

УДК 621.37

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ПОВЫШЕННЫХ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НА МАКЕТЕ ЦЕЗИЕВОГО СТАНДАРТА ЧАСТОТЫ С ЛАЗЕРНОЙ НАКАЧКОЙ И ЛАЗЕРНЫМ ДЕТЕКТИРОВАНИЕМ

д.т.н. проф. Басевич А.Б., Тюляков А.Е., Лисицына Ю.Г., Атрохов А.Ю., Шаповалов Д.В.

*В работе рассматриваются вопросы создания макета квантового стандарта частоты (КСЧ) на цезиевой атомно-лучевой трубке с лазерной накачкой и детектированием. Приведены предварительные результаты испытаний макета КСЧ и продемонстрирована возможность получения нестабильности частоты КСЧ при времени измерения одни сутки на уровне  $5 \cdot 10^{-15}$ .*

### Введение

Развитие и применение информационно-измерительных цифровых технологий в сфере социально-экономического назначения России непосредственно связано с обеспечением синхронизации работы различных устройств. Повышение точности, оперативности и непрерывности синхронизации является базовым фактором повышения требований к точностным и эксплуатационным характеристикам используемых квантовых стандартов частоты (КСЧ).

Результаты эксплуатации КСЧ на цезиевой атомно-лучевой трубке традиционного типа показали высокую надежность этих приборов и суточную нестабильность частоты на уровне  $3-5 \cdot 10^{-14}$  [1]. Возможность дальнейшего совершенствования метрологических характеристик КСЧ традиционного типа к настоящему времени практически исчерпаны.

Одним из направлений дальнейшего повышения точностных характеристик КСЧ является использование лазерных технологий, оценки возможности создания которых приводятся в зарубежной литературе [2]. Также известно, что в системе GPS планируется использовать на перспективных космических аппаратах КСЧ с лазерными технологиями. В течение длительного времени проводятся исследования процессов оптической накачки и детектирования атомных пучков  $^{87}\text{Rb}$  и  $^{133}\text{Cs}$  в АЛТ, накоплен опыт разработки основных электронных систем, созданы макеты дискриминаторов и стандартов частоты с оптической накачкой полупроводниковыми лазерами [3-6].

Преимущества оптической накачки относительно традиционного метода известны – это повышение эффективности атомного пучка, приводящей к улучшению параметра качества квантового дискриминатора и соответственно к повышению стабильности частоты КСЧ.

Существующие стандарты частоты на цезиевых атомно-лучевых трубках с лазерной накачкой и детектированием (АЛТ-ЛН) не в полной мере отвечают требованиям настоящего времени. Хотя теоретические возможности позволяют достичь суточную нестабильность частоты  $1\text{-}5 \cdot 10^{-15}$ .

### Исследования на макете

В начале 2018 года в АО «РИРВ» было принято решение создать макет КСЧ-ЛН на основе цезиевой атомно-лучевой трубки с лазерной накачкой (АЛТ-ЛН) вместо АЛТ на принципах магнитной селекции. В макете КСЧ использовались отечественная система АПЧ, преобразователь частоты и лазерные излучатели иностранного производства.

Результаты, полученные в этом макете КСЧ-ЛН, по нестабильности частоты за время измерения 100 с составили  $8 \cdot 10^{-14}$  (рисунок 1), что позволяет прогнозировать достижение суточной нестабильности на уровне  $5 \cdot 10^{-15}$ .

