

## Усовершенствование системы терморегуляции квантового стандарта частоты с рубидиевой газовой ячейкой

Е.В. Исупова<sup>1,\*</sup>, С.Ю. Швецов<sup>2</sup>, А.В. Шавшин<sup>1</sup>, А.П. Валов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
Россия, 195251, Санкт-Петербург

<sup>2</sup>Российский институт радионавигации и времени. Россия, 192012, Санкт-Петербург

<sup>3</sup>Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций  
имени профессора М.А. Бонч-Бруевича. Россия, 193232, Санкт-Петербург  
(Поступила в редакцию 20.05.2023; подписана в печать 21.09.2023)

Обоснована необходимость повышения метрологических характеристик квантового стандарта частоты на атомах рубидия-87. Отмечено, что основным дестабилизирующим фактором, который снижает точность определения частоты, является температура. Для её контроля в квантовом стандарте частоты применяются терморегуляторы. Установлено, что используемые в настоящее время системы для лазера и оптических компонент не могут обеспечить необходимую стабильность температуры, которая требуется для улучшения метрологических характеристик квантового стандарта. Разработана новая схема терморегулятора квантового стандарта частоты с рубидиевой газовой ячейкой с использованием ПИД-регулятора, а также проведено моделирование её работы в среде MisCo-Sar. Проанализированы переходные процессы в схеме терморегулятора. Установлено уменьшение влияния температуры на оптические компоненты и характеристики лазера в квантовом стандарте частоты.

PACS: 06.20.fb.

УДК: 53.06.

Ключевые слова: квантовый стандарт частоты, оптическая накачка, лазерное излучение, стабильность частоты, температура, терморегуляция, дифференциальный усилитель, ПИД-регулятор.

### ВВЕДЕНИЕ

В современном мире для решения различных задач в промышленности, экологии, сельском хозяйстве, транспорте, геологической разведке необходимо точное определение координат [1–3]. Наибольшую точность при определении координат объекта обеспечивают космические навигационные системы [4–8]. Работа этих систем в значительной степени зависит от формирования точных сигналов времени и частоты [9]. На борту каждого спутника находятся квантовые стандарты частоты, которые обеспечивают точность и стабильность, а также определяют положение и скорость спутника [10]. Одним из широко используемых типов атомных часов является квантовый стандарт частоты (КСЧ) с рубидиевой газовой ячейкой [11].

Фактором, ухудшающим стабильность частоты рубидиевого КСЧ, является температура. Изменение температуры приводит к изменению величин параметров всех элементов, особенно оптических, а также влияет на характеристики лазерного излучения. Для компенсации влияния температуры детали КСЧ изготавливают из термостойких материалов с возможно малыми температурными коэффициентами [9, 11]. В широком диапазоне изменения температуры, определяемыми условиями эксплуатации, этой меры оказывается недостаточно, поэтому возникает необходимость применения термостатирования.

Суть термостатирования состоит в том, чтобы обес-

печить для всей схемы такой режим, при котором среднее значение и изменение температуры среды, окружающей термостатируемый объект, а также изменение тепловых потоков в этой среде являются настолько малыми, что они приводят к изменениям генерируемой частоты стандартом, существенно меньше допустимых [10]. Указанные условия создаются с помощью специальных устройств — термостатов, которые и обеспечивают постоянство температуры в замкнутом объеме с определенной степенью точности ее поддержания.

В таблице приведены основные характеристики максимумов отклонения в стабильности температуры для различных температур в разных системах, в которых используется квантовый стандарт частоты.

Анализ разработок прошлых лет [12–18] показал, что проблему термостабилизации в различных блоках КСЧ на атомах рубидия-87 решить с использованием этих устройств достаточно сложно. Это связано с тем, что квантовые стандарты, используемые на подвижных объектах, имеют жесткие ограничения как по массе, так и по размерам. Кроме того, есть ограничения на возможное увеличение потребления электрической энергии при модернизации конструкции. Все эти ограничения не могут быть соблюдены при использовании конструкций терморегуляторов, представленных в таблице. Поэтому необходимо на основе анализа современных разработок осуществить модернизацию действующей конструкции терморегулятора с сохранением размеров блока, в котором он установлен, характеристик по массе и энергопотреблению. Один из возможных вариантов решения задачи представлен в данной работе.

\* isupova.e24@mail.ru

Таблица. Сравнительный анализ различных разработок терморегуляторов для компенсации бросков температуры

Разработчики терморегуляторов	$T_{max}$ , К	Полученная стабильность, мКК	Область использования
Bonetti M. et al. [12]	348	$\pm 500$	системы наведения, прецизионные измерения
Dratler Jr Jay [13]	308	$\pm 10$	радары, спутники
Esman R. D. et al. [14]	300	$\pm 100$	прецизионные измерения, радары, атомные часы
Lee H. S. et al. [15]	296	$\pm 60$	глобальное позиционирование, телеметрия
Sarid D. et al. [16]	333	$\pm 15$	атомные часы, базовые станции связи, телеметрия
Grubic M. et al. [17]	320	$\pm 40$	прецизионные измерения, радары, спутники
Larsen N. T. [18]	301	$\pm 25$	глобальное позиционирование, атомные часы, телеметрия

### 1. ТЕРМОРЕГУЛЯЦИЯ В КВАНТОВОМ СТАНДАРТЕ ЧАСТОТЫ НА АТОМАХ РУБИДИЯ-87

Система регулирования температуры — необходимая и важная часть рубидиевого стандарта частоты. Все наиболее уязвимые части КСЧ расположены в оптическом квантовом дискриминаторе. Рубидиевая газовая ячейка должна быть разогрета до определенной температуры  $T$ , чтобы получить в ней необходимое давление паров [10].

