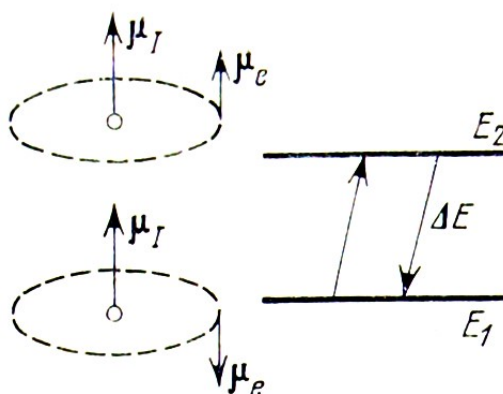


Рис. 1.1. Возникновение энергетических уровней при изменении ориентации магнитного момента электрона

Магнитный момент электрона может иметь одно из двух возможных направлений: совпадающее с моментом ядра или ему противоположное, вследствие чего полный момент атома может принимать два значения. Два возможных значения приобретает и механический вращательный момент атома F , равный векторной сумме вращательных моментов (спинов)

электрона S и ядра I . Каждому значению полного момента атома соответствует состояние с определенной величиной энергии.

Ядро атома, вращаясь вокруг своей оси в магнитном поле электрона, с классической точки зрения ведет себя подобно гироскопу. Ось вращения такого гироскопа прецессирует вокруг направления магнитного поля электрона. Частота прецессии, называемая Ларморовской частотой:

$$f_{\lambda} = \mu_I H_e / hI, \quad (1.2)$$

где H_e - магнитное поле в месте расположения ядра, создаваемое вращением электрона. Для атома цезия, например, $H_e = 2,4 \cdot 10^5$ А/м и $f_{\lambda} = 9,192$ ГГц.

Поведение атома в СВЧ поле можно пояснить с помощью рис. 1.2.

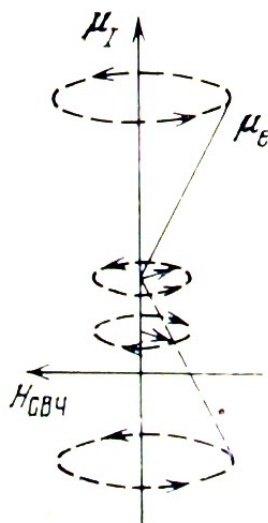


Рис. 1.2. Поведение атома в СВЧ поле.

Линейно-поляризованная магнитная компонента СВЧ поля состоит из двух векторов, поляризованных по кругу и вращающихся в противоположных направлениях. При этом вращение одного из векторов совпадает с направлением прецессии оси электрона вокруг направления магнитного поля ядра, а вращение другого не совпадает. Когда частота СВЧ

поля равна частоте прецессии, первый вектор вращается синхронно с прецессирующей осью электрона. В системе координат, связанной с электроном и вращающейся с ним, воздействие этого вектора будет постоянным и способствующим «опрокидыванию» спина электрона. Такое «опрокидывание» означает переход атома с уровня $F_1 = I + S$ на уровень $F_2 = I - S$ с выделением кванта энергии, $h\nu_{12} = E_1 - E_2$. Второй вектор будет дважды за период вращения взаимодействовать со спином электрона. При этом силы, воздействующие на магнитный момент электрона, равны по величине и противоположны по направлению, поэтому они не влияют на переходы.

В состоянии термодинамического равновесия уровни F_1 и F_2 заняты практически одинаковым числом атомов. Для выявления свойств энергетического перехода необходимо создать преимущественную населенность одного из энергетических уровней. Если населенность верхнего уровня будет больше, то при облучении СВЧ полем, частота колебаний которого совпадает с частотой атомного перехода (случай резонанса), индуцируются переходы с выделением энергии. В обратном случае наблюдается поглощение энергии СВЧ поля.

Все существующие квантовые меры частоты подразделяют на активные и пассивные.

В каждом КСЧ можно выделить два основных блока. Один из них обеспечивает наблюдение спектральной линии, т. е. является квантовым репером частоты. Во втором блоке частота репера преобразуется к необходимому значению. Реперы частоты подразделяются на активные и пассивные. Активный репер, генерирует колебания, частота которых определяется спектральной линией вещества, а пассивный репер по спектральной линии поддерживает постоянство частоты вспомогательного генератора. Соответственно квантовые стандарты частоты называют

активными или пассивными. В КСЧ используются вещества с узкими спектральными линиями и с очень слабой зависимостью частоты квантовых переходов от внешних воздействий.

На первый взгляд схемы КСЧ, соответствующие этим классам похожи (рис. 1.3 и 1.4). Рассмотрим их более подробно.

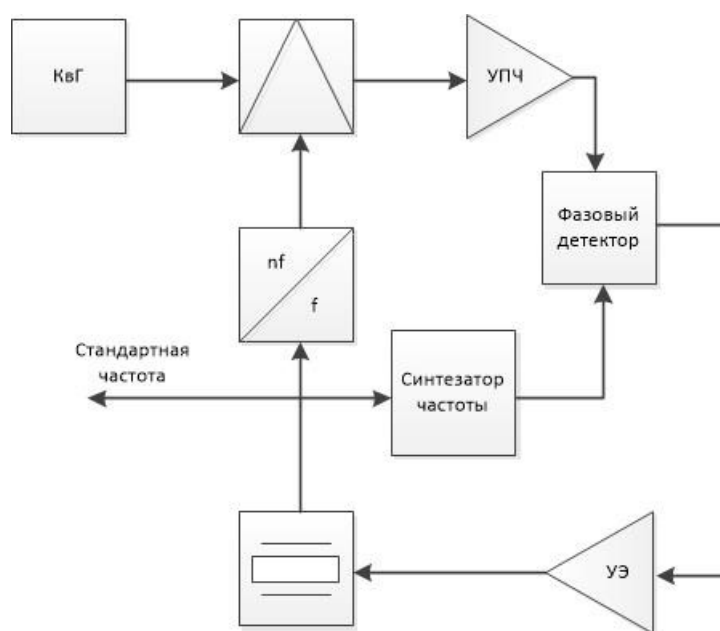


Рис. 1.3. Структурная схема стандарта частоты на основе квантового генератора

Квантовые генераторы имеют малую выходную мощность ($10^{-12} \dots 10^{-10}$ Вт) в СВЧ диапазоне, поэтому в качестве выходного сигнала стандарта используют сигнал кварцевого генератора, частота которого с помощью системы фазовой автоподстройки (ФАП) стабилизируется по частоте квантового генератора.

Системы ФАП могут реализовываться по-разному. Наиболее общей считают систему, изображенную на рис. 1.3. Частота сигнала кварцевого генератора увеличивается до значения, близкого к значению частоты квантового генератора (КвГ), и смешивается с его сигналом в смесителе.

Выходной сигнал смесителя с промежуточной частотой, равной разности смешиваемых частот, поступает на УПЧ, затем на фазовый детектор.

Опорным сигналом для фазового детектора служит сигнал синтезатора, частота которого равна промежуточной частоте. Через управляющий элемент (УЭ) сигнал ошибки с фазового детектора подстраивает частоту кварцевого генератора с погрешностью, определяемой флуктуациями в системе ФАП, стабилизируя ее по частоте квантового генератора.

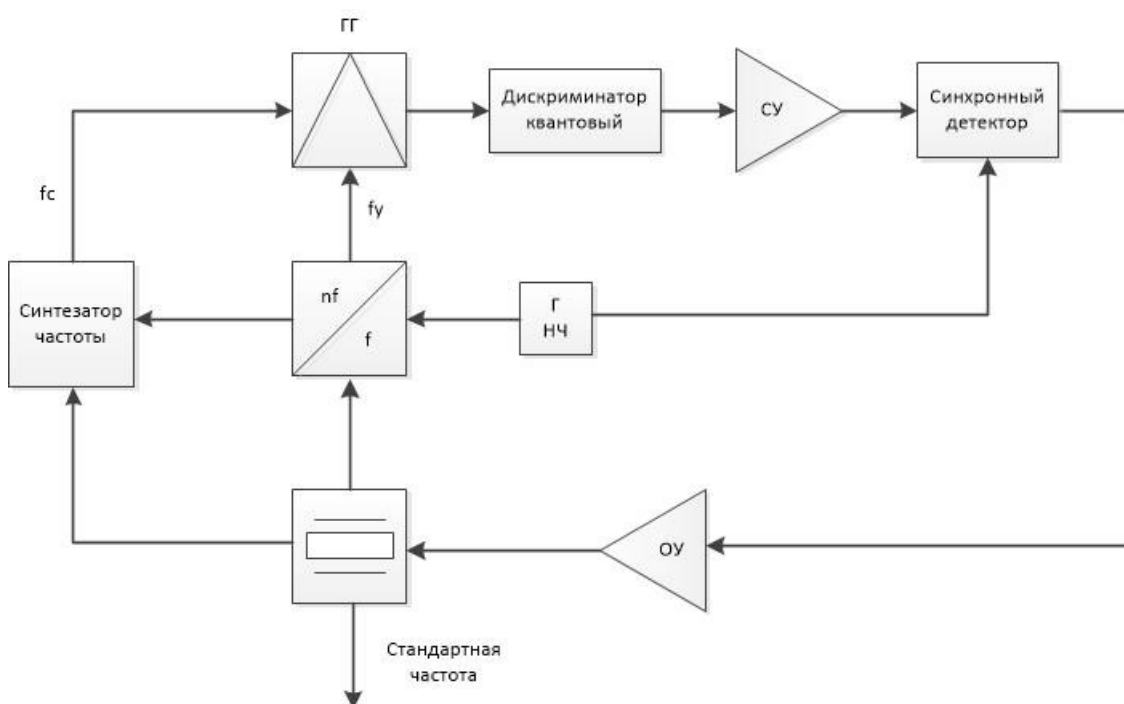


Рис. 1.4. Структурная схема стандарта частоты на основе квантового дискриминатора

Стандарт частоты на основе квантового дискриминатора представляет систему частотной автоподстройки (ЧАП) кварцевого генератора по частоте спектральной линии атомного перехода.

Наибольшее распространение получила схема, представленная на рис. 1.4.

Сигнал с кварцевого генератора умножается до частоты f_y , усиливается и поступает на генератор гармоник (ГГ). Сюда же подается сигнал с

синтезатора частоты f_c . На выходе генератора гармоник образуется спектр частот $nf_y \pm mf_c$, $m, n = 0, 1, 2 \dots$. Нужная гармоника, совпадающая с частотой атомного перехода, выделяется резонатором, в котором находятся атомы используемого для стабилизации вещества.

Сигнал с выхода дискриминатора несет информацию об отклонении частоты сигнала кварцевого генератора от частоты линии атомного перехода. Для определения знака отклонения частоты в одном из каскадов умножителя производится фазовая модуляция умножаемой частоты кварцевого генератора.

Полученный с выхода дискриминатора сигнал ошибки усиливается селективным усилителем, выделяющим первую гармонику частоты модуляции, и подается на синхронный детектор, вырабатывающий постоянное напряжение соответствующей полярности, пропорциональное частотной расстройке кварцевого генератора.

Опорный сигнал поступает с модулирующего генератора. С выхода синхронного детектора сигнал ошибки фильтруется RC – фильтром или усиливается операционным усилителем (ОУ), работающим в режиме интегрирования, и поступает на управляющий элемент кварцевого генератора. С помощью этого элемента частота кварцевого генератора стабилизируется (с погрешностью, обусловленной флуктуациями в системе ЧАП) по частоте линии атомного перехода дискриминатора [1-13].

Поскольку данная диссертационная работа посвящена модернизации и улучшению характеристик квантовых стандартов частоты классического типа на атомах цезия-133 и рубидия-87, в последующих двух разделах данной главы более подробно рассмотрены физические основы работы данных КСЧ. Для более полной картины представления о квантовых стандартах частоты, в последующих разделах главы приведен краткий обзор

разработок различных типов КСЧ, работающих на других физических принципах.

1.1.1 Квантовый стандарт частоты на атомах цезия-133

С момента первых разработок квантового стандарта частоты на атомах ^{133}Cs (цезиевые атомные часы) в начале 1950-х годов прошло более 70 лет. За это время менялась электроника, материалы из которых изготавливаются различные функциональные блоки и многое другое. Но структурная схема цезиевых атомных часов принципиальных изменений не претерпела [1-12]. Её классический вариант представлен на рис. 1.5.

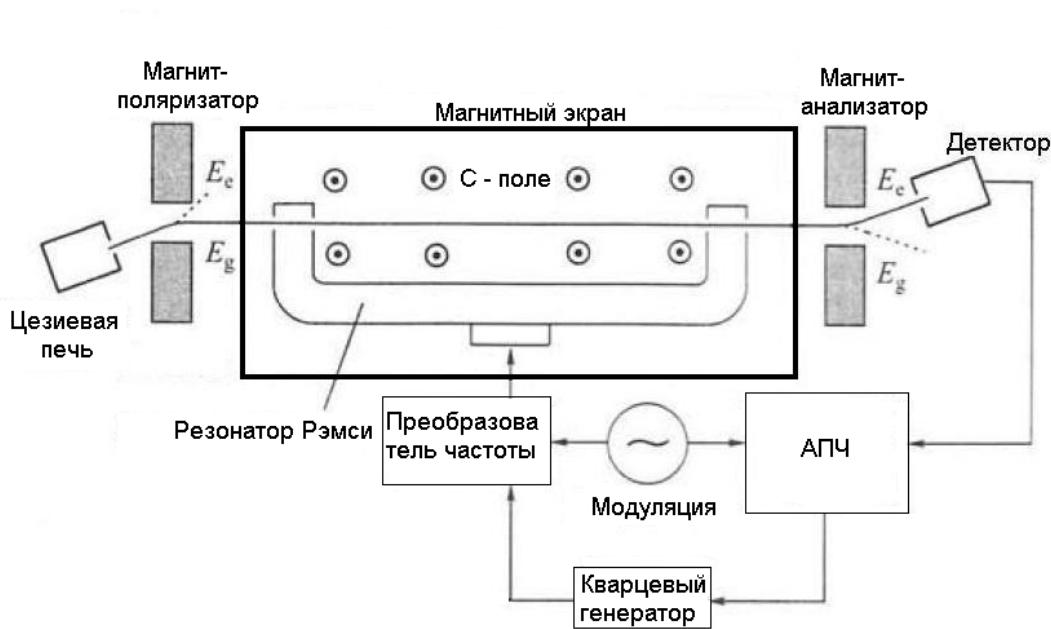


Рис. 1.5. Структурная схема квантового стандарта частоты на атомах ^{133}Cs

Принцип работы цезиевых атомных часов основан на принципе подстройки частоты высокостабильного кварцевого генератора по частоте квантового перехода атомов цезия ^{133}Cs в атомно-лучевой трубке (АЛТ). Необходимо отметить, цезиевые атомные часы относятся к пассивным типам КСЧ.

Выходной сигнал от кварцевого генератора с частотой 5 МГц подается на преобразователь частоты (ПЧ). В состав преобразователя частоты входит несколько связанных между собой блоков, в которых формируется СВЧ сигнал с частотой атомного перехода. В состав ПЧ входит синтезатор частоты (СЧ), генератор гармоник (ГГ) и умножитель частоты (УЧ). В СЧ частота входного сигнала 5 МГц преобразуется в частоту 12,631 МГц. С выхода СЧ сигнал частоты 12,631 МГц поступает на генератор гармоник (ГГ) ПЧ. В ПЧ частота входного сигнала 5 МГц умножается до частоты 270 МГц и сигнал этой частоты также поступает на ГГ. В генераторе гармоник осуществляется фазовая модуляция сигнала частоты 270 МГц сигналом частоты 12,631 МГц, в результате чего выходной сигнал СВЧ на выходе ПЧ содержит ряд комбинационных частот, в том числе частоту 9192,631 МГц, которая используется в работе КСЧ. С выхода ПЧ СВЧ сигнал по волноводному тракту поступает на волноводный вход АЛТ.

Параметры АЛТ – резонансная частота f_0 и добротность – слабо зависят от внешних условий. Это позволяет использовать АЛТ в качестве высокодобротного дискриминатора, по которому производится подстройка частоты кварцевого генератора (КГ).

Принципиальное устройство современных АЛТ имеет много общего с оригинальным прототипом, разработанным в Национальной физической лаборатории в Англии Эссеном и Пэрри [3]. Пары цезия образуются в печи, разогретой до температуры около 373 К, в которой находится несколько граммов цезия. С помощью сопла или системы каналов формируется пучок атомов цезия с тепловым распределением скоростей.

Единственный стабильный изотоп ^{133}Cs имеет квантовое число ядерного спина, равное $I=7/2$. Учитывая, что квантовое число полного момента электронной оболочки составляет $J=1/2$, атом цезия в основном состоянии имеет два сверхтонких подуровня с квантовыми числами $F=I+J=4$ и $F=I-J=3$, которые расщепляются в магнитном поле на 9 ($+4 \leq m_f \leq -4$) и 7 ($+3 \leq m_f \leq -3$)

компонентов (рис.1.6). В цезиевых часах используется переход, обладающий наименьшей чувствительностью к магнитному полю, а именно, переход между состояниями $|F=4, m_f=0\rangle \leftrightarrow |F=3, m_f=0\rangle$ (рис. 1.7).

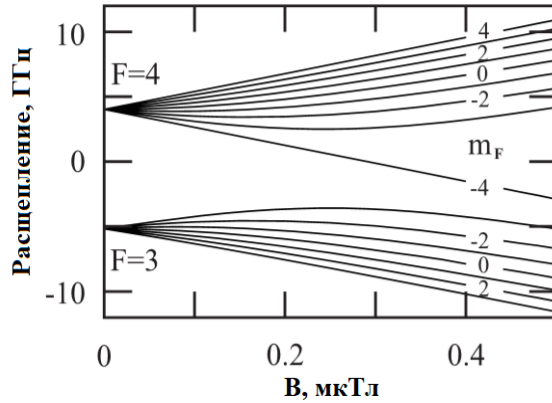


Рис. 1.6. Энергии магнитных компонентов сверхтонких подуровней с $F=3$ и $F=4$ уровня $6s^2S_{1/2}$ в ^{133}Cs в зависимости от магнитного поля.

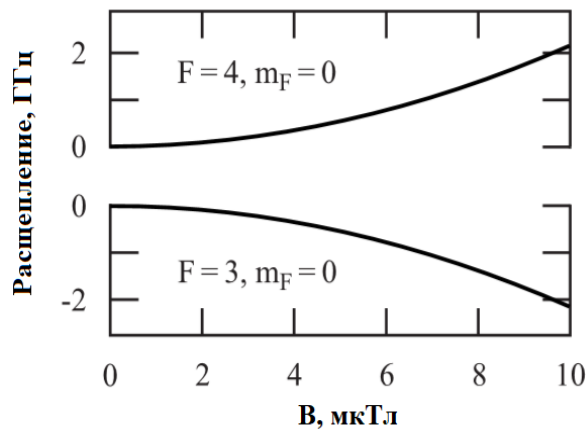


Рис. 1.7. Переход между состояниями $|F=4, m_f=0\rangle \leftrightarrow |F=3, m_f=0\rangle$.

Для возбуждения магнитного дипольного перехода с $\Delta m_f = 0$ магнитная составляющая осциллирующего возбуждающего поля должна быть направлена вдоль магнитной оси квантования. Переходы между компонентами с $m_f \neq 0$ обладают линейным эффектом Зеемана в слабых магнитных полях в диапазоне нескольких мкТл (рис. 1.6). В таких магнитных полях уровни с $m_f=0$ обладают квадратичной зависимостью от индукции

поля В. В этом случае сдвиг частоты, зависящий от магнитного поля, можно оценить используя следующее соотношение:

$$\Delta\nu_{B^2} \approx 4.2745 * 10^{-2} \text{ Гц} * \left(\frac{B}{\text{мкТл}}\right)^2, \quad (1.3)$$

где В – величина индукции магнитного поля.

В современных конструкциях КСЧ на атомах ^{133}Cs перед взаимодействием с СВЧ - полем атомы цезия подготавливаются соответствующим образом. Перед взаимодействием с электромагнитным полем они должны находится либо на уровне $F=4, m_f=0$, либо на уровне $F=3, m_f=0$. Электромагнитное поле вызывает их переходы на соответствующий незаселенный уровень. Измеряя населенность этого уровня после взаимодействия атомов с электромагнитным полем, можно определить частоту опрашивающего поля, при которой вероятность перехода оказывается максимальной. Данная частота корректируется с учетом всех известных эффектов, приводящих к сдвигам относительно частоты невозмущенного перехода, и полученный сигнал используется для генерации стандартной частоты или секундного импульса каждые 9192631770 периодов осцилляций.

Так как энергии уровней $F=3$ и $F=4$ незначительно отличаются друг от друга, можно считать, что населенность этих уровней в атомном пучке практически одинакова. Но для регистрации перехода между уровнями атомный пучок должен состоять из атомов лишь в одном состоянии. В обычных цезиевых атомных часах атомы в определенном состоянии отбираются по своему магнитному моменту. Анализ энергетических уровней (рис. 1.6) показывает, что энергия атома Cs, находящегося на подуровне $F=3$ в любом из магнитных состояний, уменьшается с увеличением значения индукции В (при $B > 0,4$ Тл). Это утверждение справедливо и для состояния

$F=4$, $m_f=-4$. Во всех остальных магнитных состояниях энергия атомов сверхтонкого подуровня $F=4$, в свою очередь, растет незначительно с увеличением магнитного поля. В присутствии градиента магнитного поля $\text{grad}B(z)$ вдоль оси z потенциальная энергия атома W будет зависеть от координаты. Это приведет к возникновению силы F , действующей на атомы Cs:

$$F_{\text{mag}} = -\frac{\partial W}{\partial z} = -\frac{\partial W}{\partial B} * \frac{\partial B}{\partial z} \quad (1.4)$$

Кроме градиента поля, сила F определяется эффективным магнитным моментом, который пропорционален производной по магнитному полю [5].

Атомы, вылетающие из печи, отклоняются с помощью магнитного поляризатора, в котором создается неоднородное магнитное поле, в соответствии с их магнитным моментом. Такая магнитная селекция используется для приготовления атомного пучка, у которого заселен только один из метрологических подуровней с $m_f=0$. Поскольку силы, действующие на атомы, в состояниях $F=3$, $m_f=0$ и $F=4$, $m_f=0$ направлены в противоположные стороны (рис. 1.7), атомы, находящиеся в одном из состояний, выводятся из пучка, отклоняясь в противоположную сторону. В схеме, представленной на рис. 1.5, предположим, что из пучка выводятся атомы в состоянии $F=4$, $m_f=0$, и, следовательно, в пучке, попадающем в зону взаимодействия с переменным магнитным полем, остаются только атомы в основном состоянии с энергией E_g . В зоне взаимодействия находится U-образный микроволновый резонатор, настроенный на частоту 9.192 ГГц.

В качестве резонатора используется стандартный волновод с прямоугольным сечением, торцы которого закрыты с помощью проводящих пластин. Резонатор необходимо согнуть (рис. 1.5), чтобы атомный пучок пересекал его дважды вблизи торцов, влетая и вылетая через маленькие отверстия в стенках резонатора. У резонатора поперечные размеры выбраны

таким образом, чтобы линии напряженности магнитного поля стоячей волны, формирующейся внутри резонатора, были перпендикулярны плоскости изображения. Резонатор подпитывается микроволновым сигналом от кварцевого осциллятора, управляемого напряжением. Атомы в состоянии E_g пересекают первую область взаимодействия в U – образном микроволновом резонаторе, после чего, спустя некоторое время, они попадают во вторую область взаимодействия, что соответствует возбуждению по схеме Рэмси. Поле в резонаторе может вызвать переход с уровня $F=3$ на уровень $F=4$, вероятность которого зависит от разности между частотой поля в резонаторе и частотой атомного перехода. Вторая магнитная система – анализатор – отклоняет атомы, находящиеся на верхнем уровне в детектор. Необходимо отметить, что в зависимости от расположения в детектор могут попадать атомы цезия, возбужденные в резонаторе, либо атомы, оставшиеся в основном состоянии. При этом на одной и той же частоте наблюдается пик или провал соответственно.

Для того, чтобы снять вырождение по магнитным подуровням и обеспечить возможность селективного возбуждения метрологического перехода $|F=4, m_f=0\rangle \leftrightarrow |F=3, m_f=0\rangle$, область взаимодействия помещается в однородное магнитное поле. Традиционно это поле называется С - полем, по аналогии с полями поляризатора (А - полем) и анализатора (В - полем). Напряженность поля подбирается таким образом, чтобы обеспечить компромисс при выполнении двух противоречащих друг другу условий. Так, оно должно быть достаточно сильным, чтобы разделить микроволновые резонансы по частоте. При этом С – поле сдвигает резонансную частоту метрологического перехода (1.3). Этот сдвиг необходимо корректировать для получения частоты невозмущенного перехода. Кроме этого, увеличение напряженности С – поля приводит к увеличению уровня флуктуаций и, соответственно, уровню шумов частоты перехода. В промышленных цезиевых часах С – поле обычно создается с помощью катушки, обмотка

которой расположена вокруг резонатора. Поскольку частота перехода зависит от напряженности магнитного поля, необходимо использовать магнитные экраны для подавления внешнего магнитного поля и его флуктуаций.

Одним из видов детекторов, которые используются в атомных цезиевых часах, для регистрации атомов цезия является ионизационный детектор. Этот детектор состоит из вольфрамовой или иридиево – платиновой ленты, которая нагрета до высокой температуры. Так как работа выхода электрона у атома цезия (1.7эВ) существенно ниже, чем у вольфрама (4.5эВ), то атом цезия легко ионизируется на раскаленной проволоке, отдавая внешний электрон. Накладывая внешнее напряжение, можно регистрировать положительно заряженные ионы цезия, например, с помощью электрода Фарадея. В современных конструкциях цезиевых атомных часов используется масс-спектрометр для того, чтобы отделить ионы цезия от других ионов, которые образуются вблизи детектора. После этого ионы цезия направляются на первую ступень электронного умножителя, который усиливает поток электронов, эмитированных при столкновении ионов с катодом. В отличие от прямого метода регистрации ионов цезия с помощью электрода Фарадея, описанный метод обладает гораздо меньшей постоянной времени. Это позволяет использовать более высокие частоты модуляции микроволнового поля, что требуется для стабилизации частоты кварцевого генератора относительно частоты атомного резонанса.

Сканирование частоты генератора ν вблизи частоты атомного резонанса ν_0 приводит к возникновению сигнала на токовом детекторе, аналогично тому, который представлен на рис 1.8.

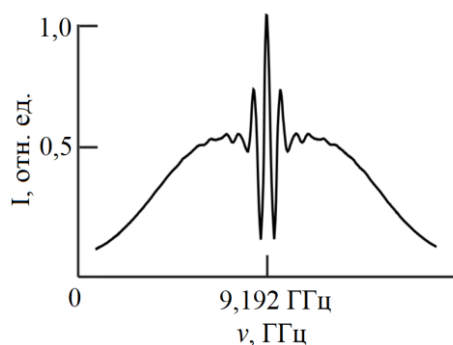


Рис.1.8. Зависимость тока детектора I на выходе АЛТ от частоты возбуждения СВЧ-поля на ее входе.

Спектральная линия состоит из интерференционных полос резонанса Рэмси на широком пьедестале Раби [1-13]. Атомы, возбужденные когерентным образом при прохождении двух зон взаимодействия в резонаторе, формируют интерференционные резонансы Рэмси. Усреднение интерференционной картины по широкому тепловому распределению по скоростям приводит к быстрому снижению контраста боковых полос. Пьедестал Раби, в свою очередь, соответствует доплеровски уширенной линии перехода, возбуждаемой независимо в каждой из зон взаимодействия [3].

Частота КГ стабилизируется относительно максимума центральной полосы, что соответствует частоте атомного перехода ν_0 . При расстройке частоты КГ и, следовательно, частоты СВЧ-сигнала от значения, соответствующего частоте атомного перехода ν_0 , в АЛТ вырабатывается сигнал ошибки, который несет информацию о величине расстройки.

Для определения знака расстройки частоты СВЧ-сигнала относительно значения ν_0 осуществляется частотная модуляция выходного сигнала СЧ частоты 12,631 МГц низкочастотным сигналом прямоугольной формы типа меандр. В результате модуляции сигнала частоты 12,631 МГц СВЧ-сигнал оказывается модулированным по частоте, что приводит к появлению в выходном сигнале АЛТ составляющих переменного тока с частотами,

равными частоте модуляции и ее удвоенному значению, и называемыми первой и второй гармониками сигнала ошибки (рис. 1.9). На этом рисунке представлен принцип формирования образования первой и второй гармоник сигнала ошибки при изменении среднего значения частоты СВЧ-сигнала (ν_1 , ν_0 , ν_2) в полосе частот около 1 кГц и девиации частоты относительно среднего значения в результате НЧ прямоугольной модуляции. В том случае, когда частота СВЧ-сигнала точно совпадает с частотой атомного перехода ν_0 , сигнал первой гармоники отсутствует, а импульсы сигнала второй гармоники имеют максимальное значение. При расстройке частоты СВЧ-сигнала от значения ν_0 в выходном сигнале АЛТ появляется сигнал первой гармоники, амплитуда которого пропорциональна величине расстройки ν_0 , а фаза определяется знаком расстройки относительно ν_0 .

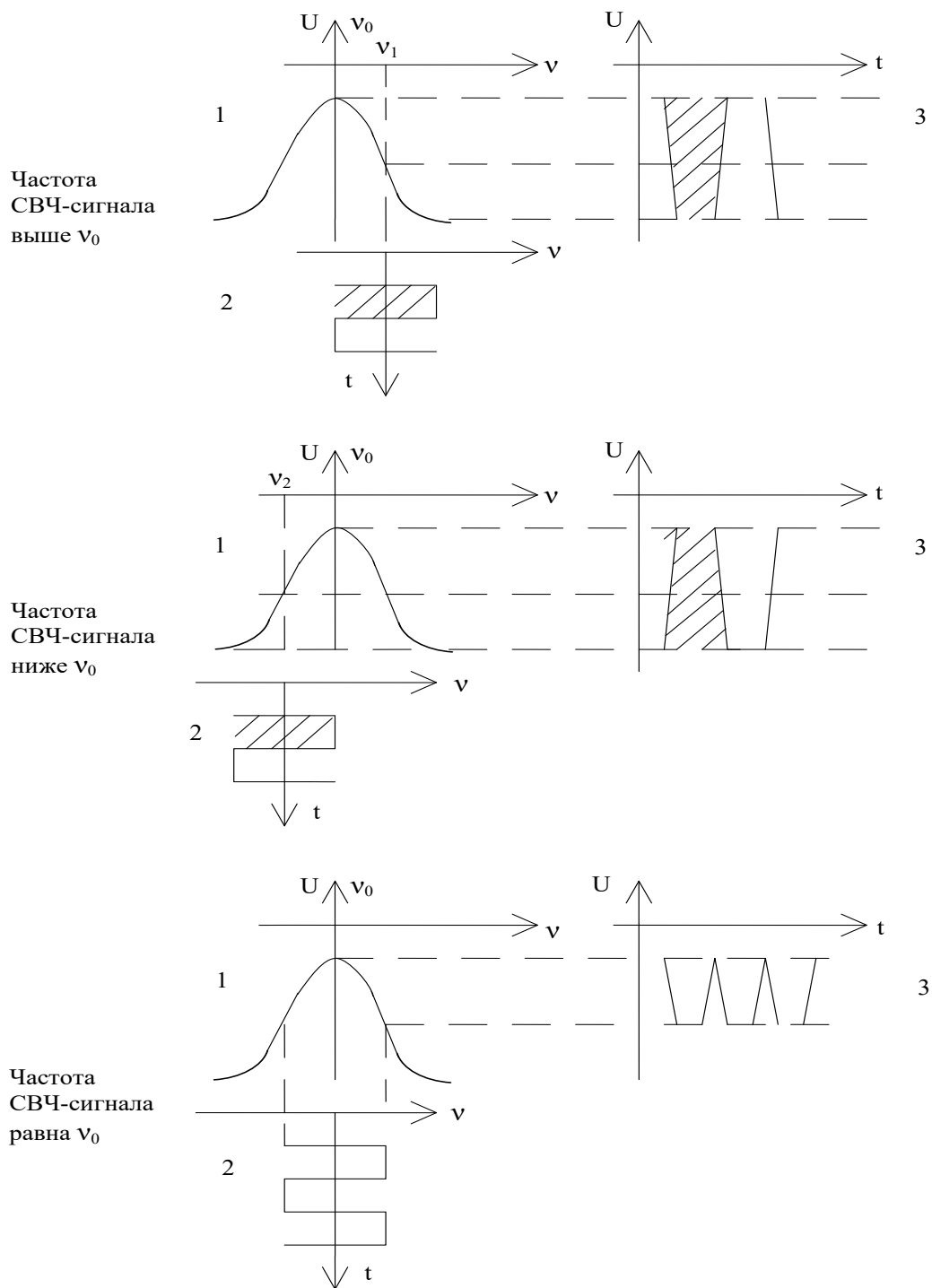


Рис. 1.9 Форма выходного сигнала атомно-лучевой трубки при различных расстройках частоты кварцевого генератора и использовании прямоугольной низкочастотной модуляции сверхвысокочастотного сигнала возбуждения, где 1 – резонансная линия АЛТ (амплитудно-частотная характеристика квантового дискриминатора); 2 – СВЧ - сигнал частотно-модулированный прямоугольным НЧ сигналом; 3 – выходной сигнал АЛТ.

Сигнал с выхода АЛТ поступает на вход системы автоматической подстройки частоты (АПЧ). Система АПЧ производит оцифровку сигнала ошибки, суммирует значения нескольких преобразований за один полупериод частоты модуляции, а затем получает разность значений сигнала в соседних полупериодах, определяя, таким образом, величину и направление расстройки КГ. Полученный сигнал преобразуется в управляющее напряжение, поступающее на варикап подстройки частоты КГ. Система АПЧ формирует управляющее напряжение такой величины, чтобы компенсировать уход действительного значения частоты (ДЗЧ) КГ относительно значения, соответствующего частоте атомного перехода АЛТ.

Цезиевые стандарты частоты являются серийно производящимися приборами [2, 3]. По габаритам они подходят для размещения в 19-дюймовой приборной стойке и имеют массу менее 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) [2, 3, 8-12].

Цезиевые стандарты частоты, прежде всего, используются в метрологических лабораториях времени. Так, при создании атомной временной шкалы (ТАИ) специальным образом усредняются показания около двухсот часов. Также цезиевые часы используются в наземном и в космическом сегментах глобальных систем спутниковой навигации (ГНСС) (GPS, ГЛОНАСС и GALILEO).

1.1.2 Квантовый стандарт частоты на ячейке с атомами рубидия-87

Квантовые стандарты частоты на ячейках с атомами Rb^{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 Cs^{133} . Работа этого КСЧ на атомах Rb^{87} основана на стабилизации частоты кварцевого генератора по узкой спектральной линии радиочастотного резонанса в оптически ориентированных атомах рубидия [1-8, 49-51]. Как для цезиевых атомных часов за многие годы эксплуатации структурная схема КСЧ на ячейке с атомами рубидия Rb^{87} не сильно изменилась. На рис. 1.10 представлен один из её базовых вариантов.

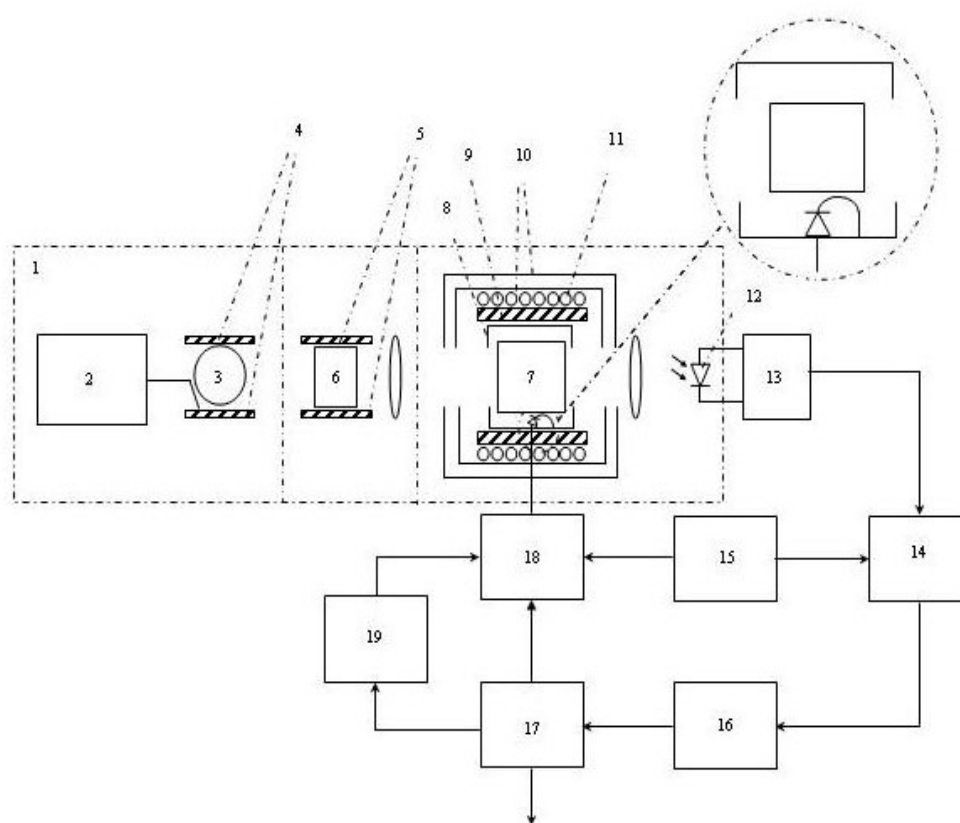


Рис. 1.10 Структурная схема КСЧ на ячейке с атомами рубидия Rb^{87} (классическая схема): 1 – квантовый дискриминатор; 2 – ВЧ генератор; 3 – газоразрядная безэлектродная спектральная лампа; 4 – термостатирование лампы; 5 – термостат ячейки-фильтра; 6 – ячейка-фильтр; 7 – газовая ячейка; 8 – резонатор; 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.

Основным элементом КСЧ на атомах Rb^{87} является квантовый дискриминатор, где формируется линия поглощения, по центральной частоте которой происходит подстройка частоты кварцевого генератора КСЧ. Принцип работы дискриминатора заключается в пропускании через газовую ячейку, содержащую рабочее вещество, резонансного излучения и одновременного приложения к ней электромагнитного поля, с частотой, близкой к частоте атомного перехода между уровнями сверхтонкой (СТ) структуры основного состояния. В результате интенсивность света, проходящего через ячейку света, будет тем меньше, чем ближе частота электромагнитного поля к частоте атомного перехода рубидия.

Важной особенностью КСЧ на атомах рубидия является наличие изотопов атомов Rb^{87} и Rb^{85} с близким по частоте расположением атомных уровней. Благодаря этому, появляется возможность эффективной фильтрации одной из компонент, что позволяет создать преимущественное заселение одного из подуровней СТ структуры атомов рубидия.

Конструктивно атомный дискриминатор содержит источник резонансного излучения 3, создающего оптическую накачку, изотопный фильтр 6, осуществляющий фильтрацию одной из СТ - компонент излучения источника и газовую ячейку.

Для снижения влияния магнитного поля Земли резонатор квантового дискриминатора помещается в магнитный экран 10. Кроме того, рабочая ячейка помещена в слабое магнитное поле, снимающее вырождение с уровней сверхтонкой структуры и позволяющее работать с переходами $\Delta F=1$, $\Delta m_F=0$, слабо зависящими от внешнего магнитного поля.

Сигнал радиооптического резонанса формируется в газовой ячейке 7, расположенной в резонаторе 8 квантового дискриминатора 1. Излучение лампы имеет спектр, в котором наиболее интенсивными являются резонансные линии головных дублетов атома рубидия, соответствующие переходам из состояния $5P_{1/2}$, $5P_{3/2}$ в $5S_{1/2}$ с длинами волн 780 и 794,76 нм

соответственно, также называемыми D2 и D1 резонансными линиями. Сверхтонкая структура основного состояния и первого возбужденного электронного состояния изотопов Rb^{87} и Rb^{85} представлена на рис.1.11.

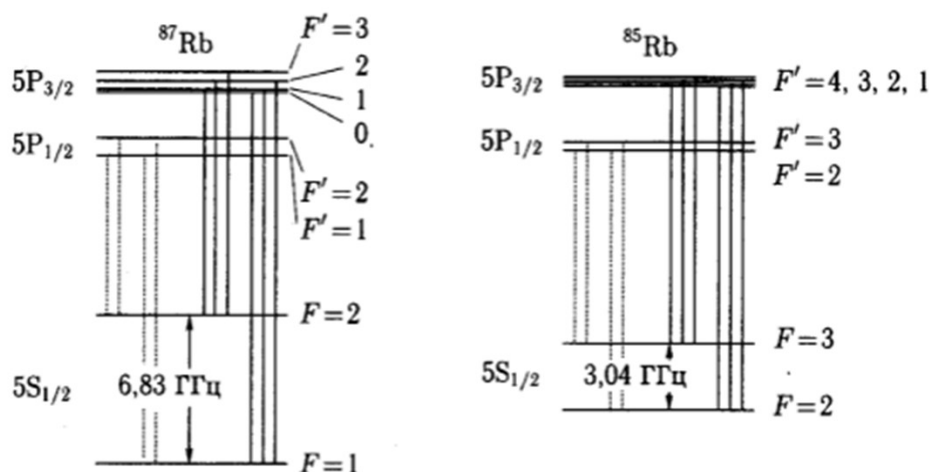


Рис. 1.11. Сверхтонкая структура основного состояния и первого возбужденного электронного состояния изотопов Rb^{87} и Rb^{85}

Кроме того, на рис. 1.11 представлено СТ расщепление в возбуждённом и основном состоянии. Расщепление уровней основного состояния используется для оптической накачки и наблюдения радиооптического резонанса. Для реализации радиооптического резонанса на рабочую ячейку с Rb^{87} необходимо воздействовать светом со спектральными компонентами D_1F_1 и D_2F_1 [2, 3]. В результате ансамбль атомов будет переводиться с $5S_{1/2}$ подуровня $F=1$ в возбуждённые состояния $5P_{1/2}$ и $5P_{3/2}$. Из этих состояний система будет релаксировать в основное состояние, причём на подуровень $F=2$ с большей вероятностью, чем на $F=1$ (это связано с числом состояний на каждом уровне – g -фактором, вероятность перехода пропорциональна g , у состояния $F=1$ $g=3$, а для $F=2$ $g=5$). Поскольку с подуровня $F=1$ идёт перекачка атомов в возбуждённые состояния ($5P_{1/2}$ и $5P_{3/2}$), то появляется инверсная населённость между этими уровнями. Происходит “перекачка”

атомов с подуровня $F=1$ на $F=2$ через возбуждённые состояния. Для этого необходимо облучать ячейку светом, содержащим компоненты D_1F_1 и D_2F_1 и не содержащим компоненты D_1F_2 и D_2F_2 . Для получения такого излучения, излучение от источника света 3 пропускается через изотопный фильтр 5, наполненный парами Rb^{85} и инертным газом при давлении 150...200 мм рт. ст. В качестве источника света используется безэлектродная спектральная лампа 3 с парами Rb^{87} и инертным газом при давлении 3 мм рт. ст., возбуждаемая высокочастотным автогенератором 2 и помещённая в термостат для получения оптимальной интенсивности излучения (наиболее яркого излучения при минимальной реабсорбции). Это связано с тем, что у Rb^{85} и Rb^{87} почти совпадают (разница 1300 МГц) частоты переходов из возбуждённых состояний на верхний подуровень СТ основного состояния. Таким образом, при пропускании света спектральной лампы через ячейку-фильтр происходит поглощение компонент D_1F_2 и D_2F_2 , и проходящий свет практически не будет содержать этих компонент.

Одновременно с облучением ячейки 7 светом накачки на неё воздействуют резонансным СВЧ полем, подаваемым в резонатор. Резонансное СВЧ поле формируется из частоты кварцевого генератора умноженной до 60 МГц множителем частоты 19 и параметрически умноженной в резонаторе на 114 (114-я гармоника образуется на СВЧ диоде и выделяется резонатором) и подмешиваемого в резонатор сигнала синтезатора частоты (5.314500 МГц). В результате в резонаторе появляется СВЧ поле с частотой $(60 \cdot 114 - 5,314500)$ МГц, что соответствует частоте атомного перехода. При совпадении частот перехода между подуровнями основного состояния и этого поля будут происходить индуцированные переходы с верхнего подуровня на нижний, и, в результате населённость между этими подуровнями будет выравниваться, а это вызовет дополнительное поглощение света накачки, а, следовательно, будет уменьшаться интенсивность света, проходящего через рабочую ячейку.

Проходящий свет попадает на фотоприёмник. Так как частота СВЧ поля внешнего генератора модулируется по частоте, то результирующий сигнал на выходе фотоприемника модулируется по амплитуде [3]. На выходе дискриминатора наблюдается вторая гармоника сигнала ошибки с частотой равной частоте модуляции приложенного СВЧ поля. Такой выходной сигнал несёт в себе информацию о величине и знаке расстройки частоты внешнего генератора относительно частоты рабочего перехода.

Сигнал с выхода дискриминатора усиливается усилителем сигнала 13. Усилитель сигнала – двухкаскадный, первый каскад которого осуществляет преобразование фототока в напряжение, а второй – усиливает переменную составляющую сигнала до требуемого уровня его обработки.

В зависимости от смещения подаваемого в резонатор СВЧ-частоты относительно центра линии поглощения, у амплитуды первой гармоники выходного сигнала КД меняется фаза сигнала [1-8]. Это позволяет, используя синхронный детектор 14, получить на его выходе постоянное напряжение, знак которого соответствует знаку расстройки частоты СВЧ относительно атомного перехода, а амплитуда пропорциональна величине отклонения. Данное напряжение после фильтра нижних частот 16 поступает на кварцевый генератор 17 и обеспечивает его подстройку под центр линии.

В качестве выхода из стандарта выводятся реперная частота (например, 5 МГц) напрямую от кварцевого генератора. Потребляемая мощность рубидиевого стандарта обычно около 20 – 30 Вт при постоянной работе и несколько повышается в режиме начального разогрева.

Нестабильность частоты рубидиевых стандартов находится на уровне $(1-2) \cdot 10^{-12} \sqrt{c/\tau}$ для времени измерения от 1 с до 1000 с [3]. 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 [3].

Рубидиевые стандарты частоты характеризуются уходом частоты (дрейф частоты), который составляет несколько единиц на 10^{-11} в месяц [1-8, 49-51]. Поэтому для использования его в качестве репера частоты требуется калибровка относительно более точного стандарта. Рубидиевые часы (стандарты) часто используются в комбинации с системой GPS [29, 30]. По сигналу системы GPS рубидиевые стандарты подстраиваются на длительных интервалах времени измерения. Как правило, алгоритм калибровки подбирается таким образом, чтобы сигнал GPS подстраивал стандарт на интервалах от 1000 с до 10000 с [29, 30].

Рубидиевые стандарты частоты востребованы, прежде всего, из-за их компактного размера и низкой цены. Они находят широкое применение в областях, где требуется стабильность на уровне 10^{-12} , поскольку цена кварцевых генераторов с такими показателями становится очень высокой.

Рубидиевые стандарты также востребованы в тех областях, где критично наличие непрерывного сигнала меток времени, причем от системы требуется возможность работы в автономном режиме. Стандарты с коррекцией по GPS используются в тех случаях, где необходима высокая кратковременная стабильность сигнала и для внутренней синхронизации в случае слабого или недоступного сигнала системы GPS.

Рубидиевые стандарты частоты используются в радиовещании, аналоговой и цифровой передаче телевизионных сигналов, навигации, военных системах слежения, передачи и наведения.

1.1.3 Стандарты частоты на водородных мазерах

Кроме цезиевых и рубидиевых стандартов частоты классического типа, существуют другие микроволновые стандарты на нейтральных атомах. Так,

например, водородные мазеры, превосходят наилучшие цезиевые часы по стабильности на коротких и средних интервалах измерения.

Современные конструкции водородных КСЧ имеют лишь незначительные отличия от прототипа прибора, созданного научным коллективом Нормана Рэмси [3]. На рисунке 1.12 представлена схематическая конструкция такого водородного мазера, теория водородного мазера подробно описана в следующих работах – [1-7, 55-59],

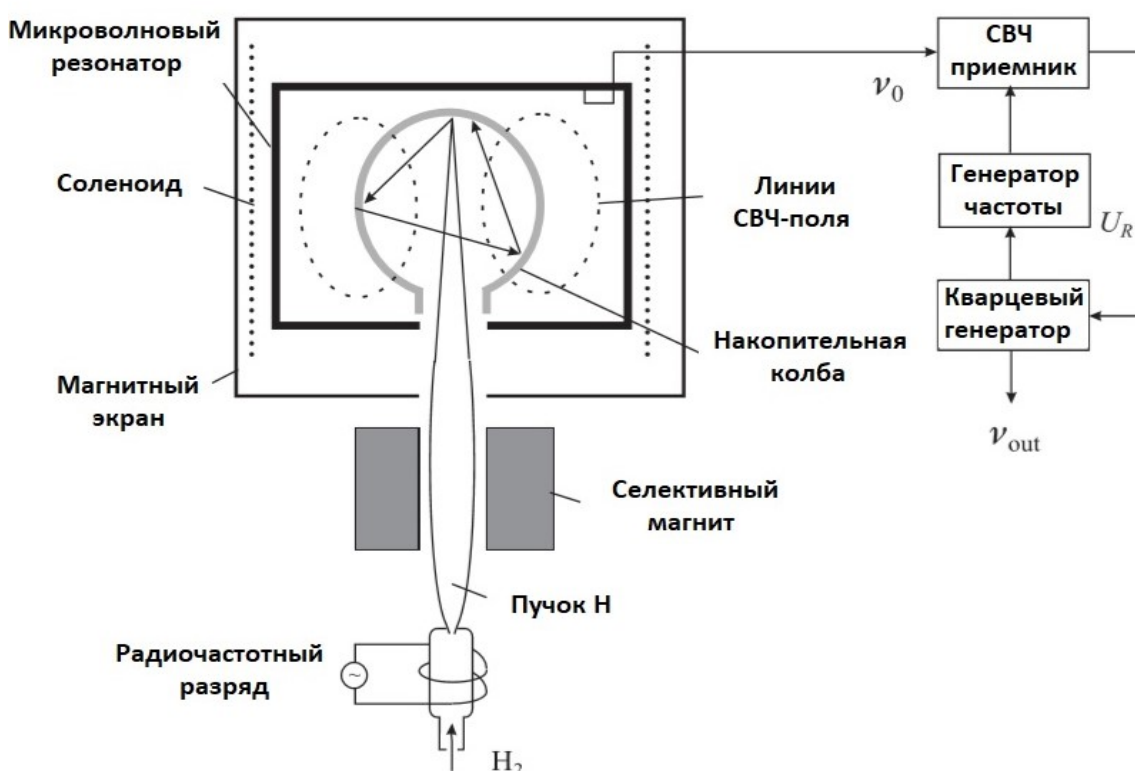


Рисунок 1.12 – Схематическая конструкция водородного мазера.

Наряду с «активным» водородным мазером, существуют и «пассивные» приборы аналогичного типа. В таких приборах вместо режима автогенерации атомного ансамбля используются резонансное усиление внешнего микроволнового поля ансамблем атомов в возбужденном состоянии.

В «пассивном лазере» используется внешний генератор, сигнал которого заводится в резонатор. Резонансная линия детектируется с помощью наблюдения усиленного сигнала, и частота внешнего генератора подстраивается к максимуму выходного сигнала обычным способом. Пассивные водородные мазеры, в отличие от активных мазеров, обладают меньшим весом и габаритами, однако уступают им в нестабильности частоты, особенно за короткие интервалы времени [1-7, 55-57].

Водородные мазеры (стандарты) используются в таких областях как передача сигналов времени, навигация, слежение за космическими кораблями и при выполнении экспериментов в области фундаментальных исследований. Исключительно высокая стабильность мазеров на интервалах времени от 10 с до суток обеспечивает их преимущество перед Cs часами в это временном интервале. В лабораториях времени для увеличения кратковременной стабильности синтезируемых шкал времени обычно используется несколько водородных стандартов [55-57].

В качестве бортовых часов пассивные водородные стандарты используются в системах глобальной спутниковой навигации (ГНСС GALILEO и «БейДоу»).

1.2 Перспективные модели квантовых стандартов частоты

На данном этапе развития классические квантовые стандарты частоты (на атомно-лучевой трубке, на рубидиевой газовой ячейке, пассивный и активный водородные стандарты) по точностным характеристикам практически подошли к теоретическому пределу, поэтому особое значение приобрело развитие стандартов на новых принципах работы.

Повышение точности ШВ национальных служб времени происходит за счёт развития первичных эталонов на основе квантовых стандартов частоты (КСЧ) «неклассических» типов. В России, США, Европе, Японии и Китае

проводятся интенсивные исследования и разработки стандартов частоты и времени 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 [2, 3, 60-68].

1.2.1 Модели квантовых стандартов частоты с использованием лазерных технологий

В последнее время стало востребованным новое направление квантовой стабилизации частоты, связанное с использованием лазеров для целей оптической накачки и замедления атомных пучков. Ожидается, что использование новых физических принципов позволит удовлетворить новым требованиям, предъявляющимся к КСЧ, в связи с бурным развитием научно-технического прогресса.

На сегодняшний день существуют различные конструкции КСЧ с использованием лазеров: КСЧ на атомах рубидия-87 с лазерной накачкой, КСЧ на атомах рубидия-87 с импульсной лазерной накачкой, КСЧ на атомах цезия-133 с лазерной накачкой и детектированием и др. [2, 3, 60, 61, 68].

Главным преимуществом использования лазеров является узкий спектр излучения, обеспечивающий более эффективную оптическую накачку.

Более подробно рассмотрим принцип работы КСЧ на атомах цезия с лазерной накачкой и детектированием и отметим принципиальные отличия от схемы КСЧ с магнитной селекцией. На рис.1.13 представлена структурная схема такого КСЧ.

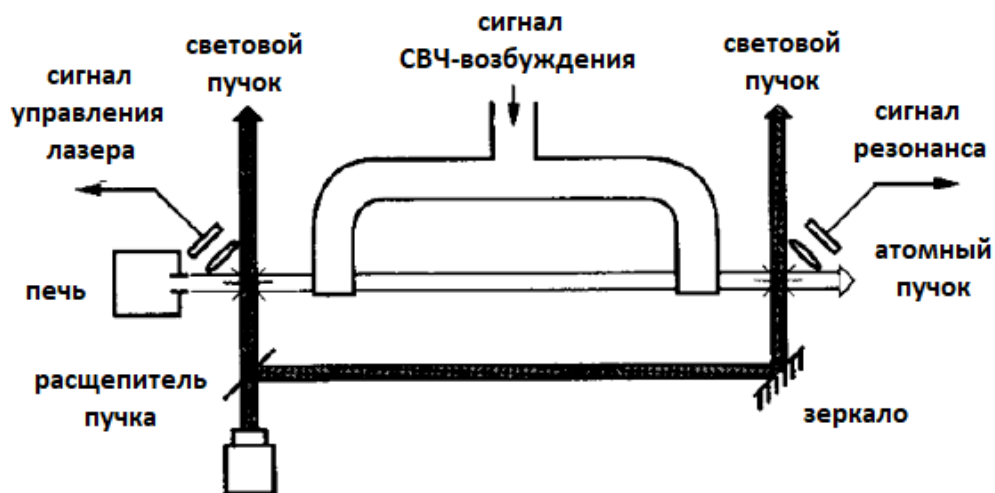


Рис.1.13. Структурная схема КСЧ на атомах цезия-133 с лазерной накачкой и детектированием.

Как и в классической структурной схеме, здесь присутствует цезиевая печь, которая формирует пучок атомов цезия. Также присутствует резонаторная полость с двумя зонами взаимодействия. Сигнал СВЧ-возбуждения создается методами, аналогичными классической схеме КСЧ, обработка сигнала резонанса и подстройка по нему частоты кварцевого генератора, также производится по известному алгоритму.

Принципиальное отличие от классической схемы КСЧ является отсутствие селекционирующих магнитов и наличия лазерного излучения создающего оптическую накачку и детектирование вместо них.

В классической схеме КСЧ, в результате магнитной селекции, в зоне взаимодействия с полем резонатора участвуют лишь атомы, находящиеся в основном состоянии с проекцией полного момента атома $m_F = 0$ сверхтонкого подуровня $F=3$ или атомы, находящиеся в основном состоянии с проекцией полного момента атома $m_F = 0$ сверхтонкого подуровня $F=4$.

Как видно из вышесказанного, в цезиевых атомно-лучевых стандартах, использующих классическую схему селекции вклад в наблюдаемый сигнал вносит лишь 1/16 часть атомного пучка (около 6 %), поскольку все магнитные подуровни, энергетический зазор между которыми лежит в

области сантиметрового диапазона длин волн, заселены при комнатных температурах практически одинаково.

Применение лазерной оптической накачки позволяет существенно увеличить населенность одного из двух основных состояний.

Лазерный пучок, в схеме, представленной на рис.1.13, разделяется на две части с помощью полупрозрачного зеркала. Полученные таким образом пучки лазерного излучения пересекают пучок атомов цезия-133 с каждой стороны резонаторной полости. В зоне их пересечения создается магнитное поле, которое способствует расщеплению сверхтонкой структуры атомов цезия-133.

Селекция состояний происходит в первой зоне оптического взаимодействия. В результате такого взаимодействия атомы цезия переводятся с одного уровня сверхтонкой структуры основного состояния, т.е. $F=3$ или $F=4$, на другой.

В случае, изображенном на рис.1.14 а, лазерное излучение с длиной волны $\lambda=852,355$ нм возбуждает переходы между подуровнями сверхтонкой структуры основного и возбужденного состояний с $F=4$ и $F'=3$ соответственно.

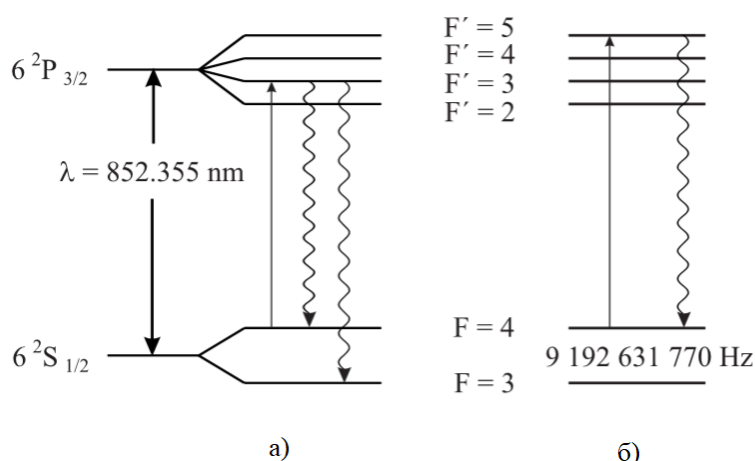


Рис.1.14. Одна из схем оптической накачки атома цезия-133.

Атомы, возбужденные в состояние с $F'=3$, имеющие время жизни около 30 нс, спонтанно распадаются на сверхтонкие подуровни основного

состояния с $F=3$ и $F=4$. Через несколько циклов возбуждения-излучения вся населенность окажется перекачана с уровня $F=4$ на уровень с $F=3$, который не взаимодействует с излучением накачки. В таком случае разность населенностей между уровнями $F=3$ и $F=4$ равна 13% от числа всех атомов, выпущенных изначально из цезиевой печи.

После пролета через микроволновый резонатор, часть атомов оказывается в состоянии с $F=4$. Для определения числа таких атомов, необходимо зарегистрировать фотоны люминесценции, используя лазерное излучение, настроенное на переход $F=4 \rightarrow F'=5$, рис. 1.14 б. Переход $F=4 \rightarrow F'=5$ является циклическим, поскольку атомы, возбужденные в состояние $F'=5$, могут распадаться только на сверхтонкий компонент основного состояния с $F=4$. Таким образом, процесс возбуждения и испускания фотонов происходит многократно и каждый атом испускает большое количество фотонов (пропорционально интенсивности падающего излучения и продолжительности взаимодействия), что позволяет наблюдать достаточно большой сигнал радиооптического резонанса.

Как уже говорилось ранее, алгоритм обработки полученного сигнала, как и процесс формирования СВЧ-сигнала возбуждения мало отличается от тех, которые применяются в классических схемах и в целом, работа КСЧ на атомах цезия с лазерной накачкой и детектированием основана на принципе подстройки частоты высокостабильного кварцевого генератора по частоте квантового перехода атомов цезия.

Был создан ряд цезиевых стандартов, в которых использовались схемы оптической накачки и регистрации: в Японии в NRLM (сейчас NMIJ) [69], в CRL (сейчас Национальный институт информационных и телекоммуникационных Технологий – NICT) [70], во Франции в LPTF, а также с США в NIST. Нестабильность частоты таких стандартов находится на уровне $1 \cdot 10^{-12}$ (с/τ)^{1/2} и $3,5 \cdot 10^{-13}$ (с/τ)^{1/2}. Относительная погрешность частоты для таких установок составляет от 10^{-14} до 10^{-15} [2, 3, 69, 70].

Несмотря на простоту ламповых рубидиевых стандартов, использование лазеров для приготовления ансамбля атомов в нужном состоянии, а также для детектирования переходов, вызванных микроволновым полем, обладает определенными преимуществами.

В настоящее время разрабатываются стандарты на рубидиевой ячейке, в которых лампа и фильтр заменены лазером, осуществляющим оптическую накачку. Использование полупроводниковых лазеров в стандарте снижает его кратковременную нестабильность частоты в интервале времени между 1 с и 10 с на порядок величины и позволяет достичь уровня нескольких единиц на 10^{-13} [2, 3, 60]. Однако стабильность для интервалов усреднения $\tau > 100$ с оказывается ограничена эффектами ячейки и световыми сдвигами, как и в схеме с лампой.

Что касается работы отечественных научных групп над данными видами КСЧ, можно сказать, что сейчас мы находимся на этапе изготовления и отладки работы опытных образцов. Очевидно, что теоретически достижимые характеристики выходного сигнала КСЧ на порядок выше в сравнении с КСЧ на атомах цезия и рубидия классического типа. Для промышленного освоения данных типов КСЧ требуется решить ряд вопросов связанных с надежностью лазерных излучателей отечественного производства и обеспечением их температурного режима на всем сроке эксплуатации КСЧ.

1.2.2 Оптические стандарты частоты

Лазеры представляют собой оптические генераторы, работающие на частотах от тера- до петагерцового диапазона ($10^{12} - 10^{15}$ Гц). Частоты лазеров в видимом диапазоне спектра превосходят частоты микроволновых генераторов примерно на пять порядков, при этом стабильность лазеров сопоставима со стабильностью лучших микроволновых генераторов. В

зависимости от области применения можно выделить два основных типа лазерных стандартов частоты [2, 3].

В первом – используются простые лазерные системы, частоты которых стабилизируются относительно молекулярных переходов, попадающих в спектральные диапазоны генерации этих лазеров. Одним из характерных примеров стандартов такого типа является He-Ne лазер с длиной волны $\lambda = 633$ нм. Благодаря простоте конструкции He-Ne лазера и высокой точности измерений частоты его излучения, выполненных в ряде работ [2, 3, 71], такие лазеры широко использовались в качестве стандартов частоты оптического диапазона при создании частотных цепочек для проведения прецизионных измерений в видимом и ультрафиолетовом диапазонах спектра.

Во втором – выбирается подходящий атомный, ионный или молекулярный переход, для возбуждения которого используется лазер с перестраиваемой длиной волны (например, лазер на красителях или диодный лазер). Такой метод обычно используется в тех случаях, когда необходимо достичь максимально высокой точности стандарта [3, 4, 62-64, 66].

Оптические стандарты частоты обладают огромным потенциалом для реализации в будущем. Сейчас различными научными группами по всему миру ведутся активные работы над созданием и разработкой оптических стандартов. Разработка данного вида КСЧ наукоемкий и длительный процесс, требующий объединения многих научных групп. Разработанные на данный момент оптические стандарты частоты могут быть использованы для наземного применения в целях фундаментальных исследований в различных областях наук.

1.2.3 Стандарты частоты на основе «ловушки»

Центральная часть ртутного стандарта — линейная ловушка, содержащая до 10^6 ионов ртути [2, 3]. Ионы ртути обладают высокой устойчивостью к изменениям окружающей среды и относительной чувствительностью в 1000 раз меньшей, чем соответствующая чувствительность атома водорода в водородном мазере. Ртутные приборы можно сделать компактными для использования в полевых условиях. А также ионы этого химического элемента имеют большую массу относительно массы других изотопов, использующихся в КСЧ, и высокую частоту сверхтонкого расщепления. Эти обстоятельства позволяют достичь большей стабильности и точности приборов.

Захваченные в ловушку ионы могут служить реперами частоты в микроволновом или в оптическом диапазонах частот.

Удержание ионов в ловушке в продолжении длительного времени позволяет исследовать чрезвычайно узкие спектральные линии без ограничения, накладываемого конечным временем взаимодействия частицы с полем. Кроме этого, удержание ионов в небольшом объеме позволяет эффективно использовать методы лазерного охлаждения и регистрировать сигналы, исходящие практически из одной точки пространства. Также, поскольку ионы находятся в области сверхвысокого вакуума, можно практически полностью исключить взаимодействие с другими частицами. В предельном случае можно исключить взаимодействие с другими ионами, если в качестве репера частоты использовать осциллятор на одиночном ионе.

Использование ионных ловушек в стандартах частоты, а также конкретные реализации и предельно достижимые характеристики описаны в ряде обзорных работ [72-74], а также в [2, 3, 7, 8].

1.2.4 Стандарты частоты фонтанного типа

Для разработки более точных и стабильных стандартов требуется увеличение времени взаимодействия атомов с полем и соответствующее уменьшение ширины спектральной линии атомного перехода. При использовании атомов, охлажденных лазерными методами и обладающих скоростями порядка нескольких сантиметров в секунду, можно увеличить время взаимодействия вплоть до нескольких секунд.

При создании часов, обладающих высочайшей точностью, в настоящее время для возбуждения и опроса холодных атомов в гравитационном поле Земли используется принцип атомного фонтана [2, 3, 61, 65]. Он состоит в том, что облако холодных атомов подбрасывается вертикально вверх через зону взаимодействия с микроволновым полем со скоростью несколько метров в секунду. За счет ускорения свободного падения скорость атомов снижается до нулевой, и, падая вниз, атомы второй попадают в зону взаимодействия с микроволновым полем. Вследствие этого возникает интерференционная картина Рэмси, разрешение которой определяется интервалом времени между двумя взаимодействиями. Относительные погрешности первичных часов на основе цезиевого атомного фонтана, работающих в крупных метрологических лабораториях мира, лежат в диапазоне $1 \cdot 10^{-15}$ [2, 3, 61, 65].

1.2.5 Стандарты частоты на основе когерентного пленения населенностей

Возможно создание еще более компактных и менее энергоемких рубидиевых и цезиевых стандартов частоты при использовании схемы возбуждения без микроволнового резонатора. В такой схеме возбуждение сверхтонкого перехода осуществляется оптическими полями, а не микроволновым излучением [2, 3, 75].

Взаимодействие с двумя световыми полями (когерентными лазерными полями) приводит к интерференции между сверхтонкими подуровнями основного состояния рабочего вещества (например, Rb) в ячейке. Это происходит за счет эффекта когерентного пленения населенности (КПН). В случае если разность частот лазерных полей оказывается равна расщеплению нижних подуровней, возникает провал в контуре поглощения (иногда называемый электромагнитно-индуцированной прозрачностью). Провал в поглощении можно детектировать, например, с помощью фотодетектора, расположенного за ячейкой [2, 3, 75].

Схема оптического возбуждения сверхтонких переходов весьма чувствительна к световым сдвигам. Величину полного светового сдвига можно контролировать за счет добавления дополнительных частот, возникающих, например, при изменении индекса модуляции. Кратковременная нестабильность часов, работающих на эффекте КПН, составляет от $(1-2) \cdot 10^{-12} \sqrt{c/\tau}$, а уровень фликкерного шума – $2 \cdot 10^{-13}$ для интервала от 100 с до 1000 с [2, 3].

1.3. Выводы

В материалах различных конференций, затрагивающих вопросы квантовой стабилизации частоты, прослеживается тенденция утверждений, что классические схемы КСЧ на атомах цезия и рубидия в некоторой степени себя исчерпали, приблизившись по своим точностным характеристикам к максимально возможным [16, 26, 34, 36, 39, 40, 41, 45]. Обоснованием таких утверждений может служить интенсивное развитие новых направлений квантовой стабилизации частоты, таких как использование лазеров для целей оптической накачки и замедления атомных пучков, разработка устройств накопления ионов, расширение ассортимента используемых рабочих веществ в КСЧ.

В настоящее время в России, как и во многих странах мира, также ведутся разработки новых типов КСЧ, основанных на лазерных и других технологиях [69, 70, 71]. Но на данный момент в каждом из направлений имеются свои особенности и сложности. Разрабатываемые модели КСЧ – это зачастую опытные образцы наземного применения, применение которых в космических аппаратах планируется в ближайшем будущем.

Поэтому на данный момент возникает необходимость дальнейшего совершенствования конструкций КСЧ на атомах цезия и рубидия (в плане улучшения их точностных и эксплуатационных характеристик), которые в настоящее время успешно работают в составе комплексов различных подвижных объектов, СНС, метрологических службах и т.д.

Для этого необходимы проведение дополнительных исследований физических явлений влияющих на их характеристики, разработка новых методов измерений и алгоритмов по обработке этих результатов, математических моделей работы функциональных узлов КСЧ, в которых реализованы новые методы и алгоритмы.

В большинстве случаев реализовать модернизацию всей конструкции КСЧ невозможно, поэтому рассматриваются отдельные её блоки и узлы, в основном основные, и для решения поставленных задач проводятся исследования и осуществляются разработки. В моей диссертационной работе основное внимание уделено блоку формирования сигнала СВЧ возбуждения и системе контроля и управления магнитном полем в АЛТ.

ГЛАВА 2. МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ СИГНАЛА СВЧ ВОЗБУЖДЕНИЯ В КВАНТОВЫХ СТАНДАРТАХ ЧАСТОТЫ НА АТОМАХ ЦЕЗИЯ – 133 И РУБИДИЯ - 87

2.1.1 Метод формирования сигнала СВЧ - возбуждения в КСЧ на атомах цезия – 133

Для формирования сигнала СВЧ – возбуждения в КСЧ на атомах цезия – 133 используется следующая схема (рис. 2.1).



Рис. 2.1. Структурная схема формирования сигнала СВЧ – возбуждения в КСЧ на атомах цезия - 133.

Выходной сигнал от кварцевого генератора частотой 5 МГц подается одновременно на несколько функциональных узлов – преобразователь частоты и синтезатор частоты. В синтезаторе частоты частота кварцевого генератора 5 МГц преобразуется в частоту 12,631 МГц. С выхода синтезатора частоты сигнал частотой 12,631 МГц поступает на балансный смеситель.

В состав преобразователя частоты входит несколько связанных между собой блоков, в которых формируется СВЧ – сигнал - генератор гармоник и несколько схем умножения частоты. В умножителях частоты, частота кварцевого генератора 5 МГц умножается до частоты 270 МГц, и сигнал этой

частоты поступает на диод, работающий в умножительном режиме (34-ая гармоника сигнала частоты 270 МГц поступает на балансный смеситель). В балансном смесителе происходит умножение двух частот, так что в соответствии с формулой 2.1 на выходе балансного смесителя содержится ряд комбинационных частот.

$$\cos(\omega_1 t) \cos(\omega_2 t) = \frac{1}{2} \cos([\omega_1 + \omega_2]t) + \frac{1}{2} \cos([\omega_1 - \omega_2]t), \quad (2.1)$$

Суммарная частота выделяется в резонаторе и используется в работе КСЧ на атомах цезия-133.

2.1.2 Метод формирования сигнала СВЧ - возбуждения в КСЧ на атомах рубидия – 87

Для формирования сигнала СВЧ – возбуждения в КСЧ на атомах рубидия – 87 используется следующая схема (рис. 2.2).



Рис. 2.2. Структурная схема формирования сигнала СВЧ – возбуждения в КСЧ на атомах цезия - 133.

Резонансное СВЧ поле формируется из частоты кварцевого генератора, которая подается на синтезатор частоты и преобразователь частоты. В преобразователе частоты происходит умножение частоты кварцевого генератора до частоты 60 МГц. В синтезаторе частоты происходит преобразование частоты кварцевого генератора в частоту 5,314500 МГц. Далее обе частоты поступают на генератор гармоник, где происходит параметрическое умножение на 114 сигнала с частотой 60 МГц (114-я гармоника образуется на СВЧ диоде) и подмешивание сигнала синтезатора частоты. В результате в резонаторе появляется СВЧ поле с частотой $(60 \cdot 114 - 5,314500)$ МГц, что соответствует частоте атомного перехода.

2.1.3 Выводы

Как видно из представленных схем формирования сигнала СВЧ-возбуждения, основным элементом, который участвует в формировании СВЧ сигнала возбуждения в квантовых стандартах частоты на атомах цезия – 133 и рубидия – 87, является синтезатор частоты. Основная функция синтезатора частоты в работе КСЧ – это формирование сигнала с частотой 12,6317727 МГц для КСЧ на атомах цезия – 133 или формирование сигнала с частотой 5,314500 МГц для КСЧ на атомах рубидия – 87. Кроме этого, синтезатор формирует низкочастотные сигналы, используемые в работе системы АПЧ КСЧ.

2.2 Синтезатор частоты и его влияние на работу квантового стандарта частоты

В общем представлении синтезатор частоты – это радиоэлектронное устройство, формирующее из одной или нескольких опорных частот,

определенное значение частоты или набор частот с необходимым шагом перестройки в зависимости от внешних управляющих сигналов.

В зависимости от сферы применения и конкретных приложений, к синтезаторам частоты (СЧ) предъявляются различные требования по параметрам и характеристикам выходных сигналов. Поэтому при разработке СЧ под конкретную задачу, необходимо из существующих методов синтеза частот [76 - 86] выбрать один, способный удовлетворить всем требованиям, предъявляемым к СЧ, а также реализовать все необходимые дополнительные функциональные возможности СЧ.

Основные технические параметры и характеристики СЧ можно разделить на несколько групп:

1. Характеристики выходного сигнала;
2. Параметры цепей питания и управления;
3. Параметры чувствительности к внешним воздействиям.

В первую очередь, к СЧ предъявляются высокие требования по характеристикам выходных сигналов.

Важно, чтобы СЧ в составе КСЧ обеспечивал высокую точность выходной частоты, обладал высоким подавлением боковых амплитудных составляющих в спектре сигнала с частотой 12,6317727 МГц и 5,313500 МГц, возможностью перестройки частоты выходного сигнала в широкой полосе частот, малым шагом перестройки частоты, высокой скоростью перестройки выходной частоты, низким значением «паразитной амплитудной модуляции», низкой зависимостью изменения частоты и амплитуды выходного сигнала от температуры, возможностью выбора различных частот модуляции выходного сигнала.

К параметрам цепей питания и управления СЧ целесообразно отнести следующие требования: количество источников питания, диапазон допустимых изменений питающего напряжения, ток (мощность)

потребления, а также вид интерфейса для обмена данными с КСЧ и реализация дополнительных функций управления выходными сигналами.

Из параметров чувствительности к внешним воздействиям необходимо выделить основные из них: диапазон допустимых изменений температуры и атмосферного давления, уровень радиации, стойкость к ударам и вибрациям.

Кроме этого при разработке СЧ в последнее время необходимо учитывать технико-экономические и технологические параметры: возможность приобретения электронных компонентов (желательна реализация на отечественной электронно-компонентной базе), их стоимость, ремонтпригодность, простота в настройке и применении.

Необходимо также отметить, каким образом характеристики выходного сигнала СЧ оказывают влияние на характеристики выходного сигнала КСЧ.

Высокая точность выходной частоты СЧ оказывает влияние на точность установления номинального значения выходной частоты КСЧ. Чем выше точность формирования частоты выходного сигнала СЧ, тем выше точность получения резонансной частоты атомного перехода.

Боковые амплитудные составляющие в спектре выходного сигнала СЧ, возникающие в результате преобразований частоты в СЧ, вызывают дополнительные сдвиги частоты КСЧ. Так, если одна из боковых побочных составляющих совпадет с частотой какого-либо соседнего Зеемановского перехода, то это приведет к переходам атомов на этих уровнях и возникновению погрешности в установлении номинала частоты выходного сигнала КСЧ. В частности, к синтезатору частоты, применяемому в составе КСЧ на атомах цезия-133, предъявляется требование по подавлению боковых амплитудных составляющих не хуже чем минус 60 дБ в полосе частот до 600 кГц и не хуже чем минус 50 дБ в полосе частот до 600 кГц в составе КСЧ на атомах рубидия-87.

Низкая температурная зависимость изменения частоты и амплитуды выходного сигнала СЧ улучшает температурную зависимость КСЧ в целом.

Любые изменения частоты и амплитуды выходного сигнала СЧ при изменении температуры вносят вклад в ухудшение температурного коэффициента частоты (ТКЧ) КСЧ. Определяется ТКЧ как отношение изменения номинального значения частоты к изменению температуры на 1°C .

Возможность перестройки частоты выходного сигнала в широкой полосе частот с малым шагом перестройки частоты позволит реализовать алгоритм подстройки магнитного поля КСЧ на атомах цезия, что в результате должно привести к улучшению долговременной стабильности выходной частоты КСЧ и улучшению его ТКЧ.

Возможность выбора различных частот модуляции выходного сигнала для работы системы автоматической подстройки частоты (АПЧ) КСЧ дает возможность обеспечить компромисс при выполнении двух условий. С одной стороны, при выборе низкой частоты модуляции возрастают пропорционально $1/F_m$, фликкерные шумы дискриминатора, (где F_m – частота модуляции), с другой стороны выбор более низкой частоты модуляции обеспечивает лучшую точность измерения значения сигнала ошибки. Также эта возможность позволит применять разработанную конструкцию синтезатора в других моделях КСЧ, для которых оптимальное значение частоты модуляции может варьироваться в зависимости от конструкции.

Для улучшения точностных характеристик квантовых стандартов частоты необходимо применение нового метода формирования СВЧ-сигнала. Используемый в настоящее время метод формирования выходной частоты СЧ устарел и нуждается в замене. Необходимо лучшее частотное разрешение выходного сигнала, а также лучшие спектральные характеристики, низкая температурная чувствительность, широкий диапазон выходных частот. Кроме этого, на элементную базу, используемую в КСЧ, различного назначения накладываются более строгие требования, как по радиационной стойкости, так и по быстродействию. Также в последнее время встал

принципиальный вопрос об использовании отечественной элементной базы в конструкции КСЧ.

Для того чтобы СЧ удовлетворял всем требованиям, необходимым для применения в КСЧ в своей диссертационной работе я рассмотрел наиболее используемые в различных приборах методы синтеза частот, а также отметил основные преимущества и недостатки каждого из них, с точки зрения использования данных методов для разработки СЧ квантового стандарта частоты. В итоге было определено направление для разработки новой конструкции СЧ и методики формирования дробной частоты.

2.3 Обоснование выбора метода синтеза частот для разработки новой схемы формирования сигнала СВЧ – возбуждения

На основе проведенных исследований [76-86] и эксплуатации различных устройств все методы синтеза частот можно разделить на два класса: методы пассивного синтеза частот (МПСЧ) и методы активного синтеза частот (МАСЧ). Эти методы синтеза частот носят название прямых и косвенных соответственно. При использовании системы пассивного или активного синтеза частот в диссертационной работе подразумевается, что рассматриваемая система построена с использованием метода пассивного или активного синтеза частот соответственно. На рис. 2.3 представлена используемая в настоящее время иерархия систем синтеза частот.

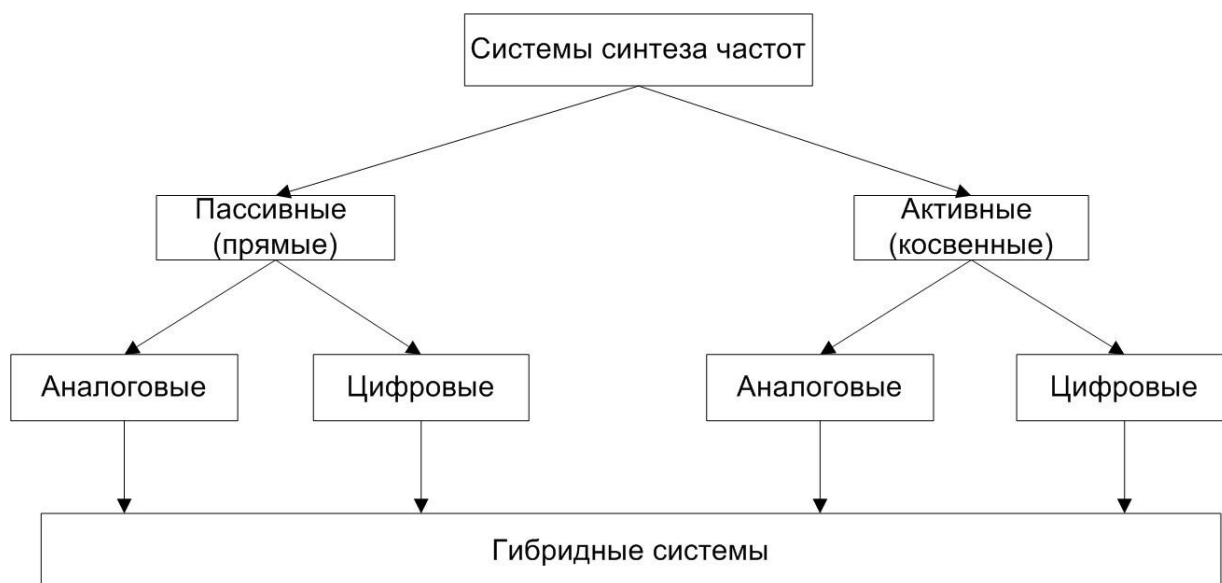


Рис. 2.3. Иерархия систем синтеза частот.

Принципиальным отличием систем пассивного синтеза частот (СПСЧ) от систем активного синтеза частот (САСЧ) является то, что в САСЧ используют кольца автоподстройки или кольца компенсаций, при формировании выходного колебания, осуществляя тем самым его фильтрацию.

С другой стороны для обеих систем характерно то, что они могут быть выполнены как на аналоговых элементах, так и с широким использованием цифровой элементной базы.

2.3.1 Системы пассивного синтеза частот

При разработке СПСЧ с помощью метода прямого аналогового синтеза используются основные элементы формирования частот такие как: опорные генераторы, делители частоты, умножители частоты, смесители сигналов, фильтры частот. Выходная частота СПСЧ формируется в результате различных преобразований, производимых с опорной частотой или несколькими опорными частотами. В основном эти преобразования подразумевают процессы деления, умножения, сложения и вычитания частот

одного опорного генератора с другими частотами одного или нескольких опорных генераторов.

Также необходимо отметить, что если система строится с использованием одного опорного источника, то метод построения такой системы также называется когерентным синтезом. Метод построения системы с использованием нескольких опорных источников называется некогерентным синтезом.

Известно, что смесители, умножители и делители частот являются нелинейными элементами. Поэтому спектр выходного колебания содержит большое количество боковых амплитудных составляющих. Так, например, в смесителе частот при воздействии на нелинейный элемент двумя сигналами с частотами f_1 и f_2 соответственно, кроме необходимого колебания на суммарной или разностной частоте, выделяемого в последующем фильтре, на выходе смесителя сигналов формируется множество дополнительных комбинационных составляющих.

Зависимость напряжения на выходе смесителя от напряжения на его входе можно описать степенным рядом (2.2) [77, 78]

$$U_{\text{вых}} = kU_{\text{вх}} + kU_{\text{вх}}^2 + kU_{\text{вх}}^3 + kU_{\text{вх}}^n + \dots, \quad (2.2)$$

где k – коэффициент нелинейности смесителя, $U_{\text{вх}}$ – сумма напряжений входных колебаний, которая в общем виде может быть представлена в виде уравнения (2.3):

$$U_{\text{вх}} = A\sin 2\pi f_1 t + B\sin 2\pi f_2 t, \quad (2.3)$$

Для нахождения амплитуд и частот, комбинационных составляющих выходного колебания смесителя сигналов, необходимо упростить выражение (2.2), подставив в него при этом уравнение (2.3).

В общем случае частоты комбинационных составляющих в спектре выходного сигнала смесителя сигналов можно представить следующим уравнением:

$$f_{\text{вых}} = |m_1 f_1 \pm m_2 f_2|, \quad (2.4)$$

где m_1 и m_2 – целые положительные числа.

При выполнении операции умножения на выходе умножителя формируется набор спектральных составляющих с частотами $F_{\text{вых}} = nF_{\text{вх}}$, где n – целое число. Наибольшую амплитуду среди соседних составляющих будут иметь гармоники с частотами $(n-1)F_{\text{вх}}$ и $(n+1)F_{\text{вх}}$ [77 - 80].

Повышение чистоты спектра выходного колебания СПСЧ достигается применением специальных узкополосных фильтров, резонаторов и резонансных контуров. Это в свою очередь не приводит к микроминиатюризации и упрощению схемы. В настоящее время уровень подавления боковых амплитудных составляющих в СПСЧ с использованием современных аналоговых элементов находится на уровне (45-55) дБ. Кроме этого особое внимание уделяется развязке и минимизации влияния блоков умножения и сложения частот друг на друга [77, 81- 83].

Проведенный анализ алгоритма работы СПСЧ в различных устройствах показал, что в настоящее время метод прямого аналогового синтеза имеет скорее больше недостатков, чем каких-либо преимуществ среди других методов синтеза частот, применяемых для построения СЧ для КСЧ.

Во-первых, он не отвечает требованиям современной радиоэлектроники по скорости перестройки, поскольку она определяется временем переключения ключей.

Во-вторых, при смешении двух сигналов с частотами f_1 и f_2 кроме необходимого колебания для работы КСЧ на выходе смесителя сигналов формируется множество дополнительных комбинационных составляющих.

В-третьих, этот метод не отвечает требованию по возможности формирования набора выходных частот в широком диапазоне с малым шагом перестройки, поскольку для этого требуется большое количество опорных генераторов. В связи с этим, требования по компактности устройства также не выполняются. Создание системы синтеза частот, состоящей из множества опорных источников, для формирования ограниченного набора частот не оправданно сложная задача с точки зрения затраченных ресурсов.

Другим типом систем пассивного синтеза частот являются цифровые. Системы пассивного цифрового синтеза базируются на широком применении больших интегральных схем (БИС), базовых матричных кристаллов (БМК), а также программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС), которые в полной мере позволяют реализовать преимущества современной цифровой элементной базы [87 - 93]. В отличие от аналоговых пассивных систем синтеза частот, габариты и масса цифровых пассивных систем могут в перспективе на основе новых разработок быть уменьшены в несколько раз.

В системах пассивного цифрового синтеза формирование необходимой частоты происходит при помощи цифровой обработки, но при этом зачастую для достижения наилучших характеристик выходного сигнала, также используются аналоговые элементы, например, ФНЧ, резонансные LC-контуры и другие.

Системы пассивного цифрового синтеза реализуются в синтезаторах частоты, в большинстве случаев, когда необходимо получить частоту ниже опорной. В таких случаях СЧ играет роль своеобразного делителя частоты, в котором выходная частота связана с опорной в виде соотношения $F_{\text{вых}} = F_{\text{оп}} / K$, где K - коэффициент деления частоты. Коэффициент деления частоты может принимать как целое, так и дробное значение, быть постоянным или управляемым (переменным). В связи с этим, системы цифрового синтеза частот позволяют сформировать выходную частоту с точностью до тысячных и менее долей герца.

В настоящее время одним из перспективных решением задачи получения переменного коэффициента деления частоты, является использование программируемой логики [92]. На ПЛИС или БМК можно задать различные алгоритмы изменения коэффициента деления частоты. Схема, реализованная по такому методу, называется делителем частоты с переменным коэффициентом деления (ДПКД) или N-Integer Synthesizer.

Дробный коэффициент деления частоты в такой схеме получается в результате изменения коэффициента деления, так чтобы средний коэффициент деления помимо целочисленного значения содержал еще и дробную часть.

Для этого, например, в течение первых l циклов деления коэффициент деления ДПКД устанавливается равным $N_d + 1$, а в последующих $(m - l)$ циклах – равным N_d . Тогда средний за m циклов коэффициент деления определяется следующим соотношением:

$$N_{d, \text{cp}} = \frac{(N_d + 1)l + N_d(m - l)}{m} = N_d + \frac{l}{m}. \quad (2.5)$$

Необходимо отметить, что в этом случае, спектр выходного сигнала будет содержать большое число побочных составляющих.

Относительный уровень максимальной спектральной составляющей в выходном сигнале синтезатора определяется следующим образом:

$$D_{\text{max}} = 20 \lg \left(\frac{m}{2\pi N_{d, \text{cp}}} \right), \quad (2.6)$$

Исходя из (2.6) требуемая чистота спектра выходных колебаний синтезатора может быть реализована только при больших коэффициентах деления.

Так, например, для реализации необходимой выходной частоты в цезиевом СЧ коэффициент деления должен составлять 6,3344. Такой

коэффициент достигается чередованием коэффициентов деления 15 и 16 на 1234 и 237 тактах опорной частоты, равной 15 МГц. При этом максимальное значение подавления боковых спектральных составляющих составит 35 дБ.

Подавление побочных составляющих также может быть осуществлено с помощью аналоговых узлов. Применение высококачественных, высокостабильных по многим параметрам, узкополосных аналоговых фильтров, контуров и резонаторов, настройка которых является довольно сложной и кропотливой работой, способно привести к хорошему подавлению побочных составляющих на уровне минус 60-70 дБ в полосе частот до 500 кГц относительно выходной частоты. С другой стороны, применение узкополосных фильтров не позволяет перестраивать выходную частоту СЧ в широких пределах, что является существенным недостатком данного метода.

Наряду с указанными недостатками, методы ДПКД имеют и преимущества перед аналоговыми методами синтеза частот. В первую очередь, это возможность гибкой программной реализации управления коэффициента деления. Коэффициент деления может быть сформирован как целочисленным, так и дробным, что позволяет получить шаг перестройки частоты вплоть до тысячных долей герца и менее. Время перестройки выходной частоты напрямую зависит от опорной частоты и равно времени переключения элементарного логического элемента – триггера. Время перестройки выходной частоты может быть доведено до нескольких десятков микросекунд и менее. Используемые в настоящее время в различных приборах и устройствах схемы деления не отличаются структурными сложностями и довольно просты.

Проведенный анализ алгоритмов работы цифровых СПСЧ показал, что свободны от отмеченных недостатков цифровые синтезаторы прямого синтеза (DDS – direct digital synthesizer) с потоками многоуровневых импульсов [95-100].

Необходимо отметить, что метод DDS постоянно совершенствуется. При этом основа данного метода почти не изменяется (основополагающие узлы и блоки в его структуре сохраняются). Различны лишь подходы и методы реализации конкретных функциональных узлов.

На рис. 2.4 представлена наиболее используемая в устройствах структурная схема DDS. Стандартная схема DDS состоит из накопительного сумматора, перекодировочной таблицы (Look Up Table), цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) и фильтра нижних частот (ФНЧ).

Для определения его преимуществ и недостатков необходимо кратко рассмотреть его работу по синтезу необходимой частоты выходного сигнала, например, СВЧ возбуждения.

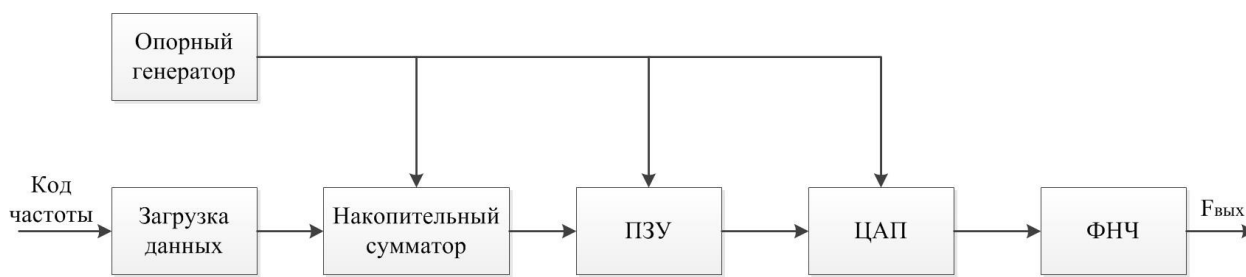


Рис. 2.4. Структурная схема DDS.

На вход накапливающего сумматора, тактируемого опорным генератором, через интерфейс передачи данных поступает код частоты. В результате суммирования данного кода частоты, на выходе сумматора формируется линейно увеличивающаяся последовательность отсчетов. С помощью логической функции, являющейся в общем случае преобразователем кодов, входная линейно изменяющаяся последовательность отсчетов преобразуется в изменяющиеся по определенному закону отсчеты выходного сигнала. Таким образом, задав закон изменения входных отсчетов в выходные отсчеты по функции $\sin(x)$ на выходе ПЗУ отсчеты амплитуды будут изменяться по синусоидальному закону. Наиболее подходящим методом формирования отсчетов функции

$\sin(x)$ является табличный метод. Перекодировочная или просмотрная таблица, чаще всего размещается в постоянном запоминающем устройстве (ПЗУ). Тогда, просуммированный код частоты, и поступающий на вход ПЗУ является аргументом функции $\sin(x)$, а выходная последовательность отсчетов ПЗУ является значением функции $\sin(x)$ для данного аргумента.

Частота переполнений накапливающего сумматора определяет периодичность изменения фазы функции $\sin(x)$, определяя тем самым, частоту выходного сигнала:

$$F_{out} = \frac{F_{clk} * M}{2^N}, \quad (2.7)$$

где F_{OUT} – выходная частота; F_{CLK} – тактовая частота; M – код частоты; N – разрядность аккумулятора фазы.

Для получения заданной частоты необходимо по формуле (2.7) рассчитать код частоты, который необходимо подать на вход накапливающего сумматора, чтобы через определенное количество тактовых сигналов произошло переполнение сумматора.

Последовательность отсчетов функции $\sin(x)$ поступает на ЦАП. В результате преобразования на выходе ЦАП формируется синусоидальный сигнал, состоящий из «ступенек». Эти «ступеньки» поступают на вход аналогового ФНЧ, где происходит фильтрация высокочастотных гармоник, и на выходе которого получается синусоидальный сигнал.

Представленный метод формирования частоты выходного сигнала СЧ позволяет получить еще меньший шаг перестройки по сравнению с СЧ, реализованного в методе ДПКД, а также более «чистый» спектр выходного сигнала. Шаг перестройки может достигать десятитысячных долей герца при выходной частоте порядка десятков мегагерц. Такое частотное разрешение недостижимо для других методов синтеза частот.

Другим преимуществом метода цифрового синтеза является очень высокая скорость изменения выходной частоты. Скорость перестройки

выходного сигнала определяется частотой тактирования цифровой микросхемы (ПЛИС или БМК) и ограничена только быстродействием интерфейса передачи данных и ФНЧ. Кроме этого, перестройка по частоте происходит без разрыва фазы выходного сигнала. В виду того, что выходной сигнал формируется в цифровом виде, можно реализовать модуляцию выходного сигнала различных видов.

Наряду с этим, этот метод имеет ряд недостатков. По причине того, что выходной сигнал формируется из дискретных отсчетов, целое число которых на период укладывается лишь в частном случае, при каждом новом периоде сигнала отсчеты формируемого сигнала находятся на новых местах. Происходит «дрожание» фазы выходного сигнала, в результате чего происходит ухудшение спектра выходного сигнала. Также к ухудшению спектра выходного сигнала приводят ошибки, связанные с некоторыми особенностями реализации алгоритма DDS, а именно: округление фазы при адресации ПЗУ; конечная разрядность шины данных; нелинейность ЦАП.

Также необходимо отметить, что в связи с процессом дискретизации и цифро-аналогового преобразования возникают некоторые ограничения:

1. Исходя из теоремы Котельникова, частота выходного сигнала не должна превышать половины тактовой частоты (на практике для достижения лучших характеристик выходного сигнала она должна быть еще меньше). Это ограничивает области применения DDS на HF и часть VHF диапазона частот;

2. Спектр выходного сигнала DDS зависит от разрядности ЦАП;

3. Потребляемая мощность цифровых микросхем практически прямо пропорционально увеличивается с увеличением их тактовой частоты. При формировании больших выходных частот, потребляемая мощность может достигать сотен милливатт [95].

Анализируя преимущества и недостатки рассмотренных систем пассивного синтеза частот, можно заключить, что метод прямого цифрового

синтеза является наиболее перспективным для построения СЧ, которые будут использоваться для формирования сигнала СВЧ-возбуждения, а также в системах АПЧ в КСЧ. Использование метода прямого цифрового синтеза позволит улучшить значения выходных характеристик.

2.3.2 Системы активного синтеза частот

В настоящее время системы активного синтеза частот стали самостоятельным видом систем синтеза частот, который активно применяется во многих областях радиофизики [76-82].

Отличительной особенностью систем активного синтеза от систем пассивного синтеза, является фильтрация выходного колебания с помощью активного фильтра в виде кольца фазовой автоподстройки (ФАП) или кольца компенсации, что позволяет получить более чистый спектр выходного сигнала [76-80].

Использование компенсационной схемы позволяет изменять соотношение частот, используемых для формирования выходной частоты, и тем самым упростить и сделать более эффективной фильтрацию выходного сигнала.

Использование схем фазовой автоподстройки частоты получило огромное развитие и сейчас применяется во многих областях науки и техники. Принцип работы систем активного синтеза с использованием ФАПЧ состоит в сравнении фазы выходного сигнала, формируемого генератором, управляемого напряжением (ГУН), с сигналом тактового (опорного) генератора. В результате сравнения фаз двух сигналов фазовый дискриминатор формирует напряжение, которое подстраивает частоту выходного сигнала ГУН до номинального значения.

Основными используемыми элементами данного метода являются смесители, умножители, делители частот (которые могут быть выполнены

как на аналоговой элементной базе, так и на цифровой), опорные генераторы, фазовые дискриминаторы, фильтры, и генераторы, управляемые напряжением.

Классическая структурная схема ФАПЧ представлена на рис.2.8.

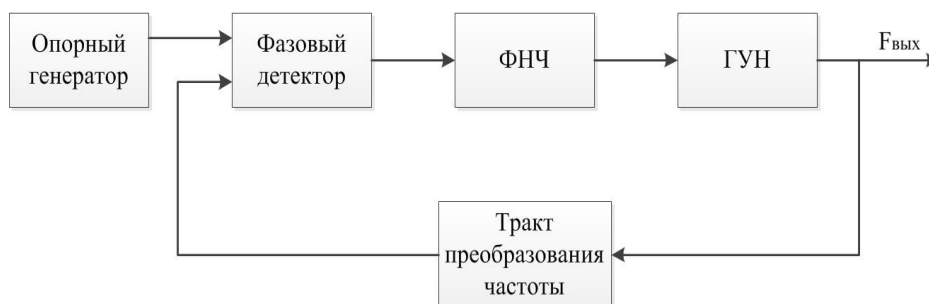


Рис.2.8. Структурная схема СЧ на основе ФАПЧ.

Фазовый детектор обеспечивает обнаружение ошибки расхождения фаз сигналов опорного генератора и ГУН. Фазовый детектор работает на определенной частоте сравнения F_c , которая может быть получена делением частоты опорного генератора на коэффициент N . Это не обязательное условие, так как в некоторых случаях частота опорного генератора и есть частота сравнения. Частота выходного сигнала ГУН транспонируется в область более низких частот, в результате деления на коэффициент M , и затем сравнивается с частотой F_c . При сравнении двух частот и обнаружения небольшого расхождения их фаз, фазовый детектор формирует медленно меняющееся выходное напряжение, которое поступает на вход фильтра нижних частот, а затем воздействует на ГУН до исчезновения отклонения двух частот друг от друга. Вырабатываемое выходное напряжение фазового дискриминатора имеет определенную величину и полярность. Эти величины зависят от степени расхождения двух сравниваемых входных частот.

Схемы ФАПЧ могут быть выполнены как с использованием только аналоговых элементов, так и цифровых.

Использование цифровой элементной базы в тракте приведения частоты активной системы с кольцом ФАПЧ является наиболее предпочтительным, поскольку позволяет уменьшить шаг перестройки частоты, а также получить более чистый спектр сигнала.

Синтезатор частоты в петле обратной связи ФАПЧ, реализованный с помощью метода ДПКД или DDS позволяет получить частотное разрешение выходного сигнала до тысячных единиц герца и ниже. С другой стороны, малый шаг изменения частоты ГУН достигим только при работе ФД на низкой частоте сравнения, которая в свою очередь определяет скорость подстройки частоты ГУН. Поэтому низкоскоростная петля ФАПЧ не сможет скомпенсировать быстрые вариации частоты ГУН.

Кроме того, в результате применения ДПКД или DDS в спектре выходного сигнала наблюдаются побочные боковые составляющие, что является недостатком использования данного метода. Также при больших коэффициентах деления частоты N и наличии побочных составляющих в полосу ФАПЧ могут попасть ложные частоты, что придет к сбою в работе СЧ.

Также особое внимание необходимо уделять вопросам устойчивости работы и возможности срыва петли ФАПЧ. Эти вопросы являются основными при проектировании данной системы. При недостаточно уделенном внимании этим аспектам такая система является неработоспособной.

Кроме этого, учитывая то, что схема синтезатора частоты должна надежно функционировать на протяжении более 10 лет необходимо спроектировать такую систему, которая не позволит ГУН изменить свою частоту чтобы выйти из полосы захвата.

В приложении 1 представлена таблица 1, в которой для сравнения приведены основные параметры современных синтезаторов частоты. Анализ её данных, а также установленные мною 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.

2.4 Цифровой синтезатор частоты

2.4.1 Схема построения и методика расчета характеристик выходного сигнала цифрового синтезатора частоты

В предыдущем разделе была подробно обоснована целесообразность использования при разработке новой схемы формирования СВЧ-сигнала метода прямого цифрового синтеза. Данный метод обладает рядом достоинств перед остальными методами синтеза частоты: уникальностью своей цифровой определенности (генерируемый им сигнал синтезируется со свойственной цифровым системам точностью, частота, амплитуда и фаза сигнала в любой момент времени точно известна и подконтрольна), высоким разрешением по частоте и фазе, высокой скоростью перестройки, цифровым интерфейсом, широким диапазоном генерируемых частот.

Разработанная мною структурная схема синтезатора частоты [102-106] представлена на рис. 2.9.



Рис 2.9. Структурная схема синтезатора частоты

Из блока «Загрузка данных» с помощью периферийного интерфейса передачи данных SPI (Serial Peripheral Interface) осуществляет загрузку из микроконтроллера кода частоты в последовательном режиме (42 разряда), что представлено на рис. 2.10.

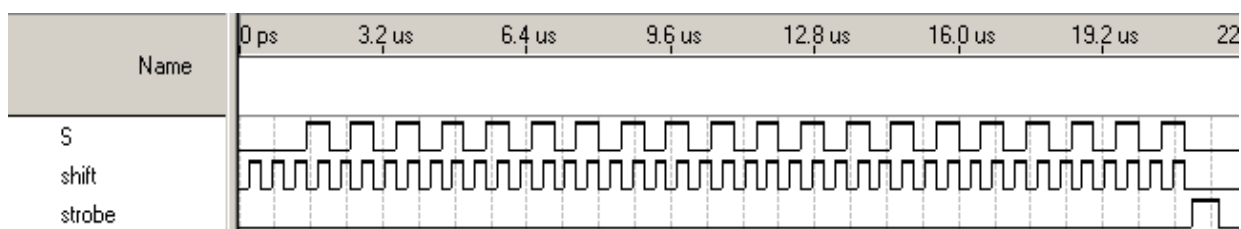


Рис. 2.10. Временная диаграмма загрузки кода частоты в последовательном режиме.

Полученный код частоты поступает в «Блок модуляции». Устройство модуляции осуществляет мультиплексирование кода частоты из двух регистров на вход аккумулятора фазы сигналом F_m , являющимся меандром низкой частоты (15, 30, 38 или 78 Гц). Значение частоты модуляции F_m подбирается таким образом, чтобы обеспечить компромисс при выполнении двух условий. С одной стороны, при выборе низкой частоты модуляции возрастают пропорционально $1/F_m$ фликкерные шумы дискриминатора КСЧ, с другой стороны выбор более низкой частоты модуляции обеспечивает лучшую точность измерения значения сигнала ошибки. Поэтому в разработанной мною схеме СЧ предусмотрена перестройка частоты модуляции в диапазоне от 15 до 78 Гц с шагом в 3 Гц, чтобы обеспечить оптимальные условия при измерении сигнала ошибки. Это позволяет применять разработанную нами конструкцию СЧ в других моделях КСЧ, для которых оптимальное значение F_m может варьироваться.

Аккумулятор фазы («Накопительный сумматор») реализован в виде 40 - разрядного накапливающего сумматора. Сумматор представляет собой 10 - ступенчатый конвейер, разбивающий 40 - разрядный код частоты на 10 групп по 4 разряда. В результате сложения кодов младших разрядов и переноса

кодов старших разрядов частоты обеспечивается ускоренная работа накапливающего сумматора.

Аккумулятор фазы работает с периодическими переполнениями, обеспечивая арифметику по модулю 2^N . Такое периодическое переполнение соответствует периодическому поведению функции $\sin(x)$ с периодом 2π [95]. Частота переполнений аккумулятора фазы равна частоте выходного сигнала. Эта частота определяется формулой:

$$F_{out} = \frac{M \cdot F_{clk}}{2^N}, \quad (2.8)$$

где F_{OUT} – выходная частота; F_{CLK} – тактовая частота; M – код частоты в двоичном виде; N – разрядность аккумулятора фазы.

В отличие от ранее используемых схем СЧ в квантовых стандартах частоты, где выходная частота формировалась с помощью сигналов переполнения накапливающего сумматора, в разработанной мною схеме СЧ принципиально новым является использование логического устройства, в данном случае дешифратора. Накопительный сумматор формирует аргумент функции синус, который поступает на логическое устройство, реализующее функцию синус с помощью таблицы синусов, заложенной в ПЗУ. Аргументом функции синус являются 10 старших разрядов 40 - разрядного накапливающего сумматора.

Принцип формирования таблицы значений синусоидального сигнала представлен на рис. 2.11, а сформированная, на основе данного принципа, таблица синусов приведена в приложении 2.

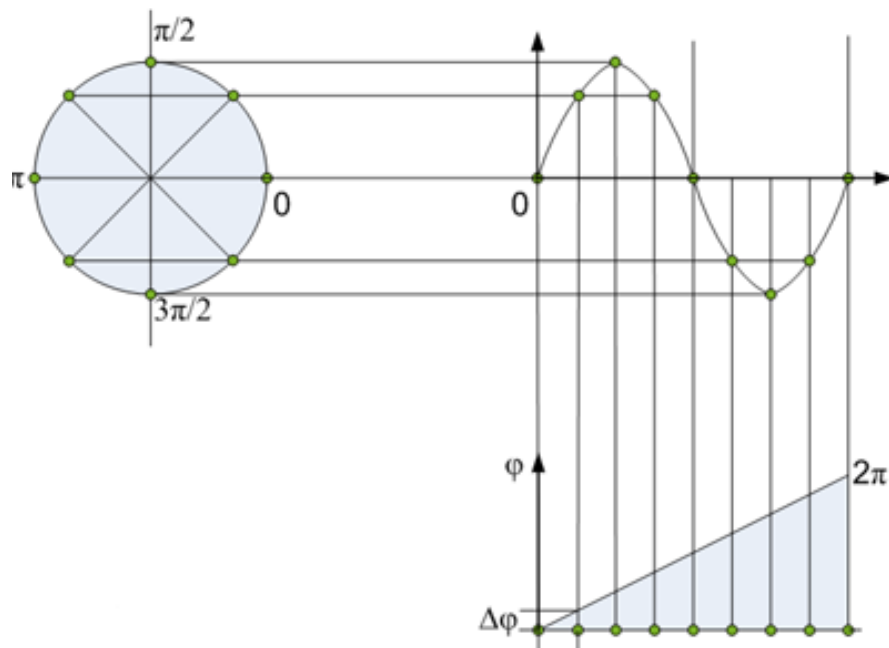


Рис. 2.11. Принцип формирования таблицы синусов

Для формирования этой таблицы используется формула (2.9):

$$\text{Sin}(x) = A * \sin\left(\frac{2\pi * x_i}{1024}\right), \quad (2.9)$$

где A-амплитуда; x_i – значение фазы.

На выходе блока ПЗУ формируется 12-разрядный цифровой код синуса, который далее поступает на ЦАП. Большая разрядность аккумулятора фазы, а также возможность модуляции, обеспечивают высокую точность выходной частоты.

В конструкциях КСЧ, находящихся в эксплуатации, в настоящее время используются синтезаторы частоты, в состав которых входит 32 - разрядный сумматор. Увеличение разрядности накапливающего сумматора приводит к уменьшению шага перестройки частоты. В разработанной мною схеме синтезатора частоты при работе на тактовой частоте 20 МГц и разрядности

аккумулятора фазы 40 разрядов, шаг перестройки составляет $\Delta F_{\text{out}} = 0,000018$ Гц [107-110].

Этот результат превышает значение, которое получалось в ранее используемых схемах синтезаторов для квантовых стандартов частоты на два порядка. Необходимо отметить, что в связи с изменением конструкции СЧ и устранением кварцевого фильтра, использовавшегося в предыдущей конструкции, диапазон перестройки выходной частоты расширен до 500 кГц.

Другим достоинством разработанного СЧ является высокая скорость перестройки частоты выходного сигнала. Время перестройки t_p частоты сигнала, принимающего участие в формировании резонансной частоты атомного перехода, складывается из времени перестройки цифровой части системы и времени запаздывания ФНЧ. Время перестройки цифровой части в разработанной мною конструкции синтезатора составляет три периода тактовой частоты. Время запаздывания в ФНЧ обратно пропорционально полосе пропускания и при частоте среза $F_{\text{cp}} = F_{\text{CLK}} / 4$ составляет порядка четырех периодов тактовой частоты. Получается, что $t_p \approx 7/F_{\text{CLK}}$. В разработанной конструкции СЧ $F_{\text{CLK}} = 15$ МГц, в этом случае $t_p \approx 0,4$ мкс. В ранее используемых конструкциях СЧ время перестройки частоты t_p составляло 33 мкс и выше. Это еще раз показывает обоснованность использования метода прямого цифрового синтеза в новой конструкции СЧ [107-110].

Степень подавления побочных комбинационных составляющих в спектре выходного сигнала напрямую зависит от нескольких факторов. Для определения степени влияния этих факторов мною была разработана математическая модель синтезатора частоты, реализованного на основе метода прямого цифрового синтеза. Принцип работы модели представлен на рис. 2.12.

Ошибка округления фазы ϵ_p вносит наиболее значительный вклад в ухудшение спектральных характеристик синтезатора, вызывая появление

нежелательных дискретных составляющих в спектре выходного сигнала [111].

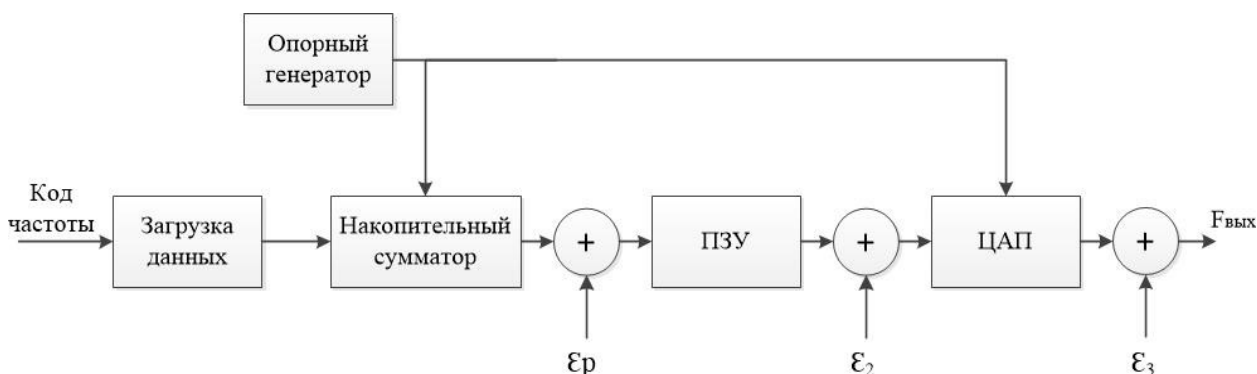


Рис. 2.12. Математическая модель синтезатора частоты: ϵ_p - ошибка, вызванная округлением фазы при адресации ПЗУ, ϵ_2 - ошибка, связанная с конечной разрядностью шины данных и разрядностью ЦАП, ϵ_3 - ошибка, вызванная нелинейностью ЦАП.

Ошибка округления данных ϵ_2 может быть значительно снижена при увеличении разрядности шины данных ПЗУ и разрядности ЦАП. Ошибка ЦАП ϵ_3 может быть уменьшена выбором качественных ЦАП.

Усечение кода фазы происходит вследствие того, что для адресации в ПЗУ используется лишь часть старших бит аккумулятора фазы, а младшие биты отбрасываются. Это необходимо для уменьшения размера ПЗУ до разумного. Например, если использовать для адресации все 40 бит счётчика, а каждый отсчет в ПЗУ кодировать одним байтом, то необходимый объем ПЗУ составит 4 ТБ. Отбрасывание младших бит приводит к появлению пилообразной функции сигнала ошибки в представлении фазы ϵ_p , изображенной на рис. 2.13. В свою очередь, ϵ_p приводит к возникновению ошибок в представлении амплитуды.

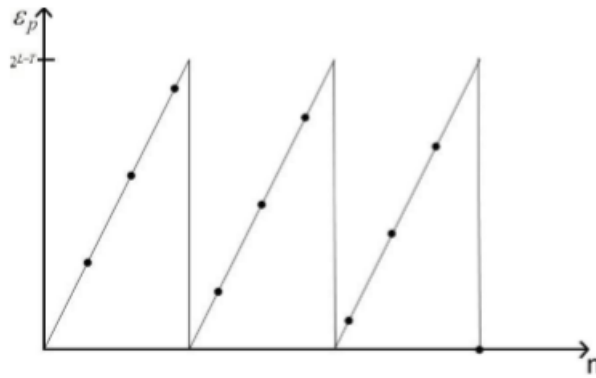


Рис. 2.13. График функции ошибки фазы.

Функция ошибки обладает свойством периодичности, так как количество значений фазы ограничено, и, следовательно, они неизбежно повторяются. В результате, выходной спектр имеет дискретные побочные составляющие.

Сигнал на выходе синтезатора можно записать следующим образом:

$$S(n) = \sin\left(\frac{2\pi}{2^L}(Mn - \varepsilon_p(n))\right) \quad (2.10)$$

где L - разрядность аккумулятора фазы, M - код частоты, n - номер отсчёта.

Чтобы найти спектр этого сигнала необходимо расписать синус разности в формуле (2.11):

$$S(n) = \sin\left(\frac{2\pi}{2^L}Mn\right)\cos\left(\frac{2\pi}{2^L}\varepsilon_p\right) - \cos\left(\frac{2\pi}{2^L}Mn\right)\sin\left(\frac{2\pi}{2^L}\varepsilon_p\right) \quad (2.11)$$

В конструкциях СЧ находящихся в эксплуатации $2^{L-T} \ll 1$, следовательно, $\varepsilon_p \ll 1$. Это позволяет упростить (2.11):

$$S(n) = \sin\left(\frac{2\pi}{2^L} Mn\right) - \frac{2\pi}{2^L} \varepsilon_p \cos\left(\frac{2\pi}{2^L} Mn\right) \quad (2.12)$$

Теперь, чтобы найти спектр выходного сигнала, необходимо провести преобразование Фурье и найти разложение в ряд Фурье пилообразной функции ошибки ε_p . В работе [111] предлагается использовать следующее разложение ε_p :

$$\varepsilon_p(n) = \frac{2^{L-T}}{2\Lambda} \sum_{K=1}^{\Lambda} \operatorname{ctg}\left(\frac{K\pi}{2\Lambda}\right) * \sin\left(2\pi\left(K \frac{M}{2^{L-T}} n\right)\right) + \cos\left(2\pi\left(K \frac{M}{2^{L-T}} n\right)\right) \quad (2.13)$$

Подставив (2.13) в (2.12) можно получить:

$$S(n) = \sin\left(\frac{2\pi}{2^L} Mn\right) - A_K \sum_{K=1}^{\Lambda} e^{i\left(2\pi\frac{M}{2^L} \pm \frac{F_K}{2^{L-T}}\right)n} e^{i\psi(K,\Lambda)}, \quad (2.13)$$

где $2\Lambda = \frac{2^{L-T}}{\operatorname{НОД}(M, 2^{L-T})}$ – количество побочных составляющих в спектре,

$F_K = \langle \Gamma + 2^T \Gamma \rangle \frac{2^L}{\operatorname{НОД}(M, 2^T)}$ – частота К-ой составляющей спектра ε_p ,

$A_K = \frac{1}{2^T} \frac{\frac{\pi}{2\Lambda}}{\sin\left(\frac{K\pi}{2\Lambda}\right)}$ – амплитуда К-ой составляющей. При этом можно

отметить, что A_K монотонно уменьшается с ростом К,

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

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

В разработанной конструкции синтезатора $T = 12$, следовательно, $A_1 < -68$ дБ. Так как A_K монотонно убывает с ростом К, амплитуды остальных составляющих будут ещё меньше, при любых значениях кодового слова. Это означает, что только три составляющих от усечения фазы будут иметь

уровень выше уровня шумов квантования. Это позволяет предположить, что выбор количества бит, используемых для адресации в память, определяется компромиссом между желанием использовать минимальный объём памяти в ПЗУ и сохранением приемлемого качества сигнала.

Также необходимо отметить, что при формировании перекодировочной таблицы, хранящейся в ПЗУ, можно использовать свойство симметрии функции $\sin(x)$. Для этого необходимо в перекодировочной таблице разместить значения аргумента функции $\sin(x)$ и соответствующие значения функции $\sin(x)$ в интервале $[0; \pi/2]$. Применяя алгоритм переадресации входных данных, можно полностью определить значения функции $\sin(x)$ на интервале $[0; 2\pi]$, используя при этом только $1/4$ значений функции $\sin(x)$ для данного аргумента. Это позволит уменьшить объём данных, хранящихся в ПЗУ. С другой стороны, если нет ограничений по объёму данных, хранящихся в ПЗУ, можно увеличить число значений аргумента функции $\sin(x)$. Это позволит с большей точностью определять значения амплитуды функции $\sin(x)$, что в конечном итоге скажется на спектре выходного сигнала СЧ.

Так, например, при 10-ти разрядном коде аргумента функции $\sin(x)$ необходимо сформировать 1024 значения функции $\sin(x)$. Если нет ограничений по объёму данных, хранящихся в ПЗУ (т.е. 1024 значения функции $\sin(x)$ устраивает разработчиков), то можно увеличить разрядность кода аргумента функции $\sin(x)$ до 12-ти и, применив алгоритм переадресации входных данных, получаются те же 1024 значения функции $\sin(x)$ хранящихся в ПЗУ. Но при этом шаг изменения значений функции $\sin(x)$ будет в 4 раза меньше. Данный алгоритм был реализован в разработанном ПО для синтезаторов частоты для КСЧ.

Следует указать, что, наихудшим случае при усечении фазы с выхода накапливающего сумматора, является случай, когда в отбрасываемой части кода фазы старший бит равен 1, а все остальные – 0.

Существует еще одно обстоятельство, ухудшающее спектральную чистоту выходного сигнала синтезатора. Дело в том, что ограниченное число разрядов ЦАП обуславливает ступенчатый характер выходного сигнала. Поэтому спектр этого сигнала содержит большое число высших гармоник рис. 2.14, огибающая амплитуд которых описывается функцией:

$$A(nf_{\text{ВЫХ}}) = \frac{\sin\left(\frac{\pi n f_{\text{ВЫХ}}}{f_0}\right)}{\left(\frac{\pi n f_{\text{ВЫХ}}}{f_0}\right)}, \quad (2.14)$$

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

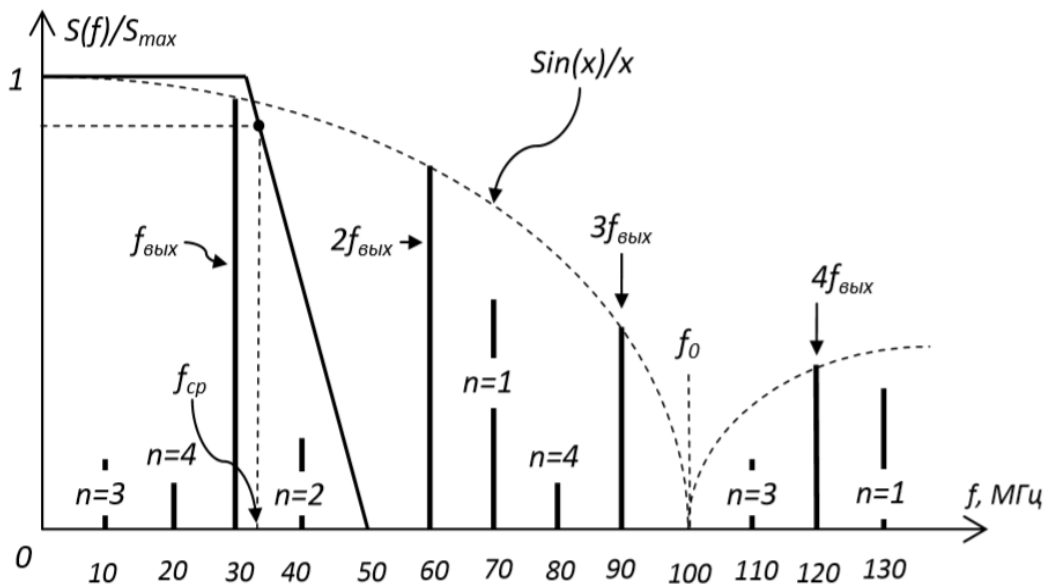


Рис. 2.14. Распределение гармоник в спектре выходного сигнала синтезатора DDS.

Кроме того в спектре будут присутствовать и комбинационные гармоники вида $f_n = f_0 \pm n f_{\text{ВЫХ}}$, где n – номер гармоники выходного сигнала [76-80]. Согласно теореме Котельникова, максимальная частота синтезируемого сигнала не может быть больше половины тактовой частоты f_0 . Вместе с тем, выходную частоту синтезатора желательно ограничить значением $f_0 / 3$, чтобы комбинационная составляющая с частотой $(f_0 - f_{\text{ВЫХ}})$,

имеющая самый большой уровень, находилась выше частоты Найквиста $f_0/2$ и ее можно было подавить с помощью ФНЧ. Предположим, что тактовая частота $f_0 = 100$ МГц. Тогда частота выходного сигнала $f_{\text{вых}} = 30$ МГц. Вторая гармоника выходного сигнала будет равна $2f_{\text{вых}} = 60$ МГц. В результате в спектре появится комбинационная (разностная) составляющая 40 МГц. Точно также третья гармоника даст $100 - 90 = 10$ МГц. Четвертая – $120 - 100 = 20$ МГц. Все эти комбинационные частоты находятся в полосе пропускания выходного фильтра, то есть спектр выходного сигнала и спектр комбинационных составляющих перекрываются и разделить их с помощью ФНЧ невозможно, что представлено на рис. 2.14.

Для преобразования кодов фазы в аналоговые отсчеты функции синуса используются цифроаналоговые преобразователи, имеющие конечную разрядность D и связанное с ней конечное разрешение по амплитуде синтезируемого сигнала. На рис. 2.15 приведен пример преобразования цифрового сигнала в аналоговый синусоидальный с помощью ЦАП, имеющего ограниченную разрядность [112].

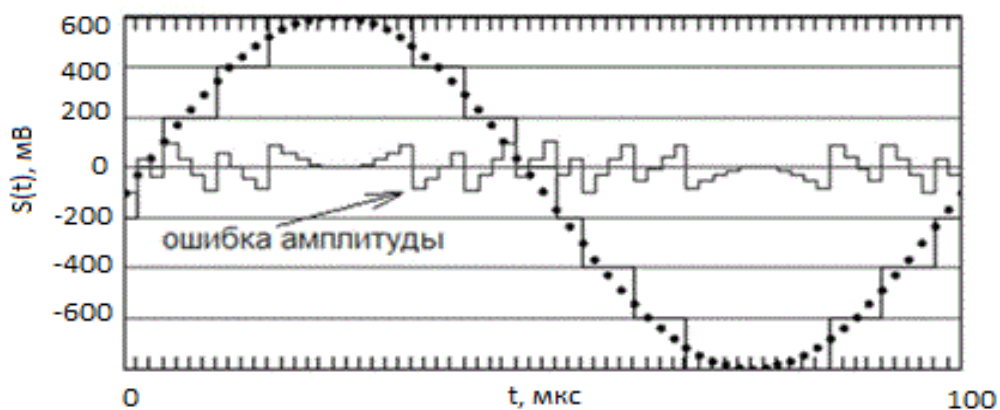


Рис. 2.15. Преобразование цифрового сигнала в аналоговый с помощью ЦАП.

Частые точки показывают синусоиды, которые получались бы при высокой разрядности ЦАП на каждом такте преобразования. Вертикальные линии отображают моменты времени, в которые должно происходить

обновление значений амплитуды в идеальном случае. Ступенчатое приближение имеет место из-за ограниченной разрядности ЦАП. Вариации около нулевого уровня отображают сигнал ошибки из-за квантования сигнала при цифроаналоговом преобразовании, приводящем к внутренним помехам синтезатора, и объясняют причину возникновения ошибки ϵ_2 .

Сигнал ошибки определяется разницей между ступенчатым приближением синусоиды на выходе ЦАП и значениями идеальной синусоиды. Очевидно, что внутренние помехи создают дополнительные составляющие в спектре формируемого сигнала, а их частоты определяются комбинациями между частотой дискретизации и частотой изменения кода.

Амплитудное распределение ошибки квантования будем считать близкой к равномерному, поэтому можно применить следующую вероятностную оценку.

Пусть Δa - величина шага квантования. Тогда ошибка квантования σ_e будет равномерно распределена в интервале от $-\Delta a/2$ до $\Delta a/2$. Дисперсия (или мощность) шума будет равна:

$$\sigma_e^2 = \int_{-\Delta/2}^{\Delta/2} e^2 \frac{1}{\Delta a} de = \frac{\Delta a^2}{12} \quad (2.15)$$

Тогда отношение сигнал/шум для В-битового квантователя, выраженное в децибелах получится равным:

$$\frac{C}{\text{Ш}} = 10 \lg \left(\frac{\sigma_s^2}{\sigma_e^2} \right) = 10 \lg \left(\frac{a^2}{\frac{\Delta a^2}{12}} \right) = 10 \lg(3 * 2^{2D-1}) = 6,02D + 1,76, \quad (2.16)$$

где D-разрядность ЦАП.

В разработанной мною схеме СЧ применяется 10 - разрядный ЦАП ($D=10$), поэтому отношение сигнал/шум получаем равным 61,96 дБ. При этом рассчитанная максимальная величина побочных составляющих составляет - 68 дБ. Так как спектральные составляющие шума квантования равномерно распределены по всему диапазону задействованных частот, то величина -68 дБ может использоваться в качестве некоторого порогового уровня для шумов, ниже которого подавлять дискретные побочные составляющие не имеет смысла.

В некотором приближении можно утверждать, что шумы квантования амплитуды и шумы усечения фазы конкурируют между собой. Это подтверждает то, что коды D и T связаны между собой.

При $T= D+1$ шумы квантования ЦАП будут преобладать над шумами из-за усечения фазы на 6 дБ, поэтому на практике принято выбирать T на 1–2 разряда выше, чем D . Учитывая, что разрядность ЦАП ограничена техническими возможностями, то считается, что качество синтезируемого этим методом сигнала определяется ЦАП, а некоторого его улучшения можно добиться путем передискретизации.

Также побочные составляющие с большей амплитудой возникают вследствие нелинейных искажений сигнала при его цифро-аналоговом преобразовании. Помимо основного сигнала на выходе синтезатора, получен набор гармоник с частотами кратными частоте основного сигнала. Как следует из вывода выше, амплитуды этих гармоник определяются передаточной характеристикой ЦАП. Нелинейность передаточной характеристики ЦАП (ошибка ϵ_3) обычно определяется при помощи INL (интегральная нелинейность) или DNL (дифференциальная нелинейность). Но нахождение амплитуд гармоник с помощью передаточной характеристики ЦАП затруднено из-за ряда следующих факторов: отсутствия точных численных данных по передаточной характеристике, зависимости самой характеристики от температуры и выходного тока, а также весьма

сильной чувствительности амплитуд высших гармоник к малейшему изменению передаточной характеристики.

В методе DDS рабочая полоса частот выделяется с помощью фильтра нижних частот (ФНЧ). В связи с этим при проектировании необходимо учитывать следующие общие соображения. Во-первых, что только идеальный ФНЧ имеет единичный коэффициент передачи на частотах от 0 до частоты Найквиста и нулевой коэффициент передачи на других частотах (рис. 2.16 а). Однако из теории радиотехники известно, что идеальный ФНЧ физически не реализуем. Существует много различных схем реальных ФНЧ. На рис. 2.16.б приведена типичная АЧХ реального ФНЧ.

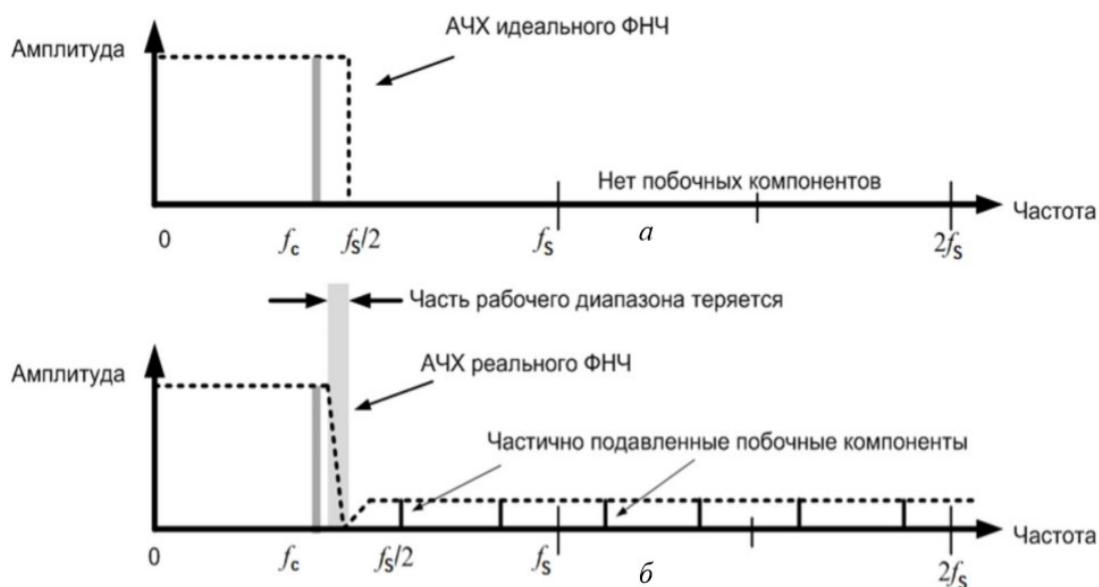


Рис. 2.16 Характеристики идеального (а) и реального (б) ФНЧ.

Необходимо отметить, что спад АЧХ является постепенным, в результате этого из рабочего диапазона теряется некоторая полоса рабочих частот. Кроме этого, за пределами частоты Найквиста затухание реального фильтра отлично от нуля. Это означает, что шумовые компоненты в спектре формируемого сигнала такой ФНЧ будет подавлять лишь частично.

2.4.2 Моделирование работы новой конструкции синтезатора частоты

После теоретических расчетов частоты выходного сигнала синтезатора частоты, шага перестройки частоты, времени перестройки и подавления побочных комбинационных составляющих, была проведена разработка нового программного обеспечения (ПО) цифровой части СЧ для программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) в соответствии с принципом работы DDS.

Программное обеспечение разрабатывалось в специализированной среде программирования ПЛИС, позволяющей учесть особенности работы схемы на поведенческом (логическом) уровне, а также учитывающей внутренние задержки переключения элементов и дополнительные задержки при трассировке соединений элементов, но при этом требующей значительных ресурсов персонального компьютера (ПК). В результате экспериментов было установлено, что на проведение качественного моделирования работы разработанного ПО в различных режимах работы ПЛИС и отладки самого ПО необходимо более 1500 часов машинного времени.

Результат разработки цифровой части синтезатора частоты на основе системы автоматизированного проектирования представлен на рис. 2.17.

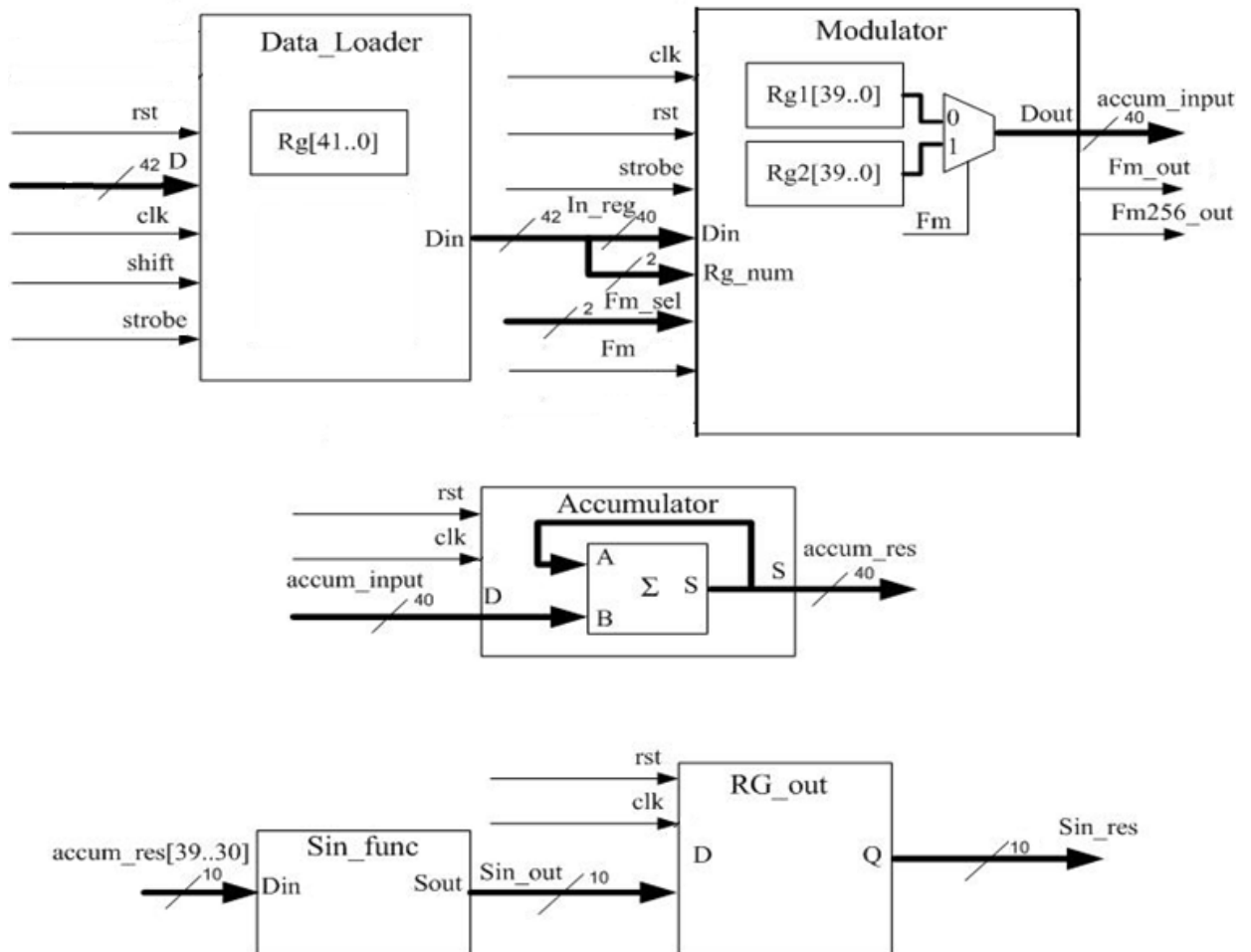


Рис. 2.17. Цифровая часть синтезатора частоты

Моделирование работы схемы разработанного синтезатора (рис. 2.17) было осуществлено в программе ModelSim. На рис. 2.18 представлен полученный результат, а именно синусоидальный сигнал, меняющий свою частоту при изменении управляющего сигнала модуляции.

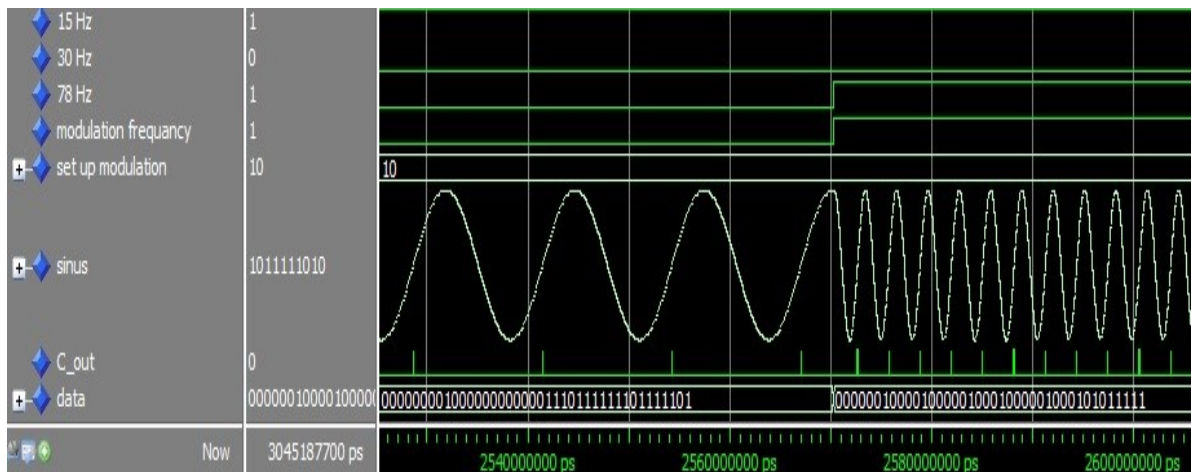


Рис. 2.18. Результат моделирования работы схемы

При изменении частоты модуляции, согласно сформированному заданию работы схемы, происходит коммутация регистров, в результате чего происходит изменение выходной частоты. Из зависимостей представленных на рис. 2.18 можно установить, что для разных значений частоты модуляции «modulation frequency» происходит загрузка различных кодов частоты. Для первого случая двоичное число $M = \langle 000000001000000000001110111111101111101 \rangle$. В десятичной системе счисления оно равняется $M = 2147975037$. Тогда выходная частота $F_{out} = \frac{M \cdot F_{clk}}{2^N} = \frac{2147975037 \cdot 20 \text{ МГц}}{2^{40}} = 78,142 \text{ кГц}$. Частоты сигнала также можно оценить по частоте повторений сигнала «C_out».

Для второго случая использовался двоичный код $M = \langle 0000001000010000010001000001000101011111 \rangle$. В десятичной системе счисления число M равняется $M = 8862830943$. Выходная частота $F_{out} = \frac{M \cdot F_{clk}}{2^N} = \frac{878007637 \cdot 20 \text{ МГц}}{2^{40}} = 322,427 \text{ кГц}$.

Для проверки спектральных характеристик выходного сигнала было произведено моделирование в программе MatLab. Используя библиотеку данных Simulink, была собрана схема, повторяющая алгоритм работы прямого цифрового синтеза. Она представлена на рис. 2.19.

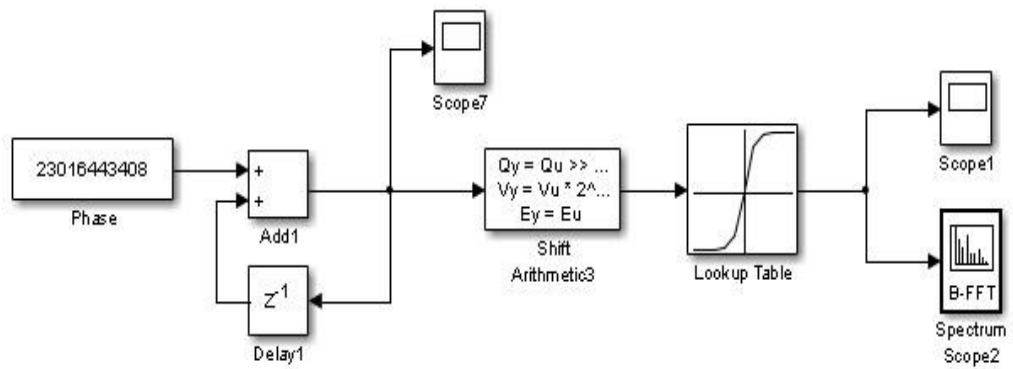


Рис. 2.19. Схема для исследования спектральных характеристик выходного сигнала.

На рисунках 2.20, 2.21 представлены спектральные характеристики выходного сигнала цезиевого синтезатора частоты в разных полосах – 6 кГц, 600 кГц соответственно.

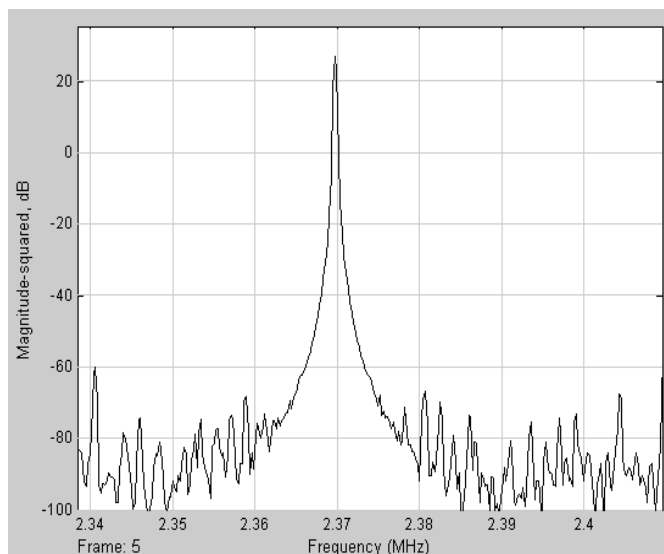


Рис. 2.20. Спектр выходного сигнала частоты $F=2.369$ МГц в полосе 6 кГц

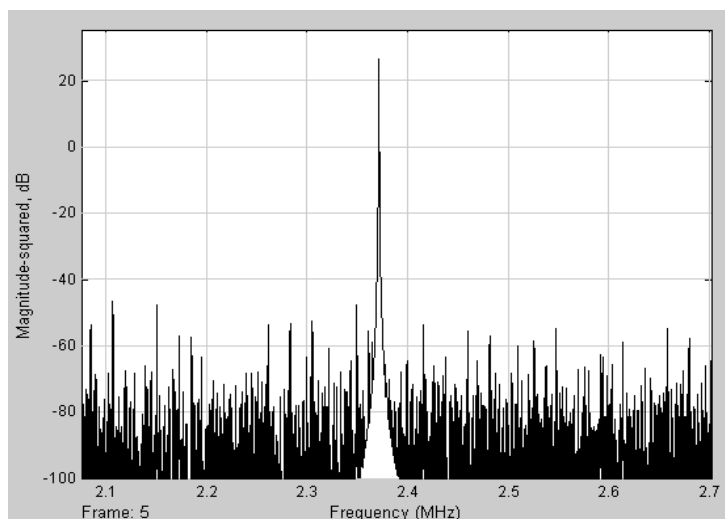


Рис. 2.21. Спектр выходного сигнала частоты $F=2.369$ МГц в полосе 600 кГц

Анализ спектров на рис. 2.20 и 2.21 показывает, что подавление боковых амплитудных составляющих составляет -84 дБ, -70 дБ в полосах 1 кГц, 600 кГц соответственно [113-115].

Поскольку разработанное мною ПО универсально, как для синтезатора частоты, входящего в состав КСЧ на атомах цезия, так и для синтезатора частоты, входящего в состав КСЧ на атомах рубидия, на рисунке 2.22, представлены спектральные характеристики выходного сигнала рубидиевого синтезатора частоты в полосе 600 кГц.

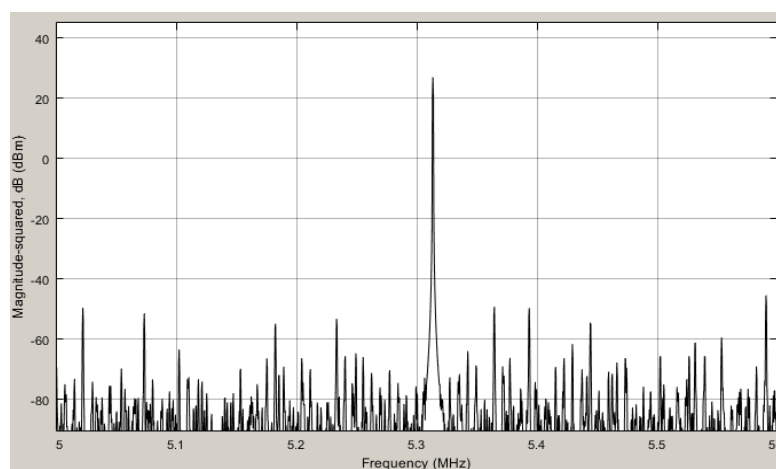


Рис. 2.22. Спектр выходного сигнала частоты $F=5.313$ МГц в полосе 600 кГц

Проведено математическое моделирование работы цифровой части синтезатора частоты для различных значений разрядности кода аргумента функции $\sin(x)$ T и разрядности ЦАП D для оценки максимально достижимого уровня подавления боковых составляющих в спектре выходного сигнала синтезатора частоты. Результаты математического моделирования спектров выходного сигнала синтезатора частоты для КСЧ на атомах цезия - 133 представлены на рис. 2.23- 2.32.

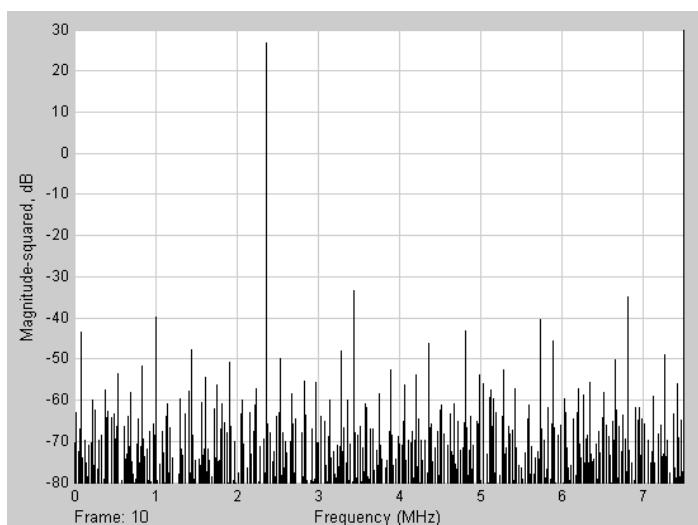


Рис. 2.23. Спектр выходного сигнала частоты $F=2.369$ МГц при разрядности $T=10$ и разрядности $D=10$

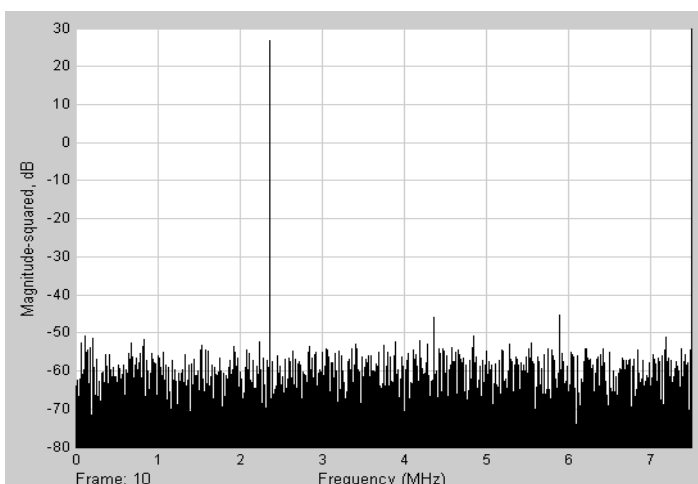


Рис. 2.24. Спектр выходного сигнала частоты $F=2.369$ МГц при разрядности $T=12$ и разрядности $D=10$

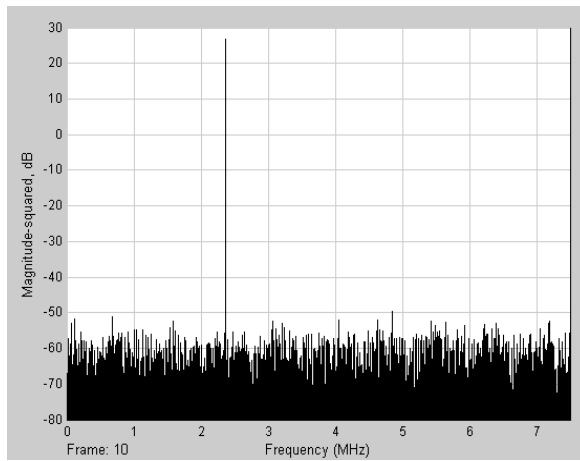


Рис. 2.25. Спектр выходного сигнала частоты $F=2.369$ МГц при разрядности $T=14$ и разрядности $D=10$

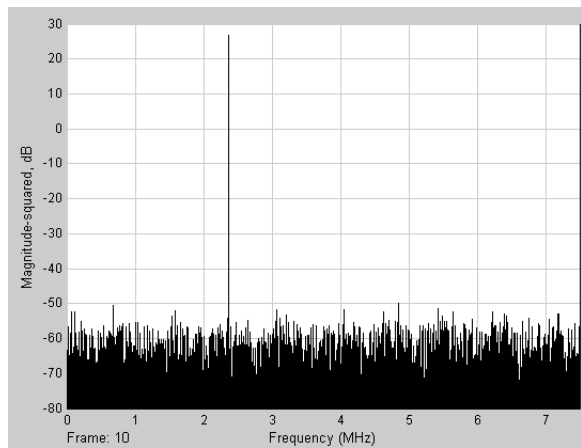


Рис. 2.26. Спектр выходного сигнала частоты $F=2.369$ МГц при разрядности $T=16$ и разрядности $D=10$

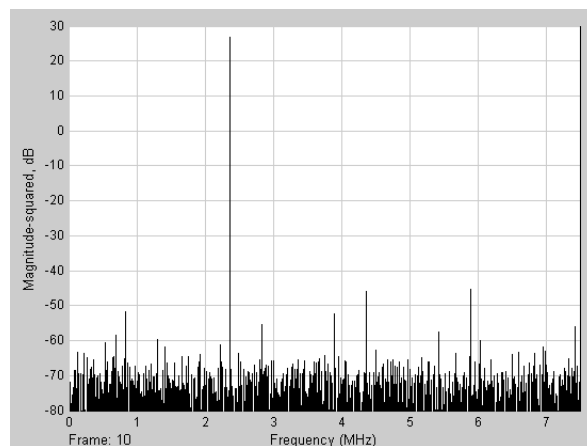


Рис. 2.27. Спектр выходного сигнала частоты $F=2.369$ МГц при разрядности $T=12$ и разрядности $D=12$

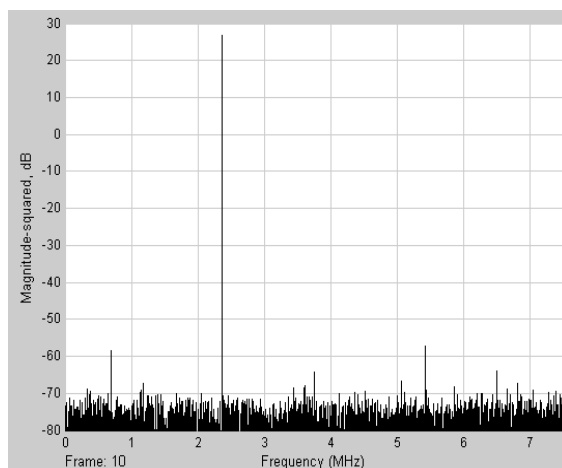


Рис. 2.28. Спектр выходного сигнала частоты $F=2.369$ МГц при разрядности $T=14$ и разрядности $D=12$

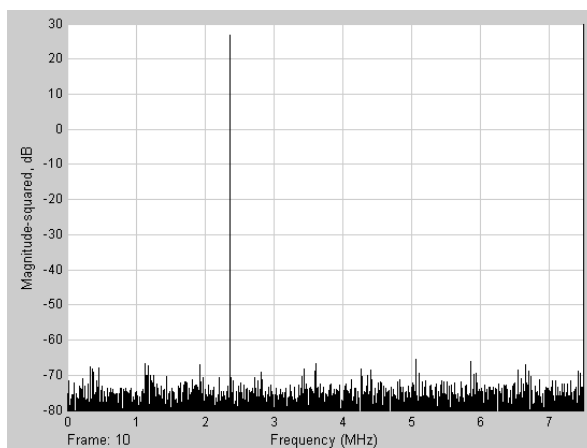


Рис. 2.29. Спектр выходного сигнала частоты $F=2.369$ МГц при разрядности $T=16$ и разрядности $D=12$

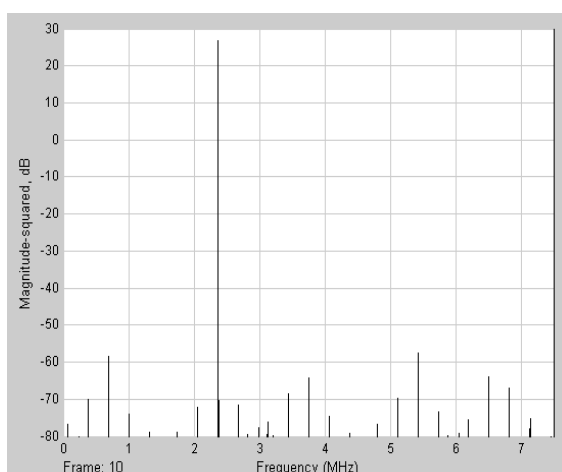


Рис. 2.30. Спектр выходного сигнала частоты $F=2.369$ МГц при разрядности $T=14$ и разрядности $D=14$

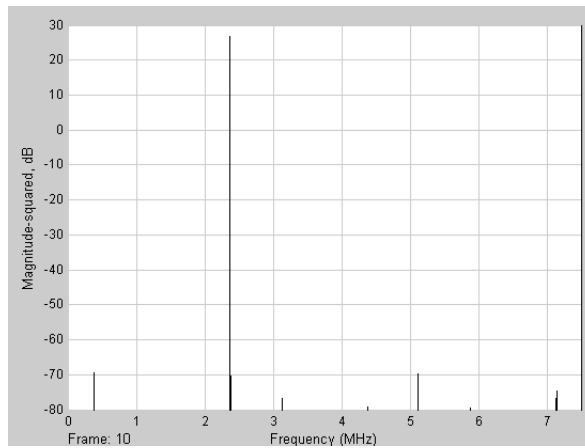


Рис. 2.31. Спектр выходного сигнала частоты $F=2.369$ МГц при разрядности $T=16$ и разрядности $D=14$

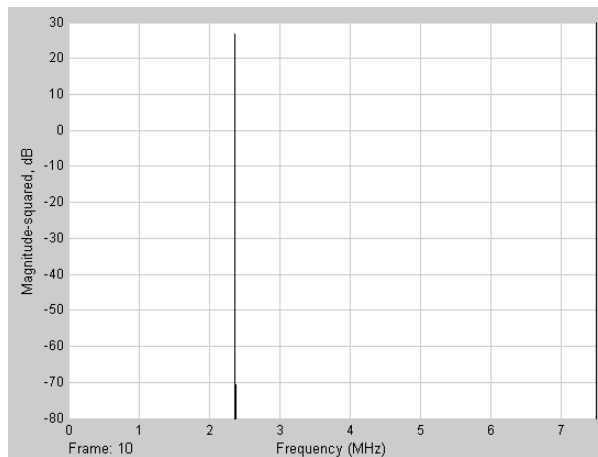


Рис. 2.32. Спектр выходного сигнала частоты $F=2.369$ МГц при разрядности $T=18$ и разрядности $D=14$

Проведенное математическое моделирование работы цифровой части синтезатора частоты также показало, что увеличение разрядности кода аргумента функции $\sin(x)$ T от 10 до 18 разрядов и увеличение разрядности ЦАП D от 10 до 14 разрядов с определенного момента не приводит к существенному улучшению спектра выходного сигнала. При этом значительно сокращаются ресурсы цифровой микросхемы на формирование огромного числа значений функции $\sin(x)$. По результатам данного

математического моделирование было выбрано оптимальное соотношение разрядности $T=12$ и $D=10$ (рис. 2.24).

2.4.3 Экспериментальное исследование спектральных характеристик синтезатора частоты.

После анализа результатов моделирования работы схемы синтезатора частоты, были разработаны и изготовлены опытные образцы синтезаторов частоты для цезиевого и рубидиевого КСЧ. На разработанном экспериментальном стенде (рис. 2.33) были исследованы выходные характеристики новых синтезаторов частоты.

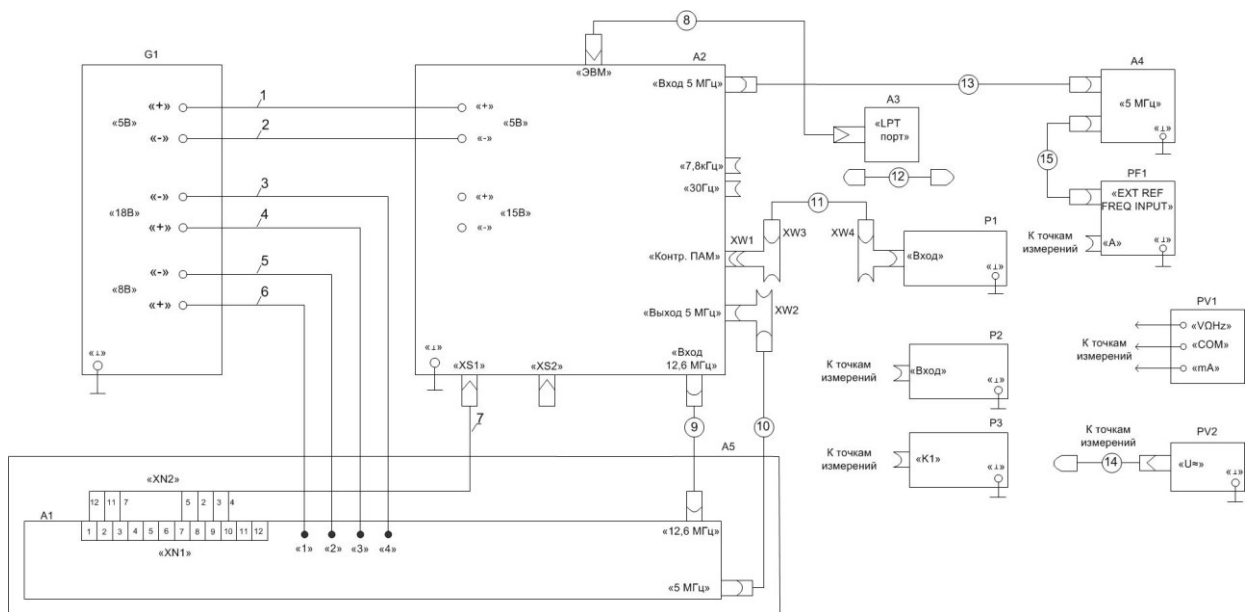


Рис. 2.33. Структурная схема экспериментального стенда для исследования характеристик синтезаторов частоты: A1 – синтезатор частоты, A2 – стенд, A3 – персональный компьютер, A4 – вторичный эталон времени и частоты, A5 – климатическая камера, G1 – источник питания, P1, P2 – анализатор спектра, P3 – осциллограф, PF1 – частотомер универсальный, PV1 – мультиметр цифровой, PV2 – милливольтметр, XW1, XW2, XW3, XW4 – переходы для коммутации измерительных приборов, 1 - 15 – кабели для коммутации СЧ со стендом и измерительным оборудованием.

Экспериментальное исследование характеристик выходных сигналов синтезаторов частоты проводилось в климатической камере, внешний вид

которой представлен на рис. 2.34 Диапазон изменения температуры, при котором проводились исследования составил от минус 10 до 85 °С.



Рис. 2.34. Внешний вид климатической камеры.

Как уже отмечалось ранее, одной из самых важных характеристик выходного сигнала синтезатора частоты, является спектр. Сравнительные

спектральные характеристики выходного сигнала разработанного (а) и ранее применявшегося (б) цезиевого СЧ представлены на рис. 2.35 и 2.36.

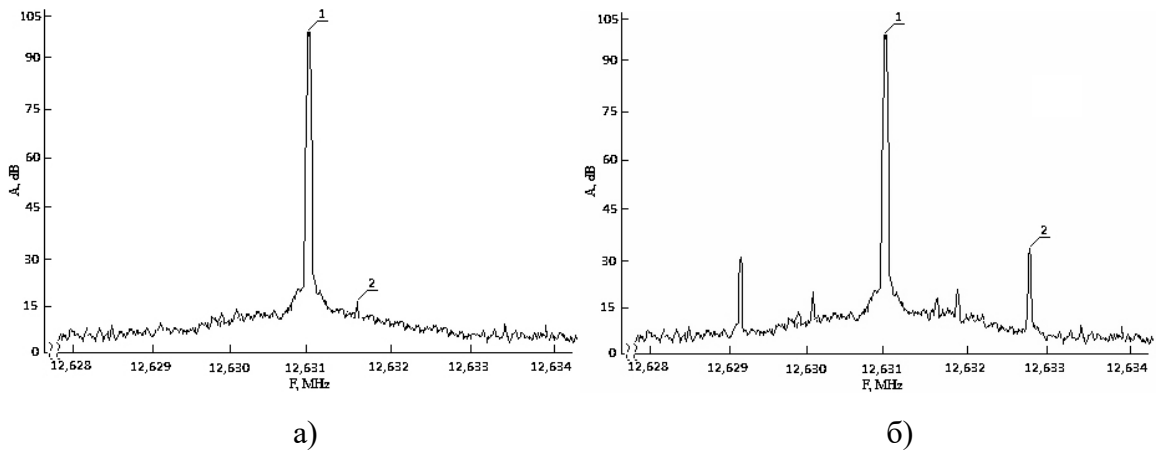


Рис. 2.35. Подавление амплитуды боковых составляющих в полосе 6 кГц.

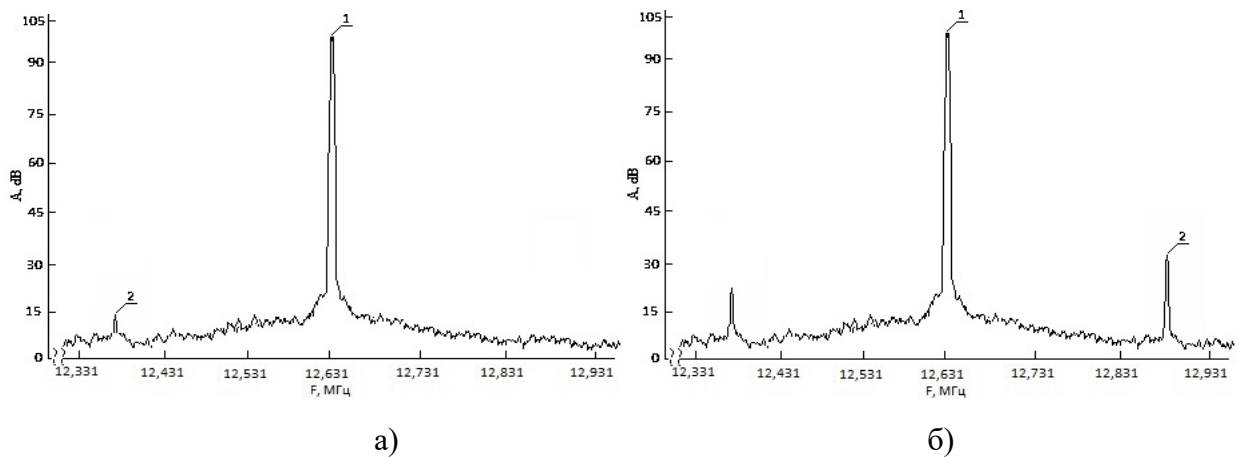


Рис. 2.36. Подавление амплитуды боковых составляющих в полосе 600 кГц.

На рис. 2.37 и рис. 2.38 представлены спектральные характеристики выходного сигнала разработанного (а) и ранее применявшегося (б) рубидиевого СЧ.

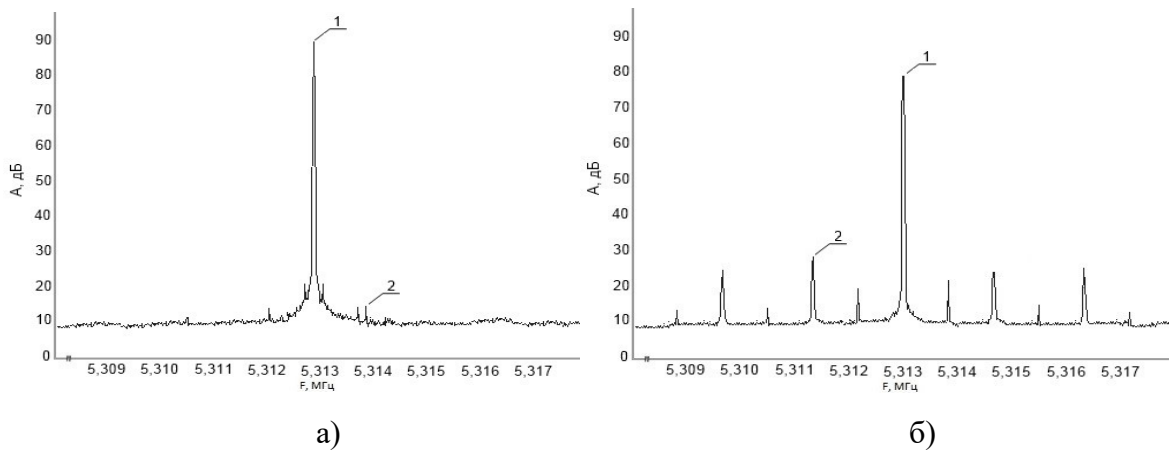


Рис. 2.37. Подавление амплитуды боковых составляющих в полосе 6 кГц.

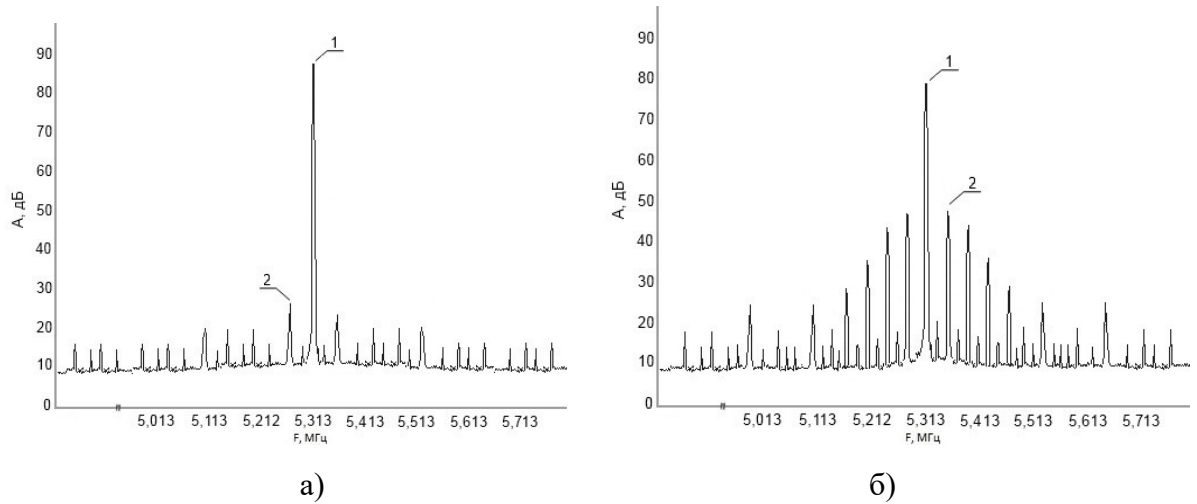


Рис. 2.38 Подавление амплитуды боковых составляющих в полосе 600 кГц.

Полученные экспериментальные характеристики разработанных синтезаторов оказались несколько лучше результатов, полученных при моделировании. Это связано с тем, что при моделировании использовалась модель, не учитывающая использование аналоговых резонансных LC - контуров в схемах СЧ, улучшающих спектр выходного сигнала.

Необходимо отметить, что полученные спектральные характеристики остаются неизменными в широком диапазоне изменения значений температуры от минус 10 до 50 °С, что подтверждает устойчивость

разработанной схемы формирования сигнала СВЧ возбуждения к изменению температуры.

Разработанный мною метод формирования дробной части частоты позволил исключить из новой конструкции синтезатора кварцевый фильтр. Кварцевый фильтр при хорошей частотной избирательности (добротность порядка $2 \cdot 10^3$) имеет высокую температурную зависимость выходной частоты. В новой конструкции СЧ при его отсутствии уровень подавления комбинационных составляющих не ухудшился, а температурно-зависимых элементов стало меньше. Это позволяет улучшить температурный коэффициент частоты (ТКЧ) всего КСЧ в целом.

Сравнение полученных результатов для разработанных и ранее применявшихся СЧ представлено в приложении 2 в таблицах 2.2 и 2.3.

Анализ полученных результатов показывает, что подавление паразитных боковых амплитудных составляющих в спектре выходного сигнала в полосах 6 кГц и 600 кГц улучшено на 25 и 23 % соответственно для цезиевого СЧ, и на 40 и 71 % соответственно в полосах 6 кГц и 600 кГц для рубидиевого СЧ [115-117].

Как уже отмечалось ранее, величина подавления боковых амплитудных составляющих является очень важной характеристикой для синтезатора частоты КСЧ. Наличие побочных гармоник в спектре выходного сигнала синтезатора частоты вызывает сдвиг номинального значения частоты выходного сигнала КСЧ [2-4]. Этот сдвиг можно оценить, используя данное соотношение:

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{A}{I} \frac{(\delta f)^2}{f(f-f_s)}, \quad (2.17)$$

где A -амплитуда боковых составляющих, I -амплитуда несущей, δf - ширина спектральной линии, $(f - f_s)$ -расстройка боковых составляющих относительно вершины спектральной линии.

В разработанной мною конструкции синтезатора частоты при подавлении боковых амплитудных составляющих не менее чем -80 дБ, ширине спектральной линии 500 Гц и отстройке боковых составляющих на 1 кГц относительный сдвиг частоты атомного перехода составляет $\frac{\Delta f}{f} = 2,2 \cdot 10^{-14}$. Ранее разработанных конструкция синтезатора относительный сдвиг частоты составлял $5,62 \cdot 10^{-14}$ Гц.

В результате уменьшения сдвига частоты центрального резонанса Δf происходит более точная настройка на центр резонансной линии. Это приводит к более точному установлению номинального значения частоты выходного сигнала КСЧ.

2.5 Выводы.

Проведенные экспериментальные исследования характеристик выходного сигнала разработанной конструкции СЧ, подтвердили обоснованность разработанной мною математической модели и показали преимущества новой схемы формирования выходного сигнала синтезатора частоты по сравнению с ранее применяемыми.

Результаты экспериментов, проведенные в течении трех лет по исследованию выходных характеристик нескольких десятков СЧ, показали их хорошую повторяемость. Отклонение между значениями характеристик во всех изготовленных СЧ не превышало 1 % при исследованиях на разработанном стенде при различных температурных режимах.

Кроме улучшенных спектральных характеристик, напрямую влияющих на характеристики выходного сигнала КСЧ, возможность перестройки выходной частоты СЧ в широком диапазоне, позволяет реализовать метод

автоматической стабилизации магнитного поля в цезиевом и рубидиевом стандартах частоты, а также реализовать метод многопозиционной девиации в рубидиевом стандарте частоты для одновременной работы основного кольца системы АПЧ, обеспечивающего автоматическую подстройку кварцевого генератора, и работы второго кольца системы АПЧ по контрольной частоте девиации для накопления данных о сигнале ошибки и использования этих данных для оценки изменения и корректировки характеристик выходного сигнала КСЧ.

ГЛАВА 3. МЕТОД СТАБИЛИЗАЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В КВАНТОВЫХ СТАНДАРТАХ ЧАСТОТЫ НА АТОМАХ ЦЕЗИЯ-133 И РУБИДИЯ-87 И МНОГОПОЗИЦИОННОЙ ДЕВИАЦИИ РАБОТЫ КОЛЬЦА АПЧ КВАНТОВОГО СТАНДАРТА ЧАСТОТЫ НА АТОМАХ РУБИДИЯ-87

3.1. Расчет сдвига частоты эталонного перехода обусловленного флуктуациями магнитного поля

Сдвиги эталонного атомного перехода атомов цезия-133 и рубидия-87 могут порождаться флуктуациями внутренних параметров квантового дискриминатора, а также флуктуациями параметров узлов и блоков, принимающих участие в формировании сигнала СВЧ - возбуждения, например флуктуации мощности сигнала СВЧ возбуждения или флуктуации источника тока, создающего постоянное магнитное поле в АЛТ КСЧ на атомах цезия или в квантовом дискриминаторе КСЧ на атомах рубидия.

КСЧ на атомах цезия и рубидия находят обширное применение во многих областях науки и техники, и в первую очередь, где требуется высокая долговременная стабильность частоты выходного сигнала [43-46].

Для улучшения выше указанной характеристики, в том числе и на более длительных временах наблюдения, необходимо минимизировать сдвиги частоты эталонного перехода, проявляющиеся в течение срока эксплуатации квантовых стандартов частоты.

На примере цезиевого КСЧ проведем расчет сдвига частоты эталонного перехода, вызванного флуктуациями магнитного поля.

Перечень всех известных эффектов [2-6], создающих систематические сдвиги частоты эталонного атомного перехода в атомно-лучевом стандарте частоты по величине $> 1 \cdot 10^{-14}$ приведен в таблице 3.1 (приложение 3).

Анализ данных, представленных в таблице, показывает, что влияние магнитного поля на величину сдвига частоты центрального резонанса – наибольшее. Разработка системы стабилизации магнитного поля позволит обеспечить автоматическое поддержание на заданном уровне значения магнитного поля, исключая его дрейф. Это приведет к улучшению одной из главных метрологических характеристик цезиевых атомных часов – долговременной стабильности частоты.

Атом цезия в основном состоянии имеет два сверхтонких подуровня с квантовыми числами $F=4$ и $F=3$, которые расщепляются в магнитном поле на 16 компонент. В соответствии с правилами отбора возможны 7 переходов между компонентами сверхтонких подуровней, которые представлены на рис. 4.1.

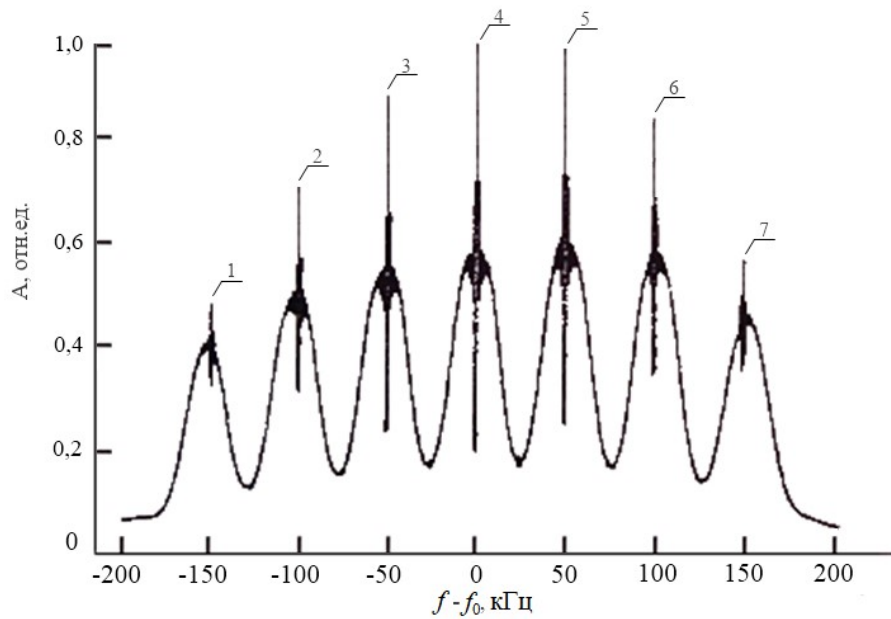


Рис. 3.1. СВЧ-резонансы в цезиевой атомно-лучевой трубке.

Точность выходного сигнала стандарта частоты зависит от величины сдвига частоты центрального резонанса. Нужно отметить, что в присутствии постоянного магнитного поля, частотный сдвиг испытывает не только центральный резонанс (на рис. 3.1 отмечен как «4»), но и все остальные 6 переходов ($3, m_f \leftrightarrow 4, m_f$), для которых $\Delta m_f = 0$. Для того, чтобы выразить эти сдвиги в функциональной зависимости от величины магнитной индукции - B и от атомных констант, воспользуемся уравнением Брайта-Раби:

$$E(F, m_F) = -\frac{h\nu}{2(2I+1)} - g_I \mu_B B m_F + \varepsilon \frac{h\nu}{2} \left(1 + \frac{4m_F}{2I+1} x + x^2\right)^{\frac{1}{2}}, \quad (3.1)$$

где $E(F, m_F)$ – значение энергии атомов в основном состоянии; ν – частота невозмущенного перехода, I – квантовое число ядерного спина; g_I – фактор Ландэ для электрона; μ_B – магнетон Бора; B – величина индукции магнитного поля; m_F – магнитное квантовое число; $x = \frac{(g_j + g_I) \mu_B B}{h\nu}$.

Если $F=I+1/2$, то $\varepsilon = +1$, а если $F=I-1/2$, то $\varepsilon = -1$, то соотношение (3.1) можно использовать для вычисления сдвига частоты любого перехода между двумя сверхтонкими подуровнями в зависимости от величины магнитной индукции.

Расчет частотного сдвига центрального резонанса $|F = 3, m_f = 0\rangle \leftrightarrow |F = 4, m_f = 0\rangle$, возникающий в присутствии магнитного поля, позволяет получить следующие соотношения:

$$E(F = 4, m_F = 0) = -\frac{h\nu}{2(2\frac{7}{2}+1)} + \frac{h\nu}{2}(1 + x^2)^{\frac{1}{2}} \quad (3.2)$$

$$E(F = 3, m_F = 0) = -\frac{h\nu}{2(2\frac{7}{2}+1)} - \frac{h\nu}{2}(1 + x^2)^{\frac{1}{2}} \quad (3.3)$$

Для вычисления разницы энергий двух возмущенных подуровней с квантовыми числами $F = 3$ и $F = 4$ из (3.2) вычтем (3.3) и получим (3.4):

$$\Delta E = E(F = 4, m_F = 0) - E(F = 3, m_F = 0) = h\nu(1 + x^2)^{\frac{1}{2}} \quad (3.4)$$

Учитывая, что разность энергий двух невозмущенных подуровней с квантовыми числами $F = 3$ и $F = 4$ составляет $\Delta E' = h\nu$, то величина частотного сдвига $\Delta\nu_B$, обусловленного наличием магнитного поля, может быть найдена по формуле:

$$\Delta\nu_B = \frac{\Delta E}{h} - \frac{\Delta E'}{h} = \nu(1 + x^2)^{\frac{1}{2}} - \nu = \nu((1 + x^2)^{\frac{1}{2}} - 1) \quad (3.5)$$

Для вычисления частотного сдвига $\Delta\nu_B$ необходимо вычислить величину $(1 + x^2)^{\frac{1}{2}}$. Возвращаясь к формуле (1), оценим величину $x = \frac{(g_j + g_I)\mu_B B}{h\nu}$.

Оценка численного значения x при значениях $g_I = 2,0025$; $g_J = -0,398 \cdot 10^{-3}$; $\mu_B = 927,4 \cdot 10^{-29} \frac{\text{Дж}}{\text{Тл}}$; $h = 6,6 \cdot 10^{-34} \frac{\text{Дж}}{\text{Гц}}$; $\nu = 9,192 \cdot 10^9$ Гц, показывает, что x – малая величина ($x \ll 1$).

Поэтому при нахождении значения частотного сдвига $\Delta\nu_B$ воспользуемся разложением Тейлора:

$$\begin{aligned} \Delta\nu_B &= \nu((1+x^2)^{\frac{1}{2}} - 1) = \nu \left(1 + \frac{x^2}{2} - \frac{x^4}{8} + \frac{x^8}{16} - \dots - 1 \right) = \\ &= \nu \left(\frac{x^2}{2} - \frac{x^4}{8} + \frac{x^8}{16} - O(x^8) \right) \end{aligned}$$

Пренебрегая более высокими степенями x^2 , окончательно получаем,

$$\Delta\nu_B = \nu \frac{x^2}{2} = \frac{\nu \left((g_j + g_I) \mu_B B \right)^2}{2(h\nu)^2} = \frac{\left((g_j + g_I) \mu_B B \right)^2}{2h^2\nu} \quad (3.6)$$

Из уравнения (4.6) можно сделать вывод, что сдвиг частоты центрального резонанса $|F=3, m_f=0\rangle \leftrightarrow |F=4, m_f=0\rangle$ квадратично зависит от величины индукции магнитного поля, поэтому переход является магнитонезависимым. При величине индукции магнитного поля B , равной 8 мкТл, сдвиг частоты $\Delta\nu_B$ составит:

$$\Delta\nu_B = \frac{\left((g_j + g_I) \mu_B B \right)^2}{2h^2\nu} = \frac{\left((2,0025 - 0,3988 \cdot 10^{-3}) \cdot 927,4 \cdot 10^{-26} \frac{\text{Дж}}{\text{Тл}} \cdot 8 \cdot 10^{-6} \text{ Тл} \right)^2}{2 \cdot \left(6,626 \cdot 10^{-34} \frac{\text{Дж}}{\text{Гц}} \right)^2 \cdot 9,192631770 \cdot 10^9 \text{ Гц}} = 2,733 \text{ Гц}$$

Проведя аналогичные вычисления сдвига частоты для резонансного перехода $|F=3, m_f=1\rangle \leftrightarrow |F=4, m_f=1\rangle$ получим, что величина частотного сдвига $\Delta\nu'_B$ равняется:

$$\begin{aligned} \Delta\nu'_B &= \nu((1+0,5x+x^2)^{\frac{1}{2}} - 1) = \nu \left(1 + 0,25x + 0,5x^2 - \frac{x^2}{32} - \frac{x^3}{8} - \frac{x^4}{8} - \dots - 1 \right) = \\ &= \nu(0,25x + O(x^2)) \end{aligned} \quad (3.7)$$

Пренебрегая более высокими степенями x окончательно получаем:

$$\begin{aligned} \Delta v'_B = 0,25vx &= \frac{(g_j + g_l)\mu_B B}{4h} = \\ &= \frac{(2,0025 - 0,3988 \cdot 10^{-3}) \cdot 927,4 \cdot 10^{-26} \frac{\text{Дж}}{\text{Тл}} \cdot 8 \cdot 10^{-6} \text{ Тл}}{4 \cdot 6,626 \cdot 10^{-34} \frac{\text{Дж}}{\text{Гц}}} = 56,206 \text{ кГц} \end{aligned} \quad (3.8)$$

Из полученных выражений (3.7) и (3.8) видно, что, во-первых, резонансный переход $|F=3, m_f=1\rangle \leftrightarrow |F=4, m_f=1\rangle$ имеет линейную зависимость от величины магнитного поля, и при малых величинах магнитного поля сдвиг частоты имеет намного большее значение, чем у перехода $|F=3, m_f=0\rangle \leftrightarrow |F=4, m_f=0\rangle$. Переход $|F=3, m_f=1\rangle \leftrightarrow |F=4, m_f=1\rangle$ является магнитозависимым. Во-вторых, амплитуда частотного отклика (рис. 3.1) достаточно велика, что позволяет провести частотную модуляцию по этому резонансному переходу. Эти два установленных мною фактора были использованы при разработке метода подстройки магнитного поля КСЧ и практической его реализации.

Проделав аналогичные вычисления с использованием формулы Брайта-Раби для атома рубидия-87, можно заключить, что для резонансных переходов $|F=2, m_f=0\rangle \leftrightarrow |F=1, m_f=0\rangle$ и $|F=2, m_f=1\rangle \leftrightarrow |F=1, m_f=1\rangle$, также соответственно свойственны квадратичная и линейная зависимость от величины магнитного поля. А переход $|F=2, m_f=1\rangle \leftrightarrow |F=1, m_f=1\rangle$, отстоящий от эталонного на 83 кГц, также может быть использован при разработке метода подстройки магнитного поля КСЧ на атомах рубидия-87.

3.2. Разработка системы стабилизации магнитного поля квантовых стандартов частоты

В теории сдвига частоты центрального резонанса атомов цезия или рубидия из-за изменения магнитного поля можно учесть при расчете

функциональной зависимости изменения энергии атомов в основном состоянии E от значения магнитного поля и атомных констант. Но на практике при любых изменениях магнитного поля происходят сдвиги частот резонансов, значения которых учесть заранее невозможно.

Использование разработанной мною конструкции СЧ позволяет в отличие от ранее используемой осуществлять подстройку величины магнитного поля по соседнему резонансному переходу атомов цезия-133 $|F=3, m_f=1\rangle \leftrightarrow |F=4, m_f=1\rangle$ или атомов рубидия-87 $|F=2, m_f=1\rangle \leftrightarrow |F=1, m_f=1\rangle$, соответственно в цезиевом и рубидиевом КСЧ. Использование этой дополнительной подстройки в комбинации с основной по центральному максимуму позволяет поддерживать заданное значение магнитного поля внутри КСЧ постоянным. В ранее используемых конструкция КСЧ алгоритм подстройки магнитного поля отсутствовал [113, 116-120].

Структурная схема разработанной мною системы стабилизации магнитного поля для КСЧ на атомах цезия, представлена на рис. 3.2.

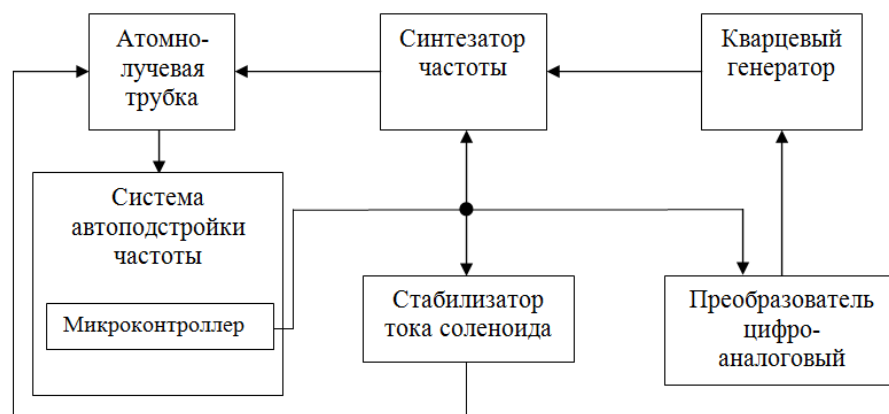


Рис.3.2. Структурная схема системы стабилизации магнитного поля.

При установленном значении магнитного поля, величина разности между центральным и соседним переходом ранее мною была определена и составляет 56,206 кГц. 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.

Благодаря новому методу, поочередно замыкая кольца автоподстройки на центральном и соседнем переходе, системой автоподстройки мы подстраиваем и частоту кварцевого генератора к частоте атомного перехода и поддерживаем заданное значение магнитного поля внутри атомно-лучевой трубки КСЧ на постоянном уровне.

В этом случае исключаются эффекты, связанные с изменениями магнитного поля (например, долговременный дрейф источника тока, температурная зависимость, влияние внешнего магнитного поля и т.д.) [116-120].

Метод с аналогичным алгоритмом работы основного кольца системы АПЧ и дополнительным при работе по соседнему резонансному переходу находит реализацию и в КСЧ на атомах рубидия-87.

3.3 Экспериментальное исследование работы системы стабилизации магнитного поля атомно-лучевой трубки

Работа системы стабилизации магнитного поля, реализованная по разработанному мною методу, была проверена в составе квантового стандарта частоты. Квантовый стандарт частоты на атомах цезия-133 был размещен в климатической камере для создания разных температурных режимов работы КСЧ и самой системы стабилизации магнитного поля. При этом в ходе проведения эксперимента происходила непрерывная запись кодов подстройки тока соленоида при различных температурах. Полученная зависимость изменения кодов подстройки тока соленоида от изменения температуры представлена на рис. 3.3.

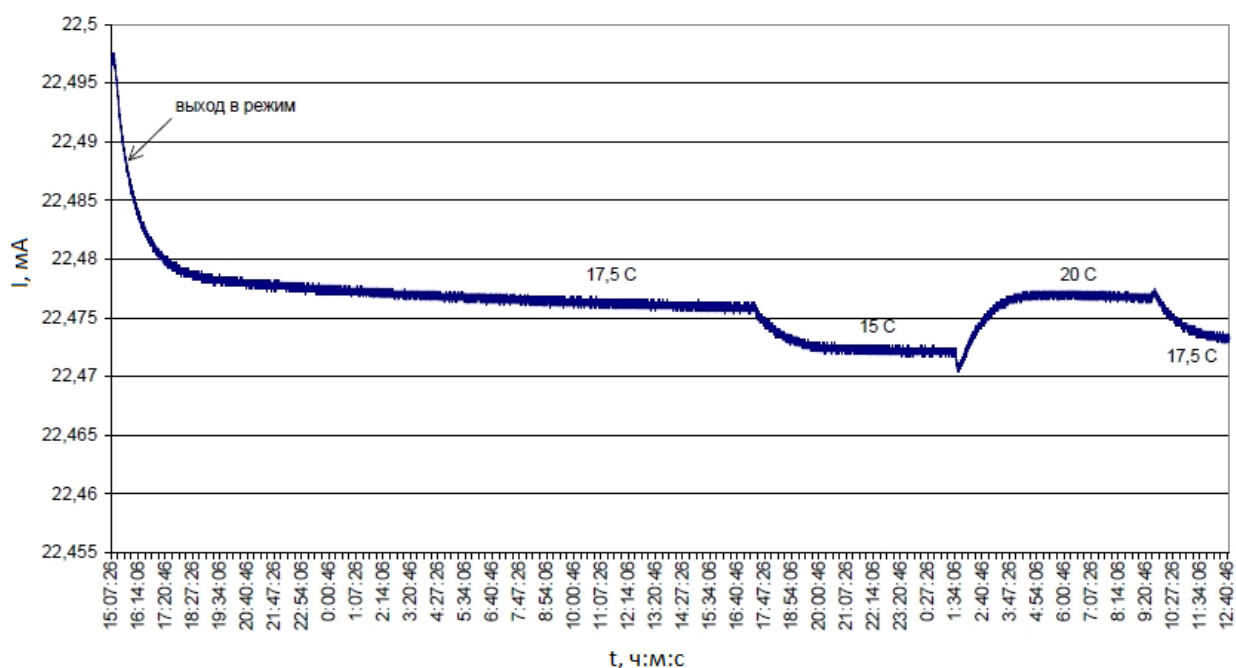


Рис. 3.3. График изменения кодов подстройки тока соленоида в зависимости от изменения температуры.

На рис. 3.3 изменение кодов подстройки тока выражено в единицах мА, соответствующих устанавливаемому значению тока соленоида. После выхода в режим, изменения температуры проводились через 8 часов.

При изменении температуры происходило изменение режима работы функционального узла, задающего ток соленоида. Как результат этого, происходит изменение значения тока соленоида и изменение магнитного поля. Система стабилизации магнитного поля «отслеживает» изменение магнитного поля по сдвигу частоты резонансного перехода $|F=3, m_f=1\rangle \leftrightarrow |F=4, m_f=1\rangle$, и обработав сигнал ошибки, выдает необходимый код изменения магнитного поля, для поддержания его на первоначально установленном значении.

На рис. 3.4 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.

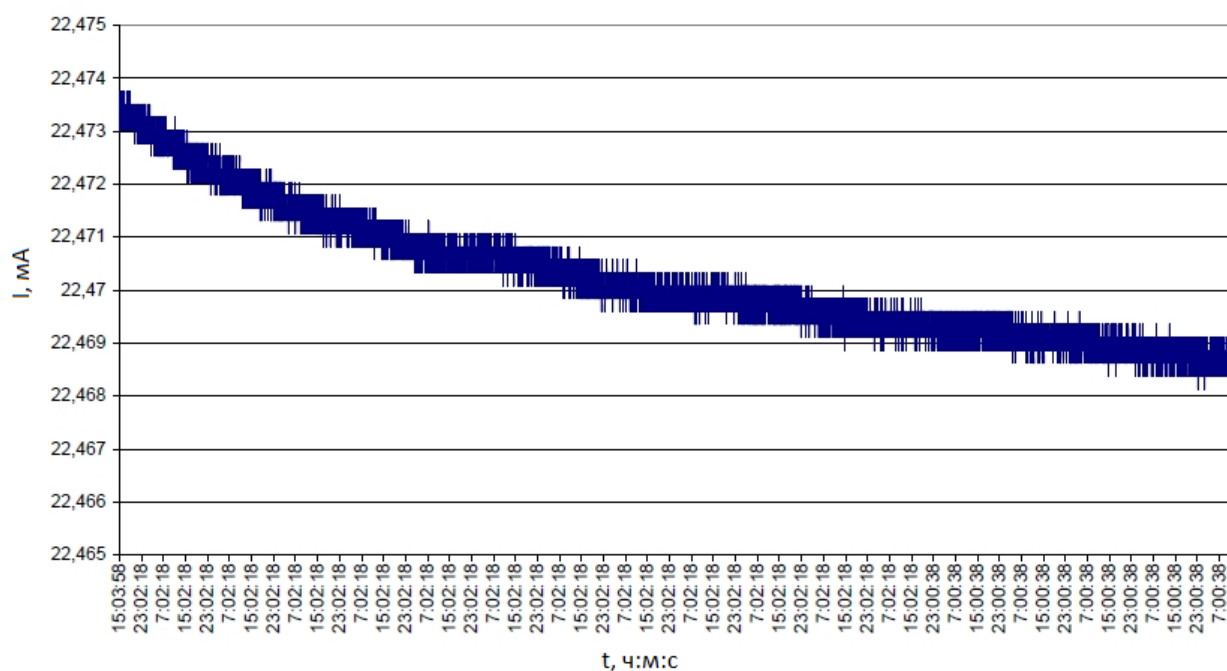


Рис. 3.4. Дрейф источника тока соленоида при 16-ти дневной непрерывной работе КСЧ.

Из графика видно, что с течением времени происходит плавное изменение значений кодов подстройки тока соленоида (здесь изменение кодов подстройки тока также выражено в единицах мА, соответствующих

устанавливаемому значению тока соленоида). 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 [120].

Также были исследованы характеристики КСЧ с разработанной системой подстройки магнитного поля.

На рис. 3.5 представлено изменение амплитуды тока I_d в токовом детекторе при сканировании частоты сигнала СВЧ возбуждения f_{mw} в окрестности резонансной частоты f_0 (спектральная линия) при подстройке магнитного поля по соседнему резонансу и без неё.

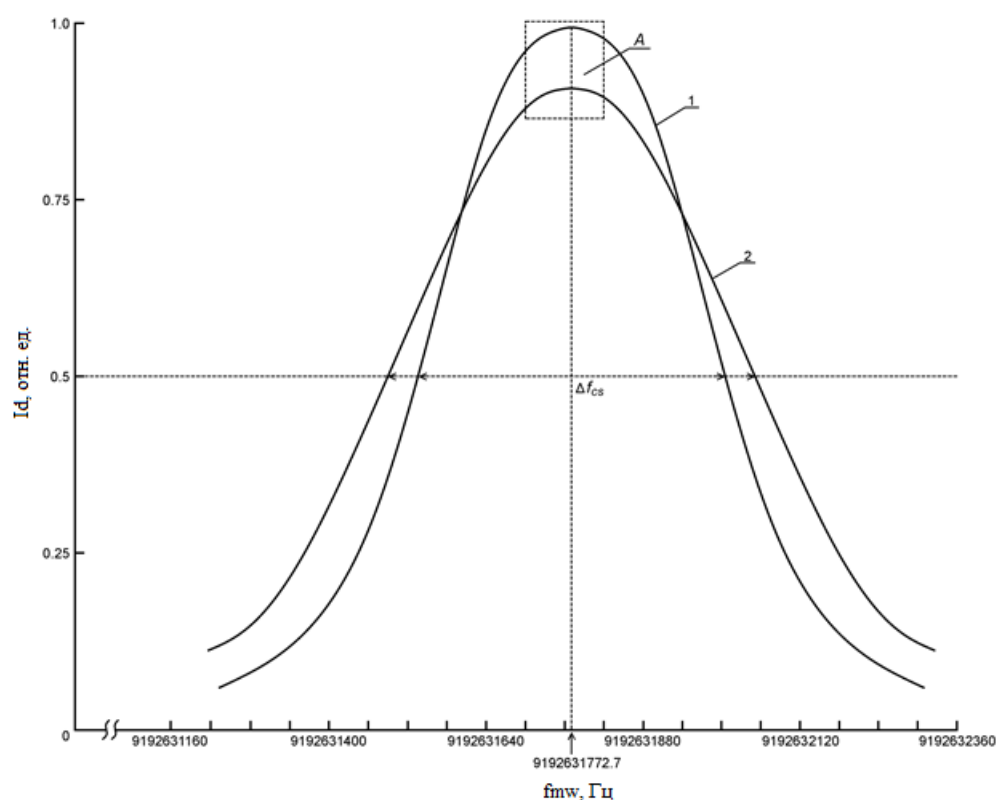


Рис. 3.5 Зависимость амплитуды I_d в токовом детекторе 6 при сканировании частоты сигнала СВЧ возбуждения f_{mw} . График 1 соответствует регистрации сигнала в токовом детекторе при использовании подстройки магнитного поля в АЛТ, график 2 – без подстройки поля.

Анализ полученных результатов (рис. 3.5) показывает, что разработанная нами система подстройки магнитного поля компенсирует случайное изменение величины магнитного поля и поддерживает его на изначально заданном уровне, препятствуя смещению резонансной линии по частоте. Смещение резонансной частоты атомного перехода, вызванное флуктуацией магнитного поля, при таком масштабе на рис. 3.5 не наблюдается. Поэтому на рис. 3.6 представлен фрагмент А пиков, представленных на рис. 3.5.

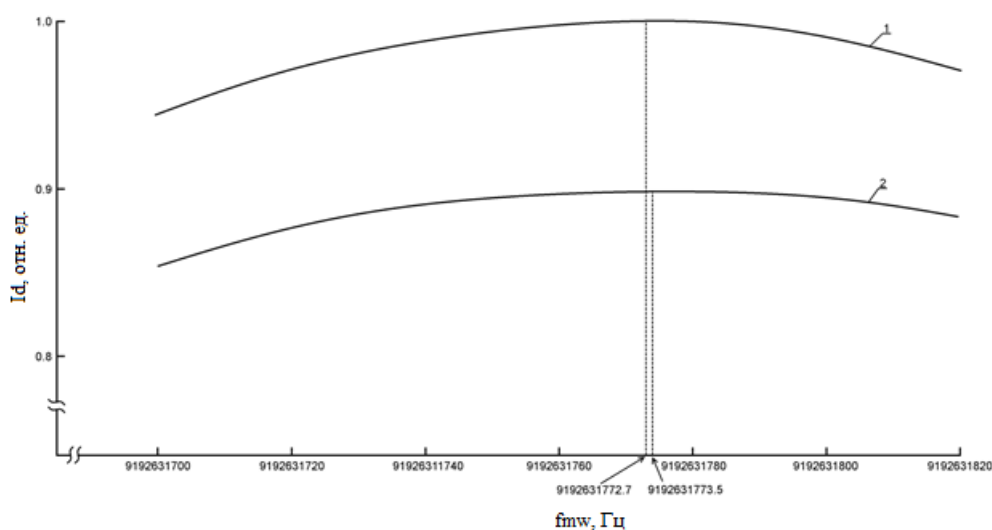


Рис. 3.6 Фрагмент А зависимости амплитуды I_d в токовом детекторе б при сканировании частоты сигнала СВЧ возбуждения f_{mw} в окрестности резонанса. График 1 соответствует регистрации сигнала в токовом детекторе при использовании подстройки магнитного поля в АЛТ, график 2 – без подстройки поля.

Это позволило установить наличие смещения частоты f_0 на 0.8 Гц. Данное значение смещения частоты совпадает с расчетным, вычисленным с помощью формулы Брайта-Раби [114].

Такой непрогнозируемый уход частоты f_0 создает дополнительные погрешности в определении действительного значения выходной частоты КСЧ, что приводит к ухудшению долговременной стабильности частоты КСЧ на длительных временах наблюдения. Использование разработанной дополнительной подстройки магнитного поля в комбинации с основной по

центральному максимуму резонанса позволяет поддерживать заданное значение поля внутри АЛТ постоянным.

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

Использование новой разработанной конструкции СЧ, в которой реализована перестройка выходной частоты СЧ в широком диапазоне, 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.3.7.

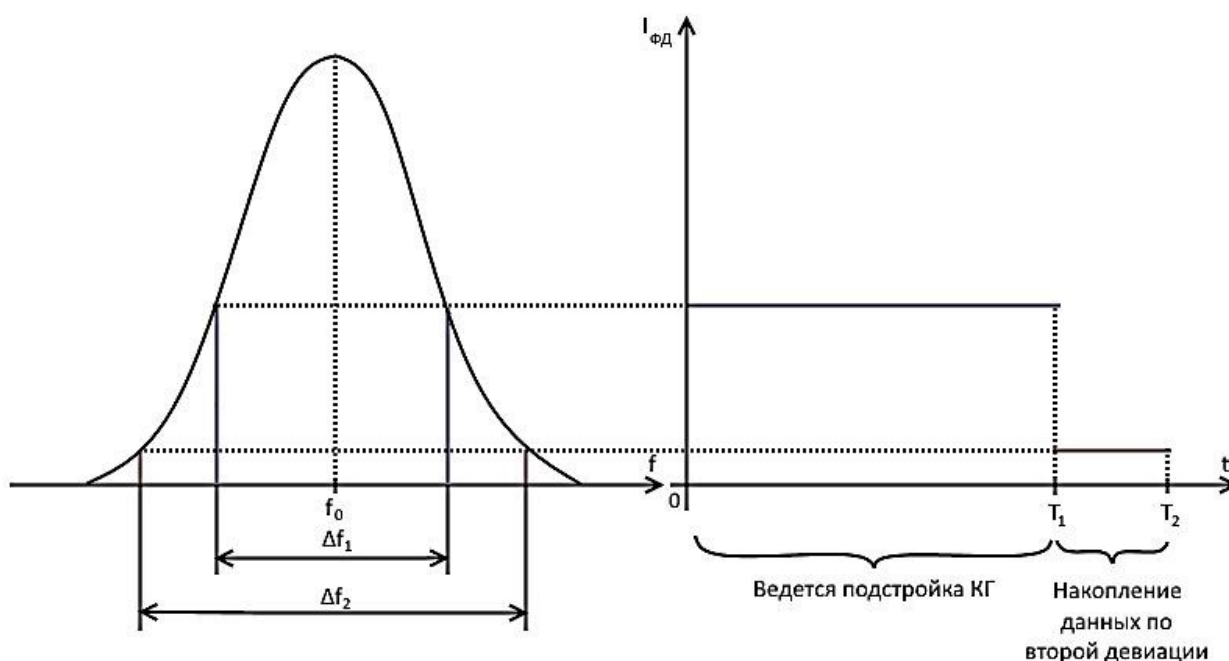


Рис. 3.7 – Режим работы КСЧ на разных девиациях частоты

При этом они используются для решения разных задач. По рабочей частоте девиации Δf_1 производится подстройка частоты кварцевого генератора, следовательно, на ее работу приходится большая часть периода

(3/4 периода частоты модуляции F_m). Продолжительность работы на данной частоте составляет $T_1 = N_1 \cdot 1/F_m$, где N_1 – количество периодов сигнала F_m , отведенных на работу по рабочей частоте девиации. А 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. На ее работу приходится 1/4 периода частоты модуляции F_m длительностью $T_2 - T_1 = N_2 \cdot 1/F_m$, где N_2 – количество периодов сигнала F_m , отведённых второй девиации частоты.

Для реализации вышеуказанного метода было разработано программное обеспечение управляющего микроконтроллера и проверено в работе КСЧ на атомах рубидия-87.

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. Зависимость изменения относительного значения выходной частоты ε КСЧ на атомах рубидия-87, а также зависимость изменения сигнала ошибки I_ϕ по контрольной частоте девиации, зафиксированные при различных значениях температуры окружающей среды (15°C и 20°C) на интервале проведения эксперимента 10 суток, представлены на рис.3.8 и 3.9 соответственно.

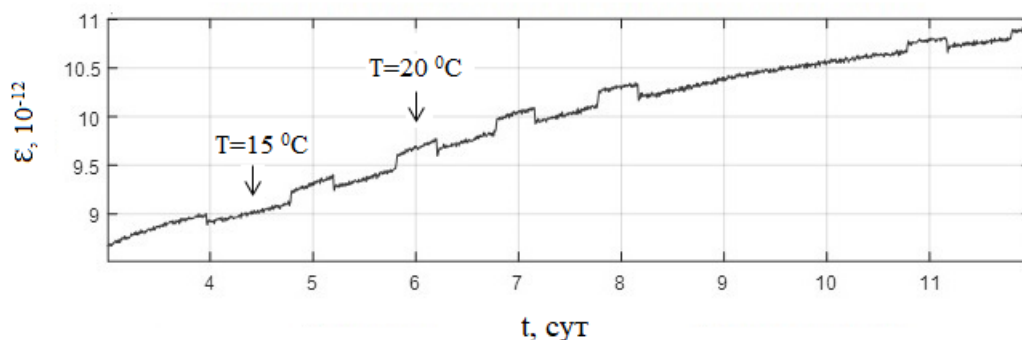


Рис. 3.8 Зависимость изменения относительного значения выходной частоты ϵ КСЧ на атомах рубидия-87 при различных значениях температуры окружающей среды ($15\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $20\text{ }^{\circ}\text{C}$) с течением времени.

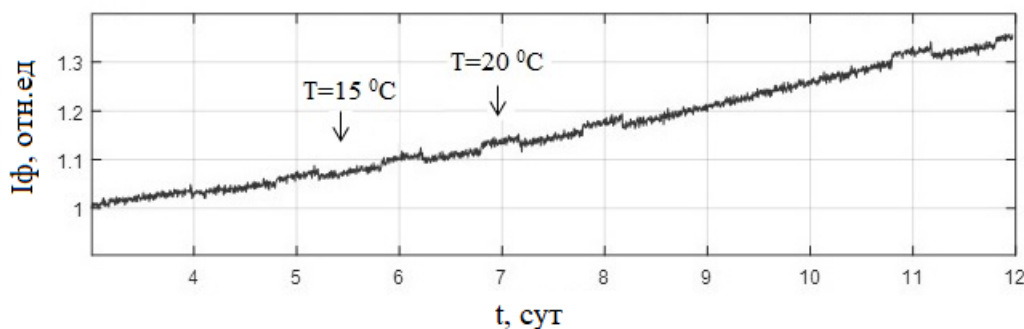


Рис. 3.9 Зависимость изменения сигнала ошибки I_{ϕ} по контрольной частоте девиации КСЧ на атомах рубидия-87 при различных значениях температуры окружающей среды ($15\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $20\text{ }^{\circ}\text{C}$) с течением времени.

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. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ КВАНТОВОГО СТАНДАРТА ЧАСТОТЫ НА АТОМАХ ЦЕЗИЯ -133

4.1 Экспериментальная установка и методика проведения измерений.

Для проведения экспериментальных исследований выходных характеристик квантового стандарта частоты на атомах цезия-133 была собрана экспериментальная установка, структурная схема которой представлена на рис. 4.1.



Рис. 4.1. Структурная схема установки для проведения эксперимента

Сигнал с эталонного и исследуемого прибора поступают на компаратор VCH-308A (рис. 4.1). В компараторе реализован фазо - временной метод. Информация о разности фаз исследуемых сигналов преобразуются во временные интервалы, которые измеряются с помощью цифрового измерителя интервалов времени. Далее сигнал поступает на персональный компьютер, где осуществляется архивация и обработка информации.

Управление и контроль измеряемых параметров осуществлялся через схему управления с использованием системы сбора данных Agilent 34970A.

Система сбора данных подключена к тому же компьютеру, что и компаратор. Компьютер обеспечивает непрерывный процесс обработки и архивирования данных.

Экспериментальное исследование работы КСЧ, а также исследование характеристик их выходных сигналов проводилось в термовакуумной камере, внешний вид которой представлен на рис. 4.2. Диапазон изменения температуры, при котором проводились исследования составил от 0 до 40 °С.

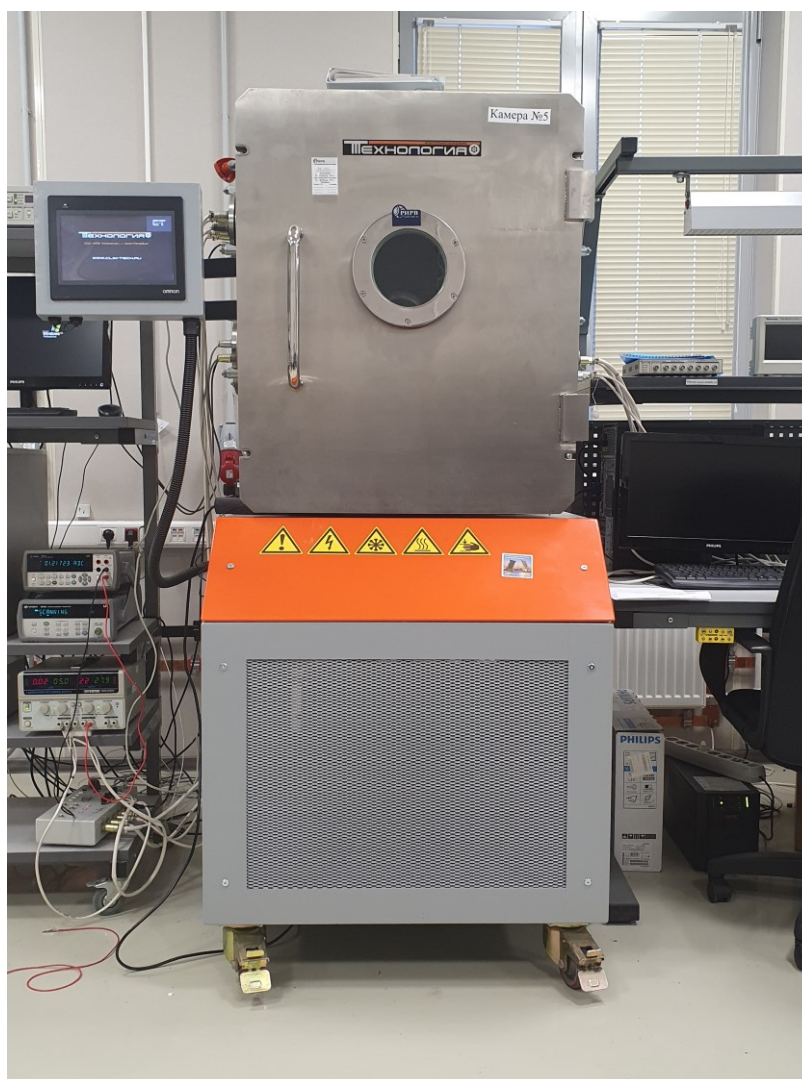


Рис. 4.2. Внешний термовакуумной камеры.

4.2 Экспериментальное исследование работы КСЧ на атомах цезия - 133 с разработанной новой схемой формирования сигнала СВЧ-возбуждения совместно с новой системой стабилизации магнитного поля

На экспериментальной установке (рис. 4.1) было проведено два эксперимента для вычисления стабильности частоты: с использованием новой макетной конструкции КСЧ, в которой используются новый метод формирования сигнала СВЧ возбуждения и подстройки магнитного поля, и ранее применяемой. Каждые 100 секунд производилось измерение выходной частоты КСЧ. Полученные значения частоты записывались в память компьютера и далее использовались для вычисления параметров, позволяющих оценить нестабильность частоты.

В качестве параметра, позволяющего оценить нестабильность частоты, была выбрана дисперсия Аллана.

Расчетная формула для вычисления дисперсии Аллана представлена ниже (ГОСТ 8.567-2014):

$$\sigma^2 = \frac{\sum_i^n \varepsilon_i^2}{2(n-1)}, \quad (4.1)$$

где $\varepsilon_i = \frac{f_{i+1} - f_i}{f}$ - относительная i -я вариация действительного значения меры частоты, n - число вариаций;

После обработки полученных данных были построены графики зависимости значений дисперсии Аллана с использованием (4.1) от времени для новой макетной и предыдущей конструкции КСЧ (рис. 4.3 и рис. 4.4).

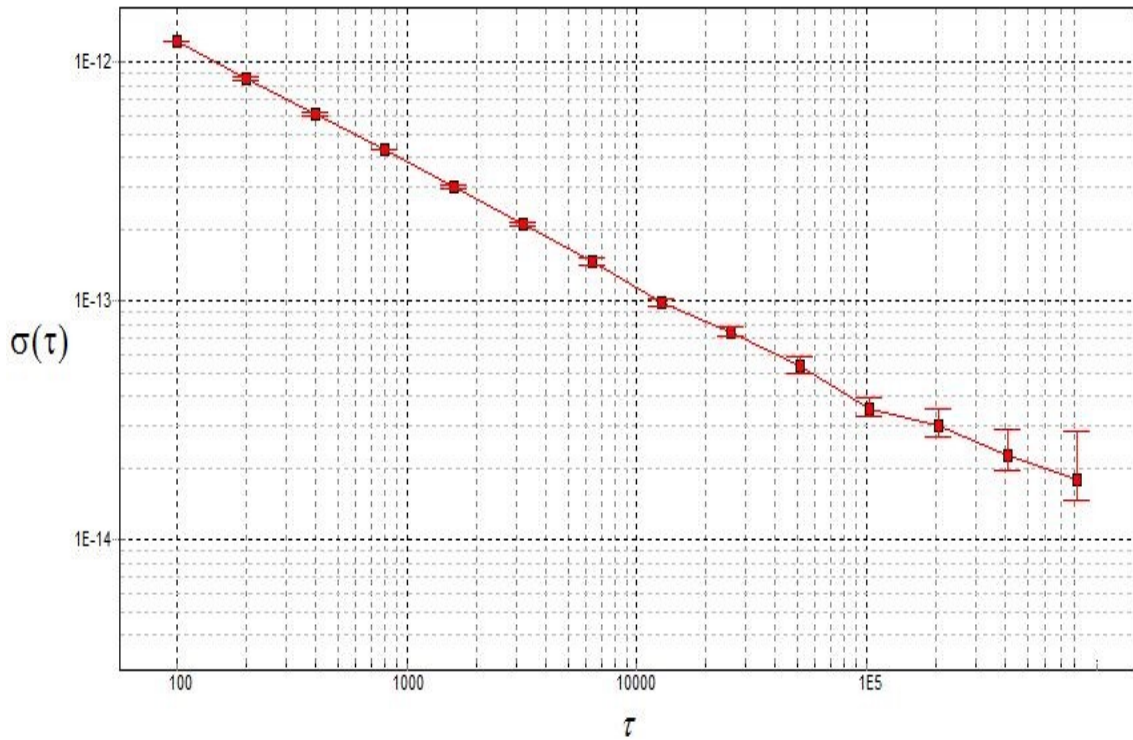


Рис. 4.3. График зависимости значений дисперсии Аллана от времени с использованием нового синтезатора и системой стабилизации магнитного поля

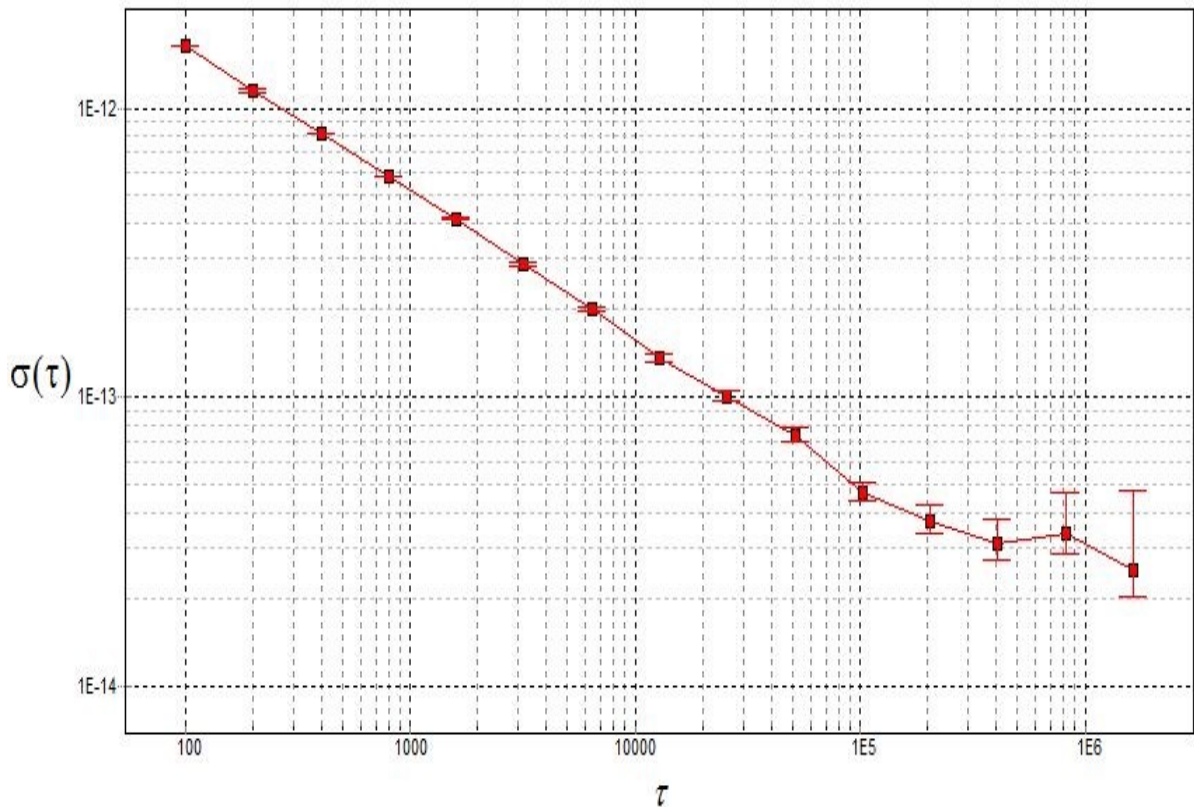


Рис. 4.4. График зависимости значений дисперсии Аллана от времени для КСЧ предыдущей конструкции

Сравнительные результаты величин дисперсии Аллана приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1. Сравнительные результаты для дисперсии Аллана для двух конструкции КСЧ

	100 с	1000 с	1 ч	1 сутки
Новая макетная конструкция	1,2E-12	4,9E-13	1,2E-13	3,5E-14
Предыдущая конструкция	1,3E-12	5,1E-13	1,6E-13	4,7E-14

В таблице 4.1 приведены контрольные типовые значения времени, в которых в соответствии с правилами эксплуатации КСЧ измеряется дисперсии Аллана.

Кроме этого было проведено экспериментальное исследование по определению температурного коэффициента частоты выходного сигнала КСЧ. ТКЧ определяется как отношение изменения номинального значения частоты к изменению температуры на 1 °С.

На рис. 4.5 и 4.6 приведен результат измерения действительного значения частоты ν от времени при изменении внешней температуры от 15 до 20 °С для КСЧ на атомах цезия-133 предыдущей конструкции и с использованием новых методов формирования сигнала СВЧ возбуждения и стабилизации магнитного поля.

По результатам проведенного экспериментального исследования зафиксировано уменьшение температурного коэффициента частоты в 4 раза.

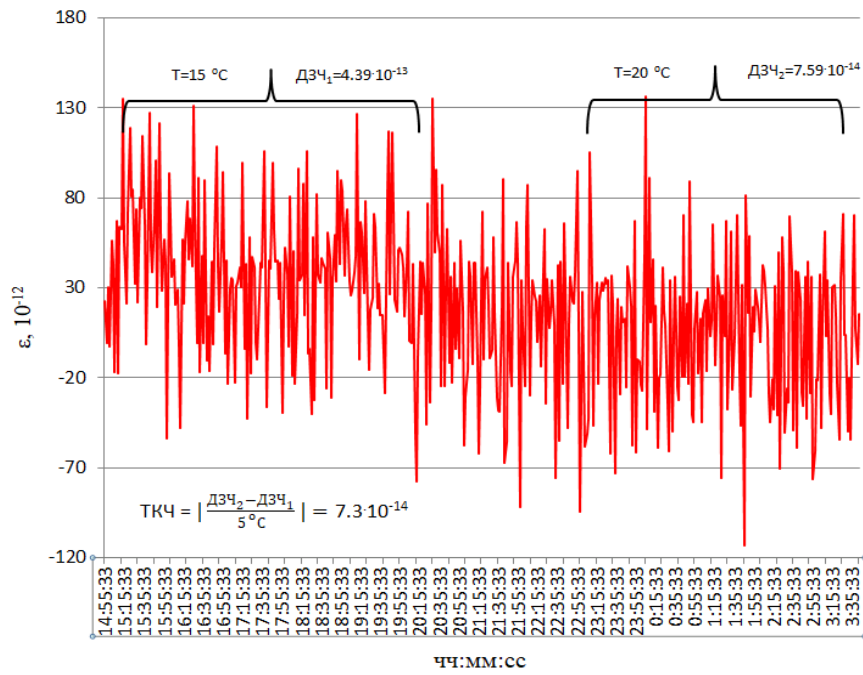


Рис.4.5. Действительное значение частоты ϵ от времени при изменении внешней температуры от 15 до 20 °C в ранее используемой конструкции КСЧ.

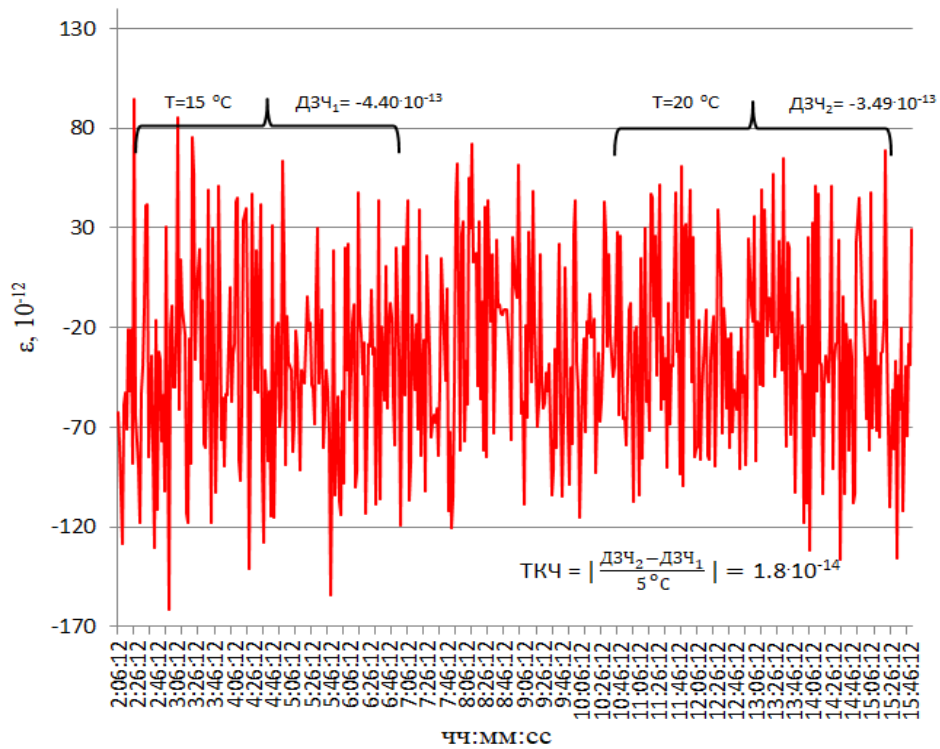


Рис.4.6. Действительное значение частоты ϵ от времени при изменении внешней температуры от 15 до 20 °C в КСЧ с использованием новых методов.

4.3. Выводы

Анализ полученных экспериментальных результатов показал, что использование новых разработанных методов формирования сигнала СВЧ - возбуждения и автоматической подстройки магнитного поля в АЛТ позволяет получить более высокую стабильность выходной частоты КСЧ, а также более низкий температурных коэффициент частоты выходного сигнала КСЧ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения диссертационной работы мною 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 синтезатора частоты 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 синтезатора частоты, 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 15 % 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.

В завершении диссертации автор хотел бы поблагодарить всех, кто помогал ему в работе.

Прежде всего, хотелось бы выразить глубокую благодарность сотрудникам АО «Российский Институт Радионавигации и Времени», в частности коллективу лаборатории квантовых стандартов частоты космического применения – Григорьеву В.И., Грязнову А.С., Кильговатову В.П., а также Шабанову В.Е., Лисицыну Л.А., Дружину В.Е., Тюлякову А.Е., Скобелину А.А.

Хочу также выразить особую признательность сотрудникам АО «Информационные спутниковые системы им. академика М.Ф. Решетнева», Косенко В.Е., Корнаухову В.А., Шаповалову Д.В. за советы и рекомендации при обсуждении полученных результатов.

Автор также признателен сотрудникам кафедры «Квантовая электроника» Дудкину В.И. и Рогову С.А., а также Величко Е.Н., Кружалову С.В., Ермаку С.В. в последствии сотрудникам института «Физики,

нанотехнологий и телекоммуникаций» СПбПУ Петра Великого, где автор учился в аспирантуре за оказанную ему помощь в подготовке диссертационной работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дудкин, В. И. Квантовая электроника / В. И. Дудкин, Л. Н. Пахомов – СПб.: Изд. Политехнического университета, 2012. – 496 с.
2. Одуан, К. Измерение времени. Основы GPS / К. Одуан, Б. Гино – М.: Техносфера, 2002. – 400 с.
3. Риле, Ф. Стандарты частоты. Принципы и приложения / Ф. Риле – Пер. Н.Н. Колачевского. М.: Физматлит, 2009. – 511 с.
4. Акулов, И.И. Кварцевые и квантовые меры частоты / И.И. Акулов, Е.Н. Базаров, Б.И. Макаренко – М.: МО СССР, 1976. – 409 с.
5. Пихтелев, А.И. Стандарты частоты и времени на основе квантовых генераторов и дискриминаторов / А.И. Пихтелев, А.А. Ульянов, Б.П. Фатеев – М.: Сов. Радио, 1978. – 304 с.
6. Григорьянц, В.В. Квантовые стандарты частоты / В.В. Григорьянц, М.Е. Жаботинский, В.Ф. Золин – М.: Наука, 1968. – 288 с.
7. Jacques, V. The Quantum Physics of Atomic Frequency Standards / V. Jacques and Audoin C. – Bristol and Philadelphia: Adam Hilger, 1989. – 1550 p.
8. Forman, P. Atomichron: The atomic clock from concert to commercial product. / P. Forman. // Proceedings of the IEEE. – 1985 – vol. 73, no 7. – pp. 1181-1204.
9. Bauch, A. Caesium atomic clocks: Function, performance and applications / A. Bauch – Meas. Sci Technol. – 2003. – vol. 14. – pp. 1159–1173.
10. Kuster, J.A. Long-term experience with caesium beam frequency standards / J.A. Kuster, L.S. Cutler, E.D. Powers // In proceeding of the 1999 Joint Meeting of the European Frequency and Time Forum and the IEEE International Frequency control Symposium. – 1999 – vol. 87, no 5. – pp.156 – 168.

11. Vanier, J. Atomic frequency standards: Basic physics and impact on metrology. / J. Vanier // In Recent Advantages in Metrology and Fundamental Constants. – 2001 - vol. Course CXLVI. – pp. 397–452.
12. Drullinger, R. E. Primary atomic-frequency standards: New developments. / R. E. Drullinger, S. L. Rolston, and W. M. Itano // Review of Radio Science. – 1996, vol. 90, no 5. – pp. 11–41.
13. Normand, Cyr. All-optical microwave frequency standard / Cyr. Normand, T. Michel, and M. Breton // IEEE Trans. Instrum. Meas. – 1993 – vol. 42. – pp. 640–649.
14. Геворкян, А.Г. Метрологическое обеспечение стандартов частоты и времени различного применения с использованием вторичного эталона ОАО "РИРВ" - ВЭТ-1-13. / А.Г. Геворкян, В.С. Жолнеров, А.Л. Мясников // Сборник тезисов 6-го Международного симпозиума Метрология времени и пространства, Менделеево, 2012, с. 305
15. Беспалый, В.Д. Перспективы развития систем синхронизации и единого времени / В.Д. Беспалый, А.Е. Тюляков, Л.Я. Белов, В.Е. Дружин, В.К. Кошелев // Сборник тезисов 6-го Международного симпозиума Метрология времени и пространства, Менделеево, 2012, с. 324а.
16. Donchenko, S.I. Current State and Outlook for the Development of Instruments for Basic and Metrological Support of the Glonass System / S.I. Donchenko, A.N. Shchipunov, O.V. Denisenko, I.Yu. Blinov, V.N. Fedotov, I.S. Sil'vestrov - Measurement Techniques. – 2008 – vol. 61 – no 1. - pp. 1-8.
17. Maksimenko, S.G. Improvement of the Procedure of Evaluation of the Relative Error of Frequency Measure / S.G. Maksimenko - Measurement Techniques. - 2018. – vol. 61 – no 1. – pp. 17 – 21.

18. Пушкин, С. Б. Государственная служба времени, частоты и определения параметров вращения Земли / С. Б. Пушкин, В. Г. Пальчиков - М.: Издательство «ВНИИФТРИ», 2013. – 234 с.
19. Шебшаевич, В.С.. Сетевые спутниковые радионавигационные системы / В.С. Шебшаевич, П.П. Дмитриев, Н.В. Иванцевич и др. – 2-е изд., перераб. и доп. М.: Радио и связь, 1993. 408 с.
20. Басевич, А. Б. Основные направления совершенствования Государственной системы единого времени и эталонных частот высокой точности / А. Б. Басевич, Л. Я. Белов, П. П. Богданов, В. Е. Дружин, Н. Н. Новиков, А.Е.Тюляков // Труды ИПА РАН. – 2005. – Вып. 13. – с. 278–285.
21. Брагинец, В. Ф. Первые результаты эксплуатации системы высокоточного определения эфемеридно-временной информации в реальном времени для гражданских потребителей и перспективы ее дальнейшего развития / В. Ф. Брагинец, Ю. Г. Сухой, И. А. Бурдин, В. М. Мещеряков. // Труды ИПА РАН. – 2017. – Вып. 42. – С. 41–48.
22. Фатеев, Ю.Л. Использование технологий ГНСС для высокоточных навигационных геостационарных космических аппаратов / Ю.Л. Фатеев, Д.Д. Дмитриев, В.Н. Тяпкин, Н.С. Кремез, В.Н. Ратушняк // Международная Сибирская конференция по управлению и связи (СИБКОН–2015), Омск, 2015, С. 7147250.
23. Пасынок, С. Л. Модернизация средств определения параметров вращения Земли в интересах системы ГЛОНАСС / С. Л. Пасынок // Мир измерений. – 2016. – № 3. с. 22 – 24.
24. Перов, А. И. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / А. И. Перов, В. Н. Харисов - М.: Радиотехника, 2010. – 801 с.
25. Дружин, В. Е. Решение задачи навигации и синхронизации космических аппаратов дистанционного зондирования Земли / В. Е. Дружин, Д. Н. Федоров // Тезисы докладов Седьмой всероссийской

- конференции «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (КВНО-2017). СПб.: ИПА РАН, 2017. – с. 116.
26. Фаткулин, Р. Ф. Космический комплекс системы ГЛОНАСС / Р.Ф. Фаткулин, Н.А. Тестоедов, В.Е. Косенко, С.Г. Ревнивых // Восьмая Всероссийская конференция «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение», Санкт-Петербург, 2019.
27. Шебшаевич, Б. В. О направлениях совершенствования и развития бортовых средств частотно-временного обеспечения ГЛОНАСС / Б. В. Шебшаевич // Восьмая Всероссийская конференция «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение», Санкт-Петербург, 2019.
28. Тюляков А.Е. Бортовые часы системы ГЛОНАСС, этапы совершенствования, результаты натурных испытаний / А.Е. Тюляков, А.Б. Басевич, В.И. Синицин, В.Е. Шабанов, Д.В. Залетов // Сборник тезисов 6-го Международного симпозиума Метрология времени и пространства, Менделеево, 2012, с. 294-296.
29. Hofmann-Wellenhof, B. GNSS - Global navigation satellite systems. GPS, GLONASS, GALILEO and more / B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, E. Wasle. Wien: SpringerWien-N. Y., 2008. – 546 p.
30. Jeanmaire, A. Rubidium atomic clock for Galileo. / A. Jeanmaire, P. Rochat, and F. Emma // In Proceedings of the 31th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting. – 1999 – pp. 627–636.
31. Rochat, P. A new synchronized miniature rubidium oscillator with an auto-adaptive disciplining filter. / P. Rochat and B. Leuenberger // In Proceedings of the 33th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting. – 2001 – pp. 627–636.

- 32.Шебшаевич, Б. В. Интегрированная навигационная система и основные тенденции развития спутникового координатно-временного обеспечения космических аппаратов / Б. В. Шебшаевич, А. Е. Тюляков, В. Е. Дружин, Д. Н. Федоров, А. В. Чухненко, В. В. Кузнецов, К.А.Бибарсова, Г.П.Аншаков, В.И.Огарков // Труды ИПА РАН. – 2005. – Вып. 13. – с. 148 – 159.
- 33.Богданов, П. П. Контроль и анализ состояния ГЛОНАСС и GPS в навигационно-временном центре Северо-Западного региона РФ / П. П. Богданов, А. Ю. Феоктистов, К. Г. Шупен. // Труды ИПА РАН. – 2005. – Вып. 13. – с. 192–199.
- 34.Garin, E.N. The modern development of GNSS GLONASS and GPS / E.N. Garin, V.A. Kopylov, V.N. Ratushniak, I.V. Lyutikov // J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol. – 2018. – vol.11 – no 3. pp. 313–317.
- 35.Урличич, Ю. М. Система ГЛОНАСС - непрерывно развивающаяся основа координатно-временного и навигационного обеспечения России / Ю. М. Урличич, Г. Г. Ступак, С. Г. Ревнивых, А. Ю. Данилюк, Н. А. Тестоедов, А. М. Финкельштейн. // Труды ИПА РАН. – 2012. – Вып. 23. – С. 7–13.
- 36.Ревнивых, С.Г. Состояние и развитие спутниковых навигационных систем / С.Г. Ревнивых, В.Е. Косенко // Сборник трудов XIII Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2019, Москва. – 2019, с. 1317-1322.
- 37.Басевич, А. Б. Система синхронизации ГНСС ГЛОНАСС: Современное состояние и перспективы / А. Б. Басевич, П. П. Богданов, Л. Я. Белов, В. Е. Дружин, Н. Н. Новиков, А. Д. Стяжкин, А. Е. Тюляков // Труды ИПА РАН. – 2005. – Вып. 13. – С. 293–300.
- 38.Шебшаевич, Б. В. Состояние и перспективы развития наземных систем дальней радионавигации / Б. В. Шебшаевич, С. П. Зарубин, С. П. Баринов // Тезисы докладов Седьмой всероссийской конференции

- «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (КВНО-2017). СПб.: ИПА РАН, 2017. – с. 21-22.
- 39.Ревнивых, С. Г. ГЛОНАСС: Достижения, перспективы и проблемы развития / С. Г. Ревнивых // Мир измерений. – 2012. – № 4 (134). с. 4–11.
- 40.Ступак, Г. Г. Выбор структуры орбитальной группировки перспективной системы ГЛОНАСС / Г. Г. Ступак, С. Г. Ревнивых, Е. И. Игнатович, В. В. Куршин, В. В. Бетанов, С. С. Панов и др. // Исследования наукограда. – 2013. – № 3–4 (6). с. 3–11.
- 41.Ступак, Г. Г. Исследование вариантов совершенствования структуры орбитальной группировки ГНСС ГЛОНАСС до 2020 года и далее с учетом доведения ее состава к 2020 году до 30 КА / Г. Г. Ступак, С. Г. Ревнивых, Е. И. Игнатович, В. В. Куршин, В. В. Бетанов, С. С. Панов и др. // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. – 2013. – № 6 (52) С. 23–31.
- 42.Баринов, С.П. Использование сетей наземных радионавигационных станций (псевдоспутников) в качестве функционального дополнения ГНСС ГЛОНАСС, региональных и/или локальных навигационных систем для обеспечения пусков и эксплуатации объектов ракетно-космической техники / С.П. Баринов, В.С. Васильев, М.А. Воронов, А.Н. Коротков, Б.В. Шебшаевич // Труды ИПА РАН. – 2013. – вып. 27, с. 84–89.
- 43.Косенко, В. Е. Комплексные исследования по обоснованию путей создания, принципов построения, определению проектного облика космической системы глобального геодезического мониторинга / В. Е. Косенко, С. В. Сторожев, В. Д. Звонарь, С. В. Козлов, Д. И. Плешаков, С. Г. Ревнивых, В. С. Вдовин, В. В. Пасынков, С. А. Панов, А. Е.

- Тюляков, Е. В. Кораблев, В. К. Андреев // Труды ИПА РАН. – 2013. – вып. 27, с. 14–25.
44. Косенко, В. Е. Использование узлов колокации для повышения точности системы ГЛОНАСС / В. Е. Косенко, Б. В. Шебшаевич, Р. В. Бакитько, Д. В. Иванов, А. В. Ипатов, В. В. Пасынков, В. В. Суевалов, И. Ф. Суркис, Е. В. Титов, С. М. Широкий, Д. В. Гулидов // Тезисы докладов Седьмой всероссийской конференции «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (КВНО-2017). СПб.: ИПА РАН, 2017. – с. 23-24.
45. Тестоедов, Н. А. Стратегия развития космического комплекса как ключевого элемента системы ГЛОНАСС / Н. А. Тестоедов, В. Е. Косенко, С. Г. Ревнивых // Тезисы докладов Седьмой всероссийской конференции «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (КВНО-2017). СПб.: ИПА РАН, 2017. – с. 5-6.
46. Залетов, Д. В. Результаты летной эксплуатации бортовых стандартов частоты космических аппаратов ГЛОНАСС-М / Д. В. Залетов, А. Б. Басевич, В. Е. Шабанов // Тезисы докладов Седьмой всероссийской конференции «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (КВНО-2017). СПб.: ИПА РАН, 2017. – с. 129-130.
47. Сальцберг, А. В. Совместное прогнозирование частотно - временных поправок бортовых и наземных шкал времени системы ГЛОНАСС / А. В. Сальцберг, К. Г. Шупен // Тезисы докладов Седьмой всероссийской конференции «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (КВНО-2017). СПб.: ИПА РАН, 2017. – с. 179-180.
48. [http://www.esa.int/our_activities/navigation/galileo_clock_anomalies_under_investigation/\(print\)](http://www.esa.int/our_activities/navigation/galileo_clock_anomalies_under_investigation/(print))

49. Vannicola, F. GPS Block IIF atomic frequency standard analysis / F. Vannicola, R. Beard, et al. // Proc. of the 42nd Ann. Precise Time and Time Interval Meeting. – 2010. – pp.181–195.
50. Martinez, F.J.G. Performance of new GNSS satellite clocks / F.J.G. Martinez - KIT (Karlsruher Institut für Technologie) Scientific Publishing, 2014. – 1308 p.
51. Rochat, P. The onboard Galileo rubidium and passive maser, status and performance / P. Rochat, F. Droz, P. Mosset, et al. // Proceedings of the 37th Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting. – 2005. - pp.26–32.
52. Karuza, S. K. Determining Optimum C-field Settings that Minimize Output Frequency Variations in Cesium Atomic Frequency Standards / S. K. Karuza, W. A. Johnson, J. P. Hurrell, and F. J. Voit // Proc. of the 42nd Ann. Precise Time and Time Interval Meeting. – 2010. – pp.210-215.
53. De Marchi, A. New Insights into Causes and Cures of Frequency Instabilities (Drift and Long-Term Noise) in Cesium Beam Frequency Standards / A. De Marchi // Proc. 46st Frequency Control Symposium. – 2007. – pp. 54–58.
54. Karuza, S. K. Determining the Effects of Microwave Power and C-field Setting on the Frequency of a Cesium Atomic Frequency Standard / S. K. Karuza, W. A. Johnson, and F. J. Voit // Proc. 9th European Time and Frequency Forum. – 2009. – pp. 69–72.
55. Kleppner, D. Theory of the hydrogen maser / D. Kleppner, H. Mark Goldenberg, and F. Ramsey // Phys. Rev. – 1962. – vol. 126. - pp. 603–615.
56. Kleppner, D. Hydrogen-maser principles and techniques / D. Kleppner, H. C. Berg, S. B. Crampton, N. F. Ramsey, R. F. C. Vessot, H. E. Peters, and J. Vanier // Phys. Rev. A. – 1965. – vol. 138. - pp. 972–983.
57. Huber, A. Hydrogen-deuterium 1S – 2S isotope shift and the structure of the deuteron / A. Huber, Th. Udem, B. Gross, J. Reichert, M. Kourogi, K.

- Pachucki, M. Weitz, and T. W. Hänsch. // *Phys. Rev. Lett.* – 1998. – vol. 80. – pp. 468–471.
58. Belyaev, A. A. Estimation of a possible decrease in the limiting frequency instability of a hydrogen generator with the use of a beam of atoms in a single quantum state / A. A. Belyaev, N. A. Demidov, V. A. Polyakov, and Yu. V. Timofeev // *Izmer. Tekhn.* – 2018. – vol. 8. – pp. 28–31.
59. Demidov, N.A. Onboard Hydrogen Frequency Standard for the Millimetron Space Observatory / N.A. Demidov, A.A. Belyaev, V.A. Polyakov, et al // *Meas Tech.* – 2018. – vol. 61. – pp. 791–796.
60. Волков, С. А. Особенности функционирования квантового дискриминатора рубидиевого стандарта частоты с лазерной накачкой / С. А. Волков, Г. В. Герасимов, Д. С. Сидоренков // Тезисы докладов Седьмой всероссийской конференции «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (КВНО-2017). СПб.: ИПА РАН, 2017. – с. 86-87.
61. Беляев, А. А. Стандарт частоты на основе фонтана ультрахолодных атомов Rb для мелкосерийного промышленного производства / А. А. Беляев, И. М. Доронин, К. Ю. Павленко, Ю. К. Павленко, С. И. Донченко, S. Bize, L. Lorini, B. Desruelle, G. Stern // Тезисы докладов Седьмой всероссийской конференции «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (КВНО-2017). СПб.: ИПА РАН, 2017. – с. 60-61.
62. Слюсарев, С. Н. Результаты выполнения ОКР «Оптика» по созданию оптического стандарта частоты на холодных атомах стронция / С. Н. Слюсарев, О. И. Бердасов, А. Ю. Грибов, С. А. Стрелкин // Тезисы докладов Седьмой всероссийской конференции «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (КВНО-2017). СПб.: ИПА РАН, 2017. – с. 185-186.

63. Хабарова, К. Ю. Лазерная система для вторичного охлаждения атомов стронция-87 / К. Ю. Хабарова, С. Н. Слюсарев, С. А. Стрелкин, Г. С. Белотелов, А. С. Костин, В. Г. Пальчиков, Н. Н. Колачевский // Квантовая электроника. –2012. –Т. 42. - № 11. – с. 1021–1026.
64. Takamoto, M. An optical lattice clock / M. Takamoto, F.-L. Hong, R. Higashi, N. Katori // Nature. – 2005. – vol. 435. – No.7040. - pp. 321–324.
65. Домнин, Ю.С., Цезиевый фонтан МЦР-Ф2 ВНИИФТРИ / Ю.С. Домнин, В.Н. Барышев, А.И. Бойко, Г.А. Елкин, А.В. Новоселов, Л.Н. Копылов, Д.С. Купалов // Сборник тезисов 6-го Международного симпозиума Метрология времени и пространства, Менделеево, 2012, с. 11-23.
66. Слюсарев, С.Н. Исследования по разработке оптического стандарта частоты на холодных атомах стронция / С.Н. Слюсарев, А.С. Костин, В.Н. Барышев, К.Ю. Хабарова, С.А. Стрелкин, В.Г. Пальчиков, Н.Н. Колачевский // Сборник тезисов 6-го Международного симпозиума Метрология времени и пространства, Менделеево, 2012, с. 24-32.
67. Андрюшков, В.А. Атомные часы на эффекте КПН с использованием дробных частот СВЧ модуляции / В.А. Андрюшков, С.М. Кобцев, Д.А. Раднатаров, С.А. Хрипунов // Сборник тезисов 6-го Международного симпозиума Метрология времени и пространства, Менделеево, 2018, с. 45-46.
68. Berthoud, P. Development of an optical-pumped cesium beam clock for ground applications / P. Berthoud // Сборник тезисов 6-го Международного симпозиума Метрология времени и пространства, Менделеево, 2016, с. 9-10.
69. Makdissi, A. Evaluation of the accuracy of the optically pumped caesium beam primary frequency standard of the BNM-LPTF / A. Makdissi and E. de Clercq // Metrologia. – 2001. – vol. 38. – pp. 409–425.

70. Hagimoto, K. Accuracy evaluation of the optically pumped Cs frequency standard at NRLM / K. Hagimoto, S. Ohshima, Y. Nakadan, and Yasuki Koga // IEEE Trans. Instrum. Meas. – 2009. – vol. 48.- pp. 496–499.
71. Gubin, M. Absolute frequency measurements with a set of transportable He-Ne/CH₄ optical frequency standards and prospects for future design and applications / M. Gubin, E. Kovalchuk, E. Petrukhin, A. Shelkovnikov, D. Tyurikov, R. Gamidov, C. Erdogan, E. Sahin, R. Felder, P. Gill, S. N. Lea, G. Kramer, and B. Lipphardt // Proceedings of the Sixth Symposium Frequency Standards and Metrology. 2002. – pp. 453–460.
72. Blatt, R. Current perspectives on the physics of trapped ions / R. Blatt, P. Gill, and R. C. Thompson // J. Mod. Opt. – 1992. – vol. 39. – pp. 193–220.
73. Thompson, R. C. Spectroscopy of trapped ions. / R. C. Thompson // Advances in Atomic, Molecular, and Optical Physics. – 1993. – vol. 31, pp. 63–136.
74. P. T. H. Fisk. Trapped-ion and trapped-atom microwave frequency standards / P. T. H. Fisk // Rep. Prog. Phys. – 1997. – vol. 60, pp. 761–817.
75. Zhu, M. Theoretical and experimental study of light shift in a CPT based Rb vapor cell frequency standard / M. Zhu and L. S. Cutler // In Proceedings of the 31th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Systems and Applications Meeting. – 2000. – vol. 2220. – pp. 311–324.
76. Теплов, В.Ю. Методы синтеза частоты / В.Ю. Теплов, А.А. Садыков, Р.Р. Латыпов, Р.С. Кириллов, О.Н. Шерстюков – Казань: Казан. ун-т, 2015. – 45 с.
77. Шапиро, Д.Н. Основы теории синтеза частот / Д.Н. Шапиро, А.Н. Паин - М.: Радио и связь, 1981. – 264 с.
78. Manassewitsch, V., Frequency Synthesizers: Theory and Design / V. Manassewitsch - 3rd ed., New York: John Wiley & Sons, 2005. – 298 p.
79. Chenakin, A., Frequency Synthesis: Current Solutions and New Trends / A. Chenakin // Microwave Journal. – 2007. – pp. 256–266.

80. Манасевич, В. Синтезаторы частот (теория и проектирование) / В. Манасевич - Пер с англ. под. ред. А.С. Галина – М.: Связь, 1981. – 384 с.
81. Рыжков, А.В. Синтезаторы частот в технике радиосвязи / А.В. Рыжков, В.Н. Попов - М.: Радио и связь. - 1991. - 264 с.
82. Белов, Л.А. Устройства формирования СВЧ-сигналов и их компоненты / Л.А. Белов - М.: Издательский дом МЭИ, 2010. - 320 с.
83. Белов, Л.А. Современные синтезаторы стабильных частот и сигналов / Л.А. Белов // Радиотехника. - 2007. - №3. - С. 21-25.
84. Чистяков, Н.И. Декадные синтезаторы частоты / Н.И. Чистяков – М.: Связь, 1969. – 80 с.
85. Алехин, Ю.И. Анализ частотной декады с двумя смесителями и делителями частоты / Ю.И. Алехин // Техника средств связи. Серия Радиоизмерительная техника. – 1976. – Вып.1. – С. 11-15.
86. Белов, Л.А. Радиопередающие устройства. Учебник для вузов / Л.А. Белов, М.В. Благовещенский и др. - М.: Радио и связь, 1982.- 408с.
87. Борисенко, Н.В. Технические аспекты построения управляющих автоматов при проектировании цифровых устройств на основе современных ПЛИС / Н.В. Борисенко // Компоненты и технологии. – 2011. - №12. – с. 34-39.
88. Микушин, А.В. Цифровые устройства и микропроцессоры / А.В. Микушин, А.М. Сажнев, В.И. Сединин – СПб.: БХВ-Петербург, 2010. – 823 с.
89. Угрюмов, Е. П. Цифровая схемотехника / Е.П. Угрюмов – СПб.: БХВ-Петербург, 2010. - 798 с.
90. Ашихмин, А. Цифровая схемотехника. Шаг за шагом / А. Ашихмин – М.: Диалог-МИФИ, 2008. – 304 с.
91. Уэкерли, Дж. Ф. Проектирование цифровых устройств / Дж. Ф. Уэкерли – М.: Постмаркет, 2002. – 349 с.

- 92.Максфилд, К. Проектирование на ПЛИС. Архитектура, средства и методы. Курс молодого бойца / К. Максфилд – М.: Додэка XXI, 2015. – 389 с.
- 93.Шило, В. Л. Популярныe микросхемы КМОП / В. Л. Шило – М.: Горячая Линия – Телеком, 2002. – 112 с.
- 94.Ширман, Я.Д. Радиоэлектронные системы / Я.Д. Ширман – М.: Радиотехника, 2007. – 304 с.
- 95.Ридико, Л. DDS: прямой цифровой синтез частот / Л. Ридико // Компоненты и технологии. – 2001. – №7. – с. 50–54.
- 96.Kroupa, V. Theory of frequency synthesis / V. Kroupa // IEEE transactions on Instrumentation and Measurement. – 1968. - vol. ИИ-17, No 1, p.56-68.
- 97.Лобов, В. Цифровые синтезаторы прямого синтеза частот / В. Лобов, В. Стешенко, Б. Шахтарин // Chip News. – 1997. № 1. – с.16-21.
- 98.Vankka, J. Direct Digital Synthesizers: Theory, Design and Applications: Dissertation for the degree of Doctor of Science in Technology / J. Vankka. – Helsinki University of Technology, 2000. – 208 p.
99. Kroupa, V.F. Direct Digital Frequency Synthesizers / V. F. Kroupa – John Wiley & Sons, Ltd, 1998. – 396 с.
- 100.Мёрфи, Е. Всё о синтезаторах DDS. Пер.: Власенко А. / Е. Мёрфи, К. Слэттери // Компоненты и технологии. – 2005. – №1. – С. 28-32.
101. Соловьев, А. А. Автогенераторы гармонических колебаний и синтезаторы частоты (основы теории и расчета): учеб. пособие. / А. А. Соловьев - СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2000. – 256 с.
- 102.Петров, А.А. Цифровой синтезатор частоты для квантового стандарта частоты на атомах цезия -133 / А.А. Петров, В.В. Давыдов, В.Е. Шабанов, Д.В. Залетов // НТВ СПбПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление, Проблемы передачи и обработки информации. – 2013. – №6, с. 45–52.

- 103.Петров, А.А. Цифровой синтезатор частоты для квантового стандарта частоты на атомах Cs133 / А.А. Петров, В.В. Давыдов // Материалы работ молодежной научной конференции «Студенты и молодые ученые инновационной России» – СПб.: Изд-во СПбГПУ. – 2013. - с. 23 – 25.
- 104.Петров, А.А. Разработка генератора синусоидального сигнала управляемой частоты для квантового стандарта частоты на атомах Rb87 / А.А. Петров, В.В. Давыдов // Материалы Девятнадцатой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых «ВНКСФ – 19». – Архангельск: Изд-во АСФ России. 2013. – с. 283-284.
- 105.Петров, А.А. Новый метод формирования сигналов синтезатора частоты для атомных часов на парах 133Cs / А.А. Петров, В.В. Давыдов // Материалы 52-й Международной научной студенческой конференции «МНСК-2014». - Новосибирск: Изд-во Новосиб. Гос.ун-та. – 2014. - с.30.
- 106.Петров А.А. Новый метод формирования СВЧ-сигнала возбуждения в цезиевых атомных часах / А.А. Петров // Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2015». – Москва: Изд-во МГУ имени М.В. Ломоносова. – 2015. - с. 33 – 35.
- 107.Petrov, A. A. New microwave excitation signal generating circuit for quantum frequency standard on the atoms of caesium Cs133 / А.А. Petrov, V.V. Davydov // International Journal of Modern Physics: Conference Series. – 2016.- vol. 41 (2016) 1660142.
- 108.Petrov, A. A. Digital Frequency Synthesizer for 133Cs-Vapor Atomic Clock / А.А. Petrov, V.V. Davydov // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2017. - vol. 62. – no. 3. - pp. 289–293.
- 109.Петров, А.А. Особенности применения метода прямого цифрового синтеза в микроволновом стандарте частоты на атомах цезия – 133 / А.А. Петров // Материалы Международного молодежного научного

- форума «ЛОМОНОСОВ-2017». – Москва: Изд-во МГУ имени М.В. Ломоносова. – 2017. - с. 520-522.
- 110.Петров, А.А., Валов А.П. Некоторые направления модернизации квантового стандарта частоты на атомах цезия – 133 / А.А. Петров, А.П. Валов // Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2018». – Москва: Изд-во МГУ имени М.В. Ломоносова. – 2018. - с. 660-661.
- 111.A Technical Tutorial on Digital Signal Synthesis. Analog Devices, Inc. 1999.
- 112.Соловьев, А. А. Современные методы формирования радиосигналов: Учеб. Пособие / А. А. Соловьев - СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. 118 с.
- 113.Petrov, A.A. Some Directions of Quantum Frequency Standard Modernization for Telecommunication Systems / A.A. Petrov, V.V. Davydov, N.M. Grebenikova // Lecture Notes in Computer Science. - 2018. - 11118 LNCS. - p. 641-648.
- 114.Петров, А.А., Давыдов В.В., Гребеникова Н.М. О возможности применения метода прямого цифрового синтеза при разработке синтезаторов частоты для квантовых стандартов частоты / А.А. Петров, В.В. Давыдов, Н.М. Гребеникова // РЭ. - 2018. - Т. 63. - № 11. с. 1159-1164.
- 115.Petrov, A. A. Improving performance of quantum frequency standard with laser pumping / A.A. Petrov, N.S. Lukashev, V.V. Davydov // 18th International Conference on Laser Optics «ICLO 2018». – 2018. - p.458.
- 116.Petrov, A.A. Modernization of the frequency synthesizer of cesium atomic clock / A.A. Petrov, V.V. Davydov, V.E. Shabanov, D.V. Zalyotov, A.L. Bulyanitsa, D.V. Shapovalov // The IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech-2018). – 2018. - pp. 76-78.

117. Petrov, A.A. Features of direct digital synthesis applications for microwave excitation signal formation in quantum frequency standard on the atoms of cesium / A.A. Petrov, V.V. Davydov, D.V. Zalyotov, V.E. Shabanov and D.V. Shapovalov // *Journal Physics: Conference Series*. - 2018. - 1124(1). p. 041004.
118. Петров, А.А. 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 // *Сборник тезисов 6-го Международного симпозиума Метрология времени и пространства, Менделеево, 2018*, с. 39-42.
119. Петров, А. А. Результаты наземной отработки модернизированного квантового стандарта частоты на атомах цезия-133 / А. А. Петров, Д. В. Залетов, В. И. Григорьев // *Тезисы докладов Седьмой всероссийской конференции «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (КВНО-2019)*. СПб.: ИПА РАН, 2019. – с. 45-46.
120. Petrov, A. A. Features of magnetic field stabilization in caesium atomic clock for satellite navigation system / A.A. Petrov, N.M. Grebenikova, N.A. Lukashev, V.V. Davydov, N.V. Ivanova, N. S. Rodygina, A.V. Moroz // *Journal of Physics: Conference Series*. - 2018. - vol. 1038 (1) 012032.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ.

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.,** Мязин Н.С. 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 ^{133}Cs . // 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. **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.
6. **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.
7. **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.

8. 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.
9. **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. 52-55.
10. **Petrov A.A.**, Grebenikova N.M., Lukashev N.A., Rodygina N.S., Moroz A.V. Features of magnetic field stabilization in caesium atomic clock. // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1038(1). P. 012032.
11. **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.
12. **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.
13. **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.
14. **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.

Приложение 1

Таблица 1.1 Параметры современных синтезаторов частоты

Метод синтеза Параметр	Синтезаторы прямого аналогового синтеза частот	Синтезаторы косвенного метода синтеза частот	Синтезаторы прямого цифрового метода синтеза частот
Максимальная выходная частота	10-ки ГГц	10-ки ГГц	Не более 1 ГГц
Диапазон синтезируемых частот	Меньше октавы	(0,01...10) ГГц	(0...1) ГГц
Шаг перестройки	<0,5 Гц (в декадных синтезаторах)	0,01 Гц (с использованием цифровой элементной базы)	<0,00001 Гц
Время перестройки	100 мкс	1-10 мкс	100 нс
Габариты	Объем ($10^{-4} \dots 0,1$) м ³	Исполняются в виде ИМС	Исполняются в виде ИМС
Потребляемая мощность	< 1 Вт	(1...10) мВт	(0,1...1) Вт
Уровень дискретных побочных составляющих	(-50 ... -60) дБ	(-80 ... -90) дБ	(-60 ... -80) дБ

Приложение 2

Таблица 2.1 Значения синусоидального сигнала.

Таблица синуса, период $[0..2\pi]$, 1024 точки					
точка	$(2\pi \cdot \text{точка})/1024$	$\text{SIN}((2 \cdot \pi \cdot \text{точка})/1024)$	$511 \cdot \text{SIN}((2 \cdot \pi \cdot \text{точка})/1024) + 511,5$	К	Перевод в N_2
0	0	0	511,5	512	1000000000
1	0,006133	0,006133	514,6369	515	1000000010
2	0,012266	0,012265	517,7737	518	1000000110
3	0,018398	0,018397	520,9103	521	1000001000
4	0,024531	0,024529	524,0465	524	1000001100
5	0,030664	0,030659	527,1822	527	1000001110
6	0,036797	0,036789	530,3174	530	1000010010
7	0,04293	0,042917	533,4518	533	1000010100

...

1017	6,23707	-0,0461	487,9205	488	0111101000
1018	6,243203	-0,03997	491,0546	491	0111101011
1019	6,249336	-0,03384	494,1894	494	0111101110
1020	6,255469	-0,02771	497,3248	497	0111110001
1021	6,261602	-0,02158	500,4608	500	0111110100
1022	6,267734	-0,01545	503,5972	504	0111111000
1023	6,273867	-0,00932	506,7339	507	0111111011

Таблица 2.2. Сравнительные результаты разработанного и ранее применявшегося цезиевого СЧ

	Разработанный СЧ	Ранее применявшийся СЧ
Подавление в полосе 1кГц	-85 дБ	-68 дБ
Подавление в полосе 600кГц	-80 дБ	-65 дБ

Таблица 2.3. Сравнительные результаты разработанного и ранее применявшегося рубидиевого СЧ

	Новая конструкция	Предыдущая конструкция
Подавление в полосе 1кГц	-80 дБ	-57 дБ
Подавление в полосе 600кГц	-60 дБ	-35 дБ

Приложение 3

Таблица 3.1. 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	$\sim 10^{-14}$