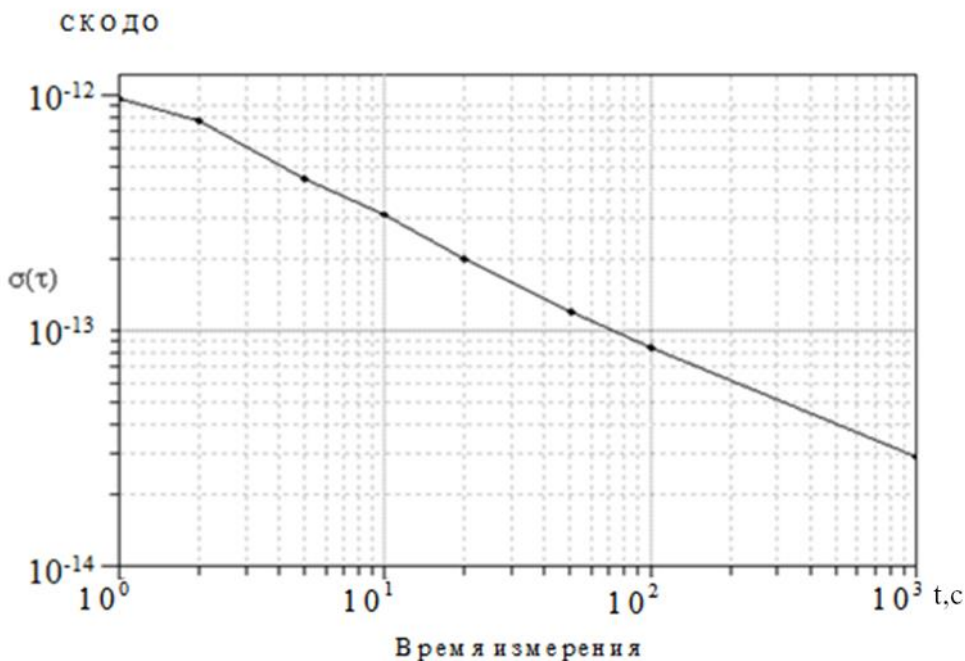


Рисунок 1 – График зависимости среднего квадратического относительного двухвыборочного (СКОДО) отклонения измеренного значения меры частоты от времени измерения

Однако, при оценке характеристики в течение 5 суток, наблюдалось отклонение экспериментального измерения нестабильности частоты КСЧ от теоретического (см. формулу 1), которое коррелировалось с изменением внешней температуры (см. рисунок 3).

$$\left(\frac{\Delta f}{f}\right)_{\tau_2} = \left(\frac{\Delta f}{f}\right)_{\tau_1} \sqrt{\frac{\tau_2}{\tau_1}}, \tau_2 > \tau_1, \quad (1)$$

где  $\left(\frac{\Delta f}{f}\right)_{\tau_2}$  – стабильность частоты за время измерения  $\tau_2$ ,  
 $\left(\frac{\Delta f}{f}\right)_{\tau_1}$  – стабильность частоты за время измерения  $\tau_1$ .

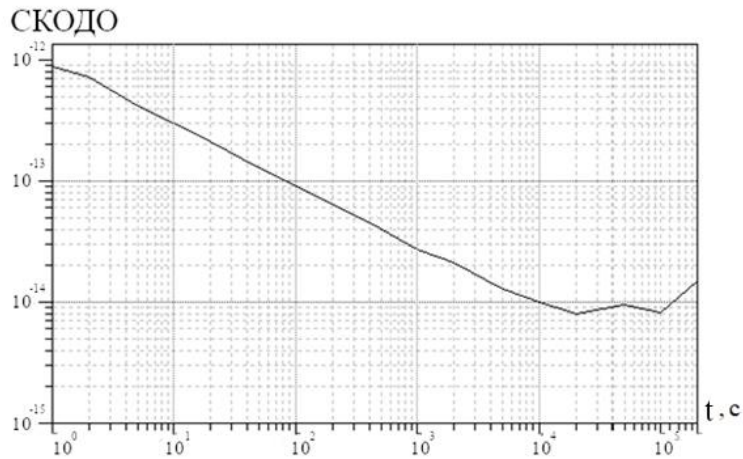


Рисунок 2 – Зависимость СКОДО измеренного значения меры частоты от времени измерения

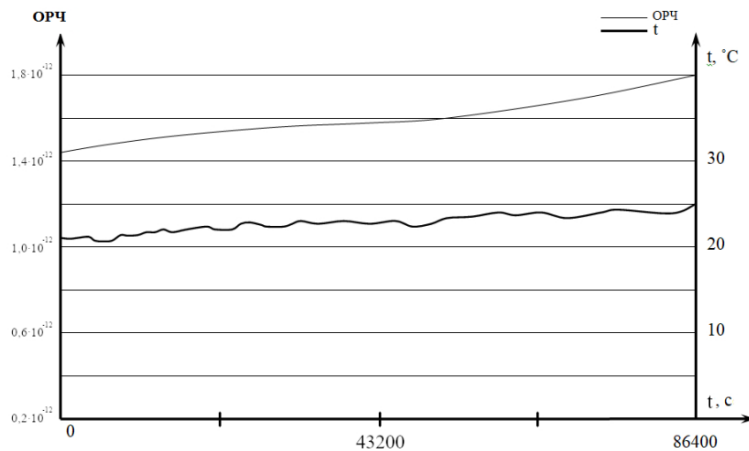


Рисунок 3 – Графики относительной разности частот и внешней температуры во время эксперимента

Из рисунка 2 видно, что отклонение измеренной величины СКОДО на интервале измерений более  $10^4$  с отличается от теоретически расчетного (см. формулу 1).

Исследования показали, что при изменении внешней температуры сказывается на получении требуемой долговременной нестабильности частоты. Для ослабления влияния внешней температуры был изготовлен пассивный термостатированный бокс, в котором были размещены АЛТ-ЛН с лазерами. Окончательный вид макета с термостатированным боксом приведен на рисунке 4.

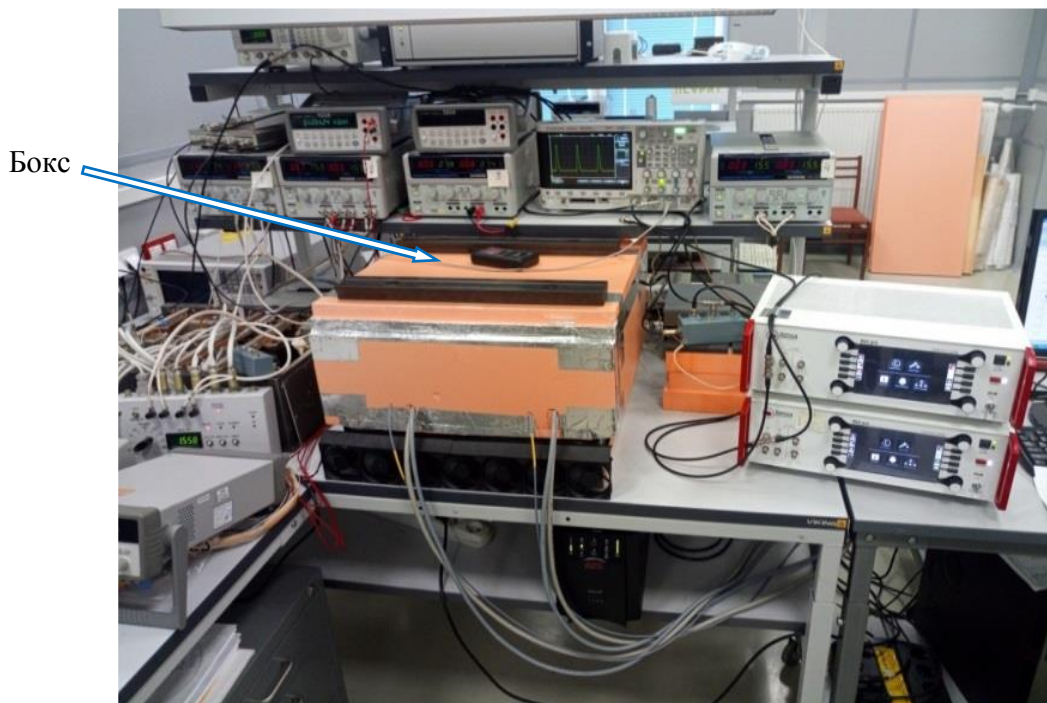


Рисунок 4 – Внешний вид лабораторной установки для исследования характеристик макета КСЧ, размещенного в термостатированном боксе

В результате испытаний установлено, что при изменении внешней температуры на  $\pm 2^\circ\text{C}$  колебания температуры в зоне расположения АЛТ-ЛН практически отсутствуют, а градиент температуры по поверхности АЛТ-ЛН составляет порядка  $0,1^\circ\text{C}$ . Результаты испытаний макета с термостатированным боксом за время около 5 суток представлены на рисунках 5 и 6. На рисунке 5 видно, что за время проведения эксперимента изменение частоты практически отсутствовало, а на рисунке 6 приведена оценка нестабильности частоты на различных интервалах измерений. Результаты, приведенные на рисунке 6, показывают, что при термостатировании АЛТ-ЛН с лазерными излучателями экспериментально полученные значения нестабильности частоты при различных временах измерения (показано синим цветом на графике) практически совпадают с теоретическими значениями и соответствуют выражению (1).

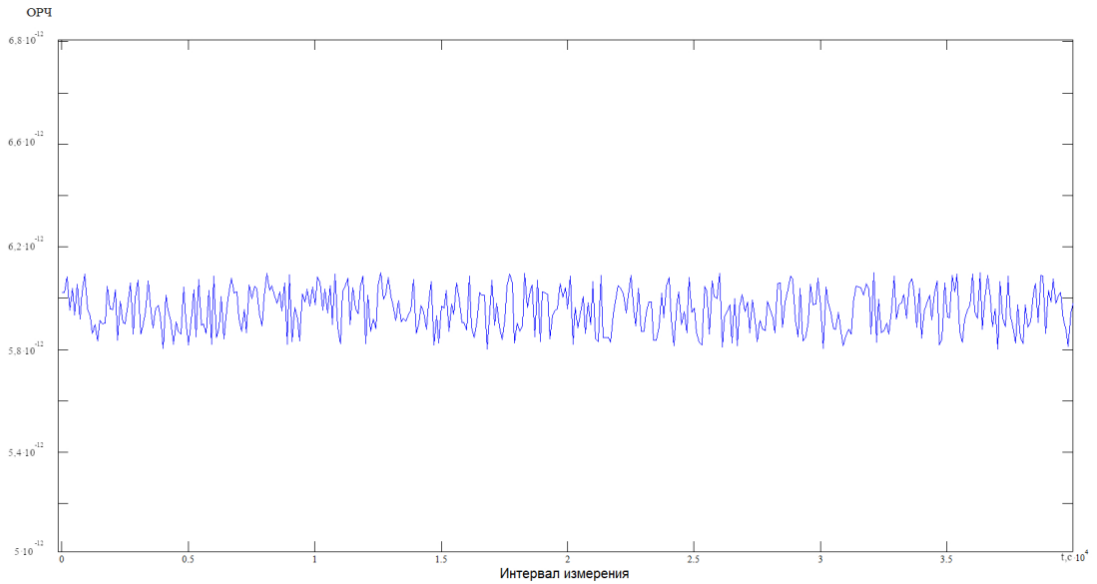
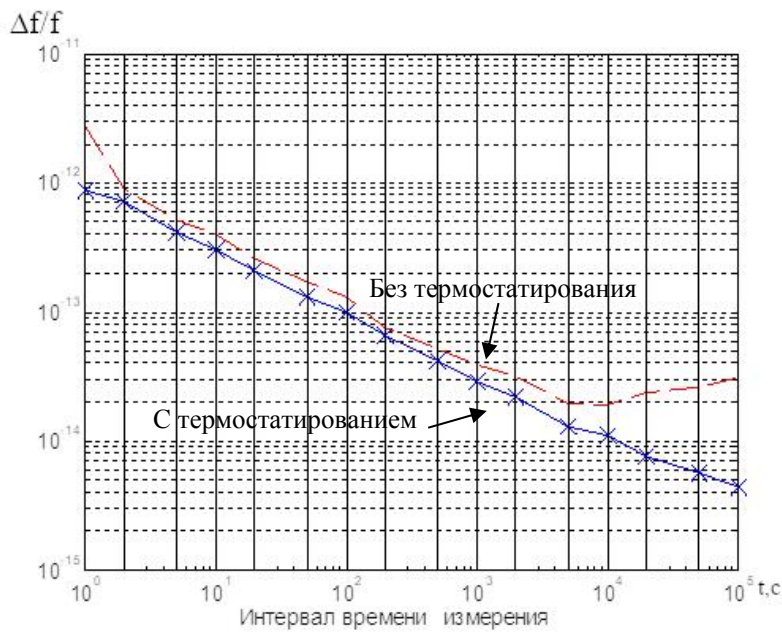


Рисунок 5 – График относительной разности частот во времени



ОРЧ=5.9115e-12		
Tay	СКДО	N
1	8.7e-13	400893
2	7.1e-13	200296
5	4.1e-13	80118
10	3.0e-13	40019
20	2.1e-13	20029
50	1.3e-13	8011
100	9.9e-14	4008
200	6.5e-14	2002
500	4.2e-14	801
1000	2.9e-14	400
2000	2.2e-14	200
5000	1.3e-14	80
1e4	1.1e-14	40
2e4	7.6e-15	20
5e4	5.7e-15	8
1e5	4.4e-15	4

Рисунок 6 – Нестабильность частоты макета КСЧ на различных интервалах измерения (N – число отсчетов на одном интервале измерения)

### Заключение

1) Создан макет КСЧ-ЛН на отечественных АЛТ-ЛН и системе АПЧ в комбинации с импортными лазерами.

2) Макет КСЧ-ЛН с термостатированным боксом, внутри которого расположена АЛТ-ЛН и лазерный излучатель, показал суточную нестабильность на уровне  $5 \cdot 10^{-15}$ .

3) С использованием лазерной накачки и детектирования атомного пучка можно получить нестабильность на уровне  $5 \cdot 10^{-15}$ , что в несколько раз лучше, чем в КСЧ с магнитной селекцией атомного пучка.

4) В настоящее время проводятся работы по замене лазерных излучателей и преобразователя частоты импортного производства на отечественные разработки.

### Литература

1 S. Bhattarai. Satellite clock time offset prediction in global navigation satellite systems//Department of Civil, Environmental and Geomatic Engineering University College London, July 2014.

2 R. Schmeissner, A. Douahi, I. Barbereau, P. Dufreche, A. Brechenmacher, K. Kudielka, F. Loiseau, A. Romer, C. Roth, W. Coppoolse, N. Mestre, M. Baldy, N. von Bandel, O. Parillaud, M. Garcia, and M. Krakowski. Towards an Engineering Model of Optical Space Cs Clock // Proc. of the European Frequency and Time Forum (EFTF), York, United Kingdom, 4-7 April 2016.

3 A. Gevorkyan, A. Besedina, and A. Bassevich. Prospects for developing GLONASS spaceboard atomic beam frequency standard with laser pumping // Proc. of the 1993 IEEE Int. Freq. Control Symp., 1993. – P. 97-106.

4 A.N. Besedina, A.G. Gevorkyan, and V.S. Zholnerov. The efficiency investigation of  $^{87}\text{Rb}$  atomic beam laser pumping for designing a quantum discriminator for high-performance space-borne atomic beam frequency standard // Proc. of the 19<sup>th</sup> European Time and Frequency Forum (EFTF), Besancon, France, 2005. – P. 324-330.

5 A. Besedina, A. Gevorkyan, G. Mileti, V. Zholnerov, and A. Bassevich. Preliminary results of investigation of the high-stable Rubidium atomic beam frequency standard with laser pumping/detection for space application // Proc. of the 20<sup>th</sup> European Time and Frequency Forum (EFTF), Braunschweig, Germany, 2006. – P. 270-276.

6 Беседина А.Н., Кочегаров В.П., Никулин В.С., Лисицына Ю.Г. Атомно-лучевой стандарт частоты с лазерной накачкой и лазерным детектированием на пучке атомов  $^{87}\text{Rb}$  // 5 Всероссийская конференция «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (КВНО-2013), ИПА РАН, СПб, 15-19 апр. 2013 г.