В большинстве случаев в находящихся в эксплуатации терморегуляторах рубидиевого КСЧ используют термисторные температурные датчики, так как они чувствительные, маленькие и обладают достаточно хорошей стабильностью. Для обеспечения эффективной работы схемы датчики должны иметь хороший тепловой контакт с термостатом, а также избегать каких-либо механических воздействий.

Классическая конструкция используемого терморегулятора в рубидиевом КСЧ представлена на рис. 1.

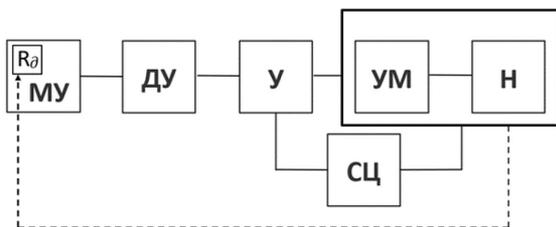


Рис. 1. Структурная схема терморегулятора:  $R_d$  — температурный датчик, МУ — мост Уитстона, ДУ — дифференциальный усилитель, У — усилитель, УМ — усилитель мощности, Н — нагреватель, СЦ — стабилизирующая цепь

Температурный датчик вырабатывает сигнал, пропорциональный значению температуры. Этот датчик является плечом измерительного моста Уитстона. Далее сигнал поступает на усилители, которые необходимы для повышения чувствительности системы регулирования температуры и обеспечения мощности, требуемой для работы исполнительных органов. При этом сигнал проходит по обратной связи — стабилизирующей цепи.

Выход усилителя мощности управляется токами, которые поступают на нагреватель или элемент Пельтье. Он, в свою очередь, связан температурной обратной связью с датчиком, то есть при увеличении температуры нагревателя сопротивление терморезистора в мосту будет уменьшаться, тем самым обеспечивая для терморегулятора нормальный режим работы.

Основными недостатками данной схемы являются большая погрешность считывания температурных данных, медленная реакция моста на разбалансировку при быстрых потоковых воздействиях, которые часто бывают в космическом пространстве.

Поэтому нами была разработана новая конструкция терморегулятора. В этой схеме вместо блока усилителя будет использоваться блок пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулятора, который позволяет обеспечить более высокий уровень регулирования (рис. 2).

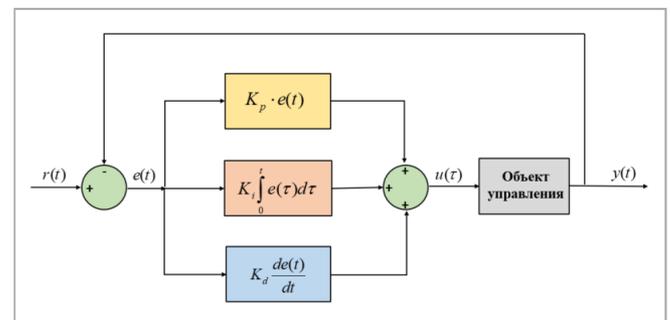


Рис. 2. Схема ПИД-регулятора

Система регулирует величину  $y(t)$ , получает её с помощью установленного ранее значения  $r(t)$ . На вход ПИД-регулятора поступает ошибка  $e(t)$ , на выходе ПИД-регулятора получается управляющий сигнал  $u(\tau)$ , значение  $\tau$  соответствует определенному моменту времени. Этот сигнал далее поступает в блок «объект управления» и используется для регулировки величины  $y(t)$ . Коэффициенты  $K_p$ ,  $K_i$  и  $K_d$  определяют соответственно пропорциональный, интегральный, дифференциальный блок ПИД-регулятора.

В этом устройстве формируется управляющий сигнал для получения необходимой точности и качества переходного процесса.

## 2. СПОСОБ ПОСТРОЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ТЕРМОРЕГУЛЯТОРА

В новой конструкции терморегулятора с целью улучшения стабильности всего КСЧ проведена модернизация каскада усилителя мощности с цепочкой обратной связи. В среде Micro-Cap собрана принципиальная схема терморегулятора. Проведено моделирование переходных процессов. На рис. 3 представлены его результаты.

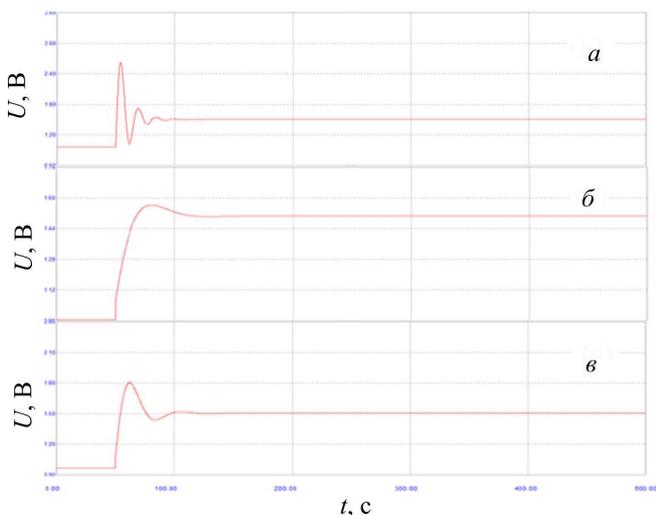


Рис. 3. Результаты моделирования: *a* — быстрая реакция,  $t = 60$  с, частые переколебания; *b* — медленная реакция,  $t = 90$  с, редкие переколебания; *v* — быстрая реакция,  $t = 70$  с, редкие переколебания

Ёмкости и сопротивления в схеме подобраны таким образом, чтобы выходное напряