

УДК 621.373

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕРХМИНИАТЮРНОГО КВАНТОВОГО СТАНДАРТА ЧАСТОТЫ

**Е.А. Зотов, Д.А. Парёхин**

*ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.  
zotov\_ea@vniiftri.ru,  
paryohin@vniiftri.ru*

*В данной работе представлен способ достижения высоких метрологических характеристик сверхминиатюрного квантового стандарта частоты. Представлены результаты для стабильности частоты, соответствующие передовому мировому уровню.*

*Ключевые слова: миниатюрный квантовый стандарт, КПН-эффект.*

## RESEARCH OF METROLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE SUPER MINIATURE QUANTUM FREQUENCY STANDARD

**Zotov E.A., Paryokhin D.A.**

*FSUE “VNIIFTRI”, Mendeleevo, Moscow region  
zotov\_ea@vniiftri.ru,  
paryohin@vniiftri.ru*

*This article presents a method for achieving high metrological characteristics of a miniature atomic clock. The result for frequency stability corresponding to the world's advanced level are presented.*

*Key words: miniature atomic clock, coherent population trapping.*

### **Введение**

Разработка сверхминиатюрных высокостабильных квантовых стандартов частоты (далее — КСЧ) позволяет решить актуальные вопросы эффективно-го применения данных стандартов в спутниковых и инерциальных системах навигации, а также системах связи. Использование эффекта когерентного пленения населённости позволяет существенно уменьшить габариты всего стандарта при сохранении высоких метрологических характеристик, поскольку отпадает необходимость в использовании СВЧ-резонатора.

Принцип работы квантового стандарта частоты на основе эффекта когерентного пленения населённости (далее — КПН) заключается в измерении разностной частоты двух световых волн, при которых возникает когерентная непоглощающая суперпозиция основных атомных состояний, не взаимодействующая с данными оптическими полями [1]. В этом состоянии атомы

перестают рассеивать резонансное излучение, поэтому его поглощение в среде резко уменьшается. Это также приводит к уменьшению флюоресценции атомов, поэтому в литературе такие резонансы часто называют «тёмными». Для наблюдения эффекта КПП ток инжекции диодного лазера модулируется с частотой, равной половине частоте сверхтонкого расщепления основного состояния перехода. В результате в спектре диодного лазера появляются гармоники  $\pm 1$ -порядка, отстроенные от несущей на частоту модуляции. Модулированное излучение диодного лазера проходит через пары щелочного металла, прошедшая оптическая мощность детектируется с помощью фотодиода. Для разницы расстроек боковых гармоник равной частоте сверхтонкого перехода происходит просветление среды и увеличение сигнала на фотодиоде.

В настоящей работе представлены исследования метрологических характеристик разработанного сверхминиатюрного КСЧ на основе эффекта КПП в двухчастотном лазерном поле, взаимодействующем с парами атомов  $^{87}\text{Rb}$ , частота расщепления основного состояния которых примерно равна 6,83 ГГц. Представленный в статье образец сверхминиатюрного КСЧ имеет объём 60 см<sup>3</sup> и энергопотребление около 300 мВт.

### Конструкция

Функциональная схема сверхминиатюрного КСЧ показана на рис. 1. Функционально она состоит из физического и электронного блоков.

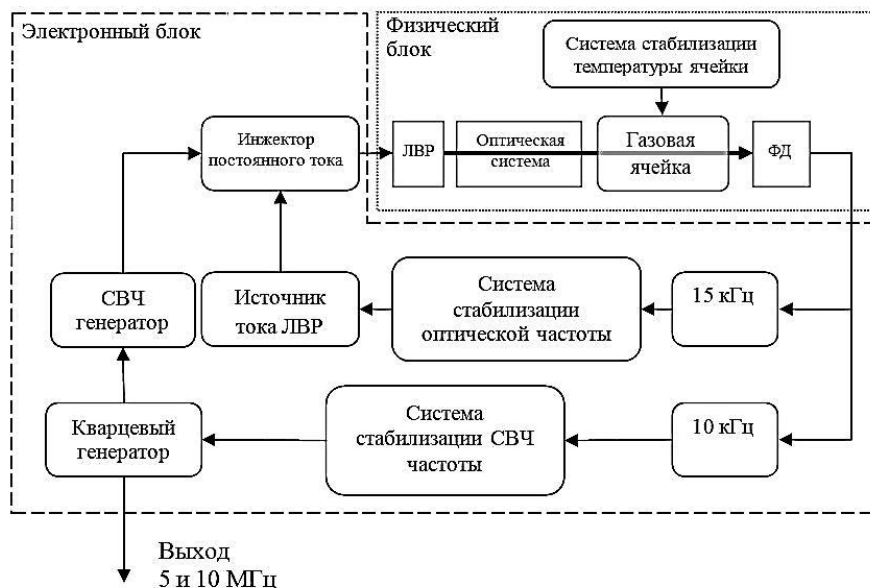


Рис. 1. Функциональная схема КСЧ на основе эффекта КПП

Основными элементами физического блока являются: лазер с вертикальным резонатором (далее — ЛВР), оптическая система, газовая ячейка и фотодиод. ЛВР работает на длине волны 795 нм, соответствующей  $D_1$  линии  $^{87}\text{Rb}$ , и снабжён прецизионным источником тока и системой термостабилизации. В случае с атомами щелочных металлов, у которых имеется только один электрон на внешней оболочке, предпочтительнее использовать  $D_1$  линию для наблюдения резонансов КПН, поскольку в этом случае их контраст выше, чем при использовании  $D_2$  линии [2]. Выходное излучение ЛВР линейно поляризовано и проходит через оптическую систему, включающую линзу, фазовую четвертьволновую пластинку и нейтральный оптический фильтр. Оптическая система предназначена для формирования круговой поляризации и получения оптимального уровня мощности излучения при отсутствии обратных отражений в ЛВР. После этого излучение пропускается через газовую ячейку с парами рубидия и буферным газом и регистрируется фотодиодом. Для наблюдения поглощения в атомах щелочного металла осуществляется равномерный нагрев ячейки при температуре более  $60^\circ\text{C}$ .

Для создания однородного магнитного поля на корпусе ячейки расположены катушки Гельмгольца. Это поле расщепляет сверхтонкие уровни основного состояния перехода и позволяет наблюдать КПН-резонанс, связанный только с магнитными подуровнями с квантовыми числами  $m_F = 0$ , для которых отсутствует линейный эффект Зеемана.

Для стабилизации излучения ЛВР по  $D_1$  линии поглощения  $^{87}\text{Rb}$  синусоидальный сигнал частотой 15 кГц от модулирующего генератора поступает на вход управления источника тока накачки ЛВР, создавая пробную модуляцию оптической частоты. Частота пробной модуляции выбрана из соображений, что на этой частоте как у ЛВР, так и у элементов электроники обычно отсутствует избыточный фликкер-шум. Сигнал с фотодиода поступает на вход системы стабилизации оптической частоты излучающего лазера, проходит через полосовой фильтр, настроенный на первую гармонику частоты пробной модуляции, и поступает на вход синхронного детектора. Результатом синхронного детектирования является сигнал ошибки, указывающий, насколько необходимо изменить величину температуры ЛВР, чтобы его частота излучения совпала с центром линии поглощения смеси газов в ячейке.

Для получения резонансных гармоник в спектре излучения ЛВР его ток модулируется с частотой 3,417 ГГц, подаваемой от СВЧ-генератора. Для стабилизации частоты СВЧ-генератора используется метод стабилизации, аналогичный методу Паунда — Древера — Холла, применяемому для стабилизации частоты лазеров в оптическом диапазоне [3, 4]. В этом методе частота модуляции существенно превышает ширину резонанса. В нашем случае используется система автоматического регулирования с модуляционной частотой 10 кГц. Данный метод обладает рядом достоинств, а именно:

позволяет реализовать максимально возможное быстродействие, выбрать высокую рабочую частоту для улучшения отношения сигнал/шум, а также имеет полосу захвата вплоть до рабочей частоты.

### Эксперимент

Измерение относительной частоты кварцевого генератора, который стабилизирован по тёмному резонансу, позволяет определить параметры, влияющие на метрологические характеристики квантового стандарта частоты. Для этого требуется зафиксировать текущее значение частоты кварцевого генератора при изменении параметров системы, таких как выходная мощность СВЧ-генератора, ток лазера и температура ячейки со щелочным металлом. Ниже приведены результаты измерений с их кратким анализом.

#### *Измерение зависимости смещения частоты от кварцевого генератора при изменении выходной мощности СВЧ-генератора*

В настоящей работе проведено экспериментальное изучение полевых сдвигов частоты в зависимости от мощности СВЧ модулирующего сигнала. Для проведения наблюдения полевых сдвигов осуществлялся захват частоты СВЧ-генератора по КРН-резонансу в  $^{87}\text{Rb}$  на линии  $D_1$  с помощью системы стабилизации частоты. Частота генератора 10 МГц измерялась частотомером, в качестве опорного сигнала на частотомер подавалась частота водородного стандарта частоты. На рис. 2 показана зависимость полевых сдвигов от СВЧ-мощности.

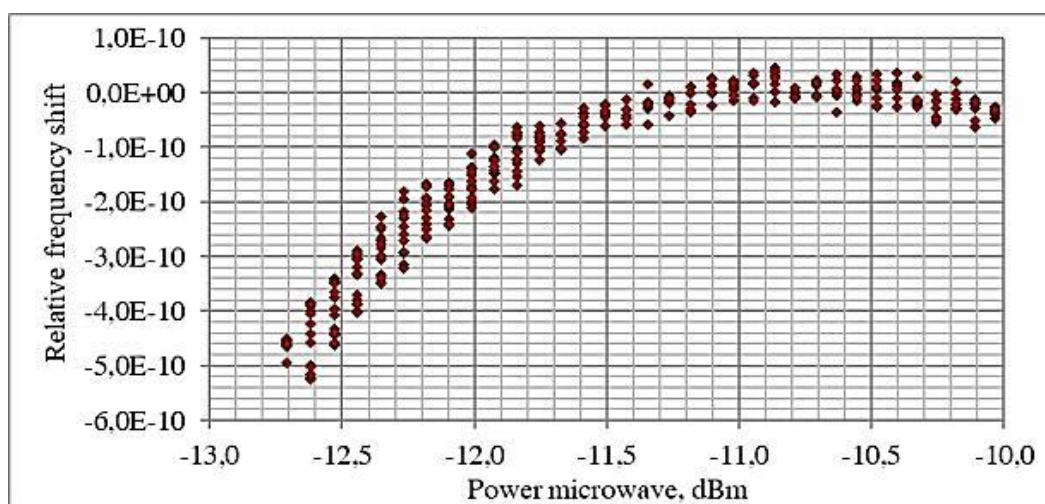


Рис. 2. График зависимости относительного сдвига частоты от выходной мощности СВЧ-генератора

**Измерение зависимости смещения частоты  
от кварцевого генератора при изменении тока лазера**

На рис. 3 показана зависимость относительного сдвига частоты от тока инжекции диодного лазера. Анализ рисунка показывает, что существует значение тока инжекции лазера, при котором степень влияния шума тока ЛВР на сдвиг частоты кварцевого генератора минимизируется. При величине тока инжекции 1.18 мА полевой сдвиг меняет знак и становится нулевым.

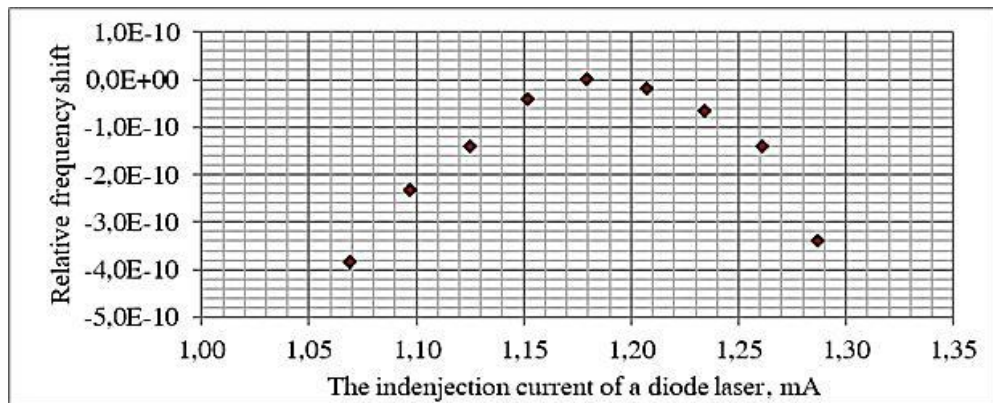


Рис. 3. График зависимости относительного сдвига частоты от тока инжекции диодного лазера

**Измерение зависимости смещения частоты от кварцевого генератора  
при изменении температуры ячейки со щелочным металлом**

Для минимизации сдвига частоты КПН-резонанса и, как следствие, частоты выходного сигнала КСЧ, вызываемого изменением температуры ячейки, используется смесь буферных газов Ar и Ne ( $P_{Ar}/P_{Ne} = 35/65$  торр). Известно, что буферные газы, состоящие из лёгких атомов или молекул (например,  $H_2$ ,  $N_2$ , He, Ne) приводят к увеличению частоты «0-0» перехода в атоме рубидия при увеличении давления и температуры, в то время как тяжёлые буферные газы (Ar, Xe, Kr) приводят к уменьшению этой частоты [5, 6]. Кроме того, эти зависимости нелинейные, и можно подобрать такую смесь буферных газов, при которой зависимость сдвига частоты «0-0» перехода от температуры ячейки будет иметь экстремум (рис. 4). Вблизи этого экстремума сдвиг частоты «0-0» перехода и, соответственно, резонанса КПН, нечувствителен к малым вариациям температуры ячейки. Эта особенность позволяет улучшить долговременную стабильность частоты КСЧ. Используемая пропорция буферных газов позволяет вывести точку экстремума в район  $68^\circ C$ . Для данной температуры ячейки в экспериментах наблюдается максимальное отношение сигнал/шум, что важно для достижения наилучшей кратковременной стабильности частоты КСЧ.

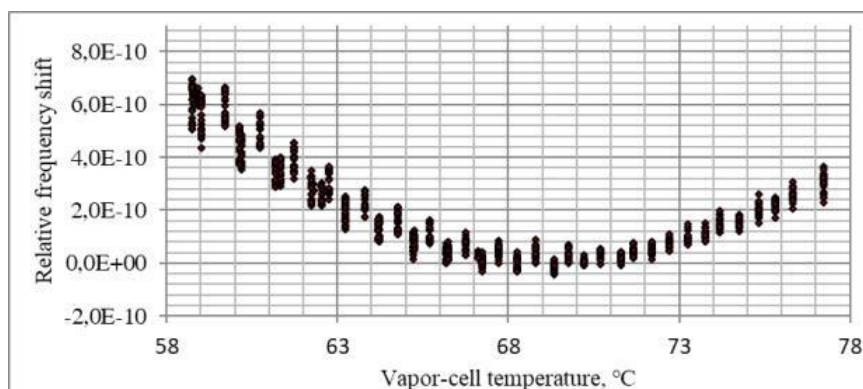


Рис. 4. График зависимости относительного сдвига частоты от температуры газовой ячейки

Анализ рисунка показывает, что существует значение температуры ячейки, при котором степень влияния её на сдвиг частоты кварцевого генератора минимизируется. При величине температуры газовой ячейки  $69^{\circ}C$  полевой сдвиг меняет знак и становится нулевым.

Для исключения влияния основного дестабилизирующего фактора окружающей среды — температуры — была введена система термокомпенсации КСЧ с помощью изменения тока в катушках Гельмгольца. Анализ рис. 5 и 6 показал, что при включённой термокомпенсации температура окружающей среды не влияет на КСЧ и, как следствие, не приводит к увеличению относительного сдвига частоты.

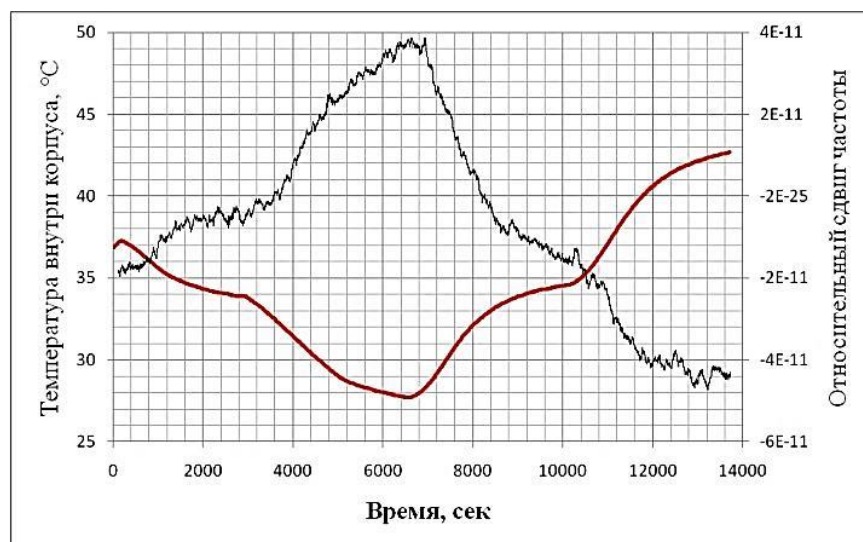


Рис. 5. Зависимость температуры внутри сверхминиатюрного квантового стандарта частоты (красный цвет) и относительного сдвига частоты (чёрный цвет) от времени измерения с отключённой системой термокомпенсации

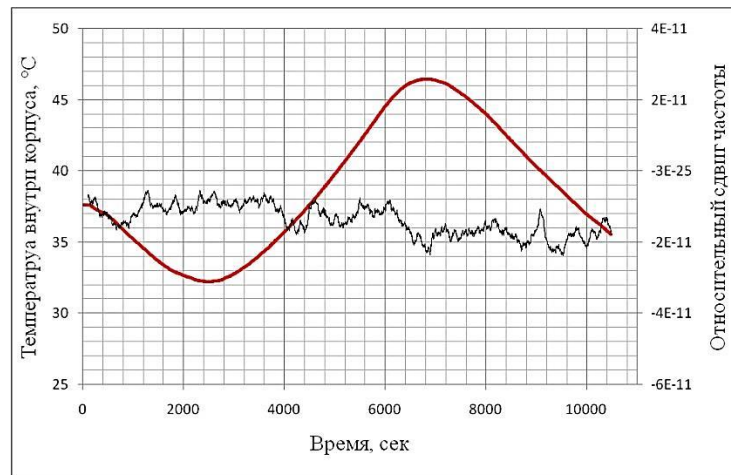


Рис. 6. Зависимость температуры внутри сверхминиатюрного квантового стандарта частоты (красный цвет) и относительного сдвига частоты (чёрный цвет) от времени измерения с включённой системой термокомпенсации

С учётом проведённого анализа рис. 1–6 была произведена настройка сверхминиатюрного КСЧ. После этого было произведено измерение метрологических характеристик, данные которых представлены на рис. 7.

Из рисунка видно, что относительная стабильность частоты КСЧ (девиация Аллана) составляет  $1,21 \cdot 10^{-11}$  за 1 с,  $4,05 \cdot 10^{-13}$  за 1000 с и  $5,78 \cdot 10^{-13}$  за 63000 с. По совокупности продемонстрированных характеристик разработанный КСЧ превосходит существующие коммерческие аналоги [7, 8].

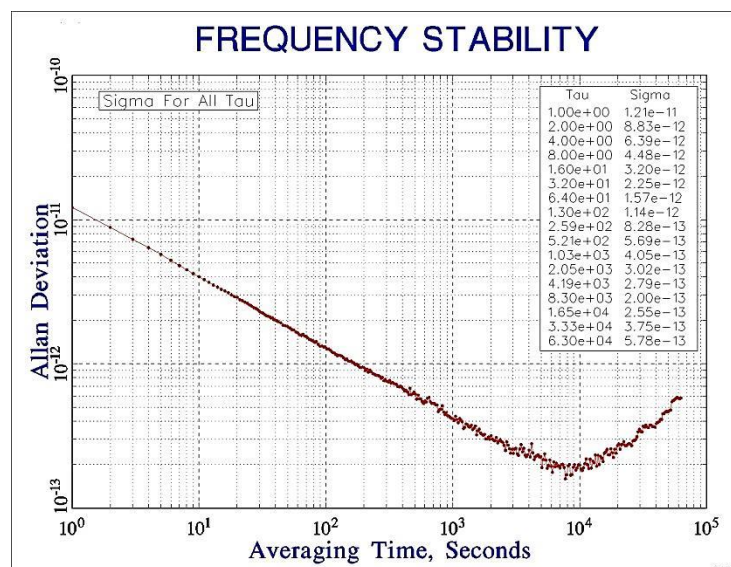


Рис. 7. СКДО (вариация Аллана) разработанного квантового стандарта частоты



### Заключение

Разработан квантовый стандарт частоты на основе явления когерентного пленения населённости в парах атомов  $^{87}\text{Rb}$ , а также изучены его метрологические характеристики. Был изучен относительный сдвиг частоты кварцевого генератора при изменении параметров системы, таких как выходная мощность СВЧ генератора, ток лазера и температура ячейки со щелочным металлом. Полученные зависимости показали, что существуют значения выходной мощности СВЧ-генератора, тока лазера и температуры ячейки, при котором степень влияния их шума на сдвиг частоты кварцевого генератора минимизируется.

Эти исследования позволили получить высокую долговременную стабильность сигнала КСЧ на уровне  $5,78 \cdot 10^{-13}$  за время измерения 63000 с. При этом итоговая потребляемая мощность всего стандарта находилась на уровне 300 мВт при общем объёме устройства около  $60 \text{ см}^3$ .

Для сравнения разработанного КСЧ с аналогичными коммерчески доступными продуктами рассмотрим два рубидиевых миниатюрных стандарта частоты от известных производителей. В частности, стандарт частоты SA.35m от компании Microsemi имеет кратковременную стабильность  $3 \cdot 10^{-11}$  за 1 с, потребление на уровне 5 Вт при объёме  $50 \text{ см}^3$  [8]. Другой коммерческий продукт NAC1 от компании AccuBeat Ltd. обладает кратковременной стабильностью  $2 \cdot 10^{-10}$  при энергопотреблении 1,2 Вт и объёме  $32 \text{ см}^3$  [7]. Таким образом, разработанный КСЧ по своим характеристикам не уступает коммерчески доступным аналогам, а по некоторым — значительно превосходит их.

### Литература

1. Arimondo E. Coherent population trapping in laser spectroscopy // Progress in Optics. 1996. 35. P. 257–259.
2. Stähler M., Wynands R., Knappe S., Kitching J., Hollberg L., Taichenachev A., Yudin V. Coherent population trapping resonances in thermal  $^{85}\text{Rb}$  vapor: D1 versus D2 line excitation // Optics Letters. 2002. 27. P. 1472–1474.
3. Drever R.W.P., Hall J. L., Kowalski F.V. Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator // Applied Physics. 1983. 31(2). P. 97–105.
4. Скворцов М.Н., Игнатович С.М., Вишняков В.И. и др. Миниатюрный квантовый стандарт частоты на основе явления когерентного пленения населённости в парах атомов  $^{87}\text{Rb}$  // Квантовая электроника. 2020. 50(6). С. 576–580.
5. Beaty E.C., Bender P.L., Chi A.R. Optical Detection of Narrow  $\text{Rb}^{87}$  Hyperfine Absorption lines // Physical Review Letters. 1958. 1. P. 311–313.
6. Robinson L.B. Frequency Shifts in the Hyperfine Spectra of Alkalis Caused by Foreign Gases // Physical Review. 1960. 117. P. 1275–1280.



7. Nano Atomic Clock 1 [Electronic resource] // AccuBeat Ltd. URL: <https://www.accubeat.com/product-item/nano-atomic-clock-na1/>. Дата обращения: 03.07.2020.
8. Miniature Atomic Clock (MAC — SA.3Xm) [Electronic resource] // Microsemi Corp. URL: <https://www.microsemi.com/product-directory/embedded-clocks-frequency-references/3825-miniature-atomic-clock-mac>. Дата обращения: 03.07.2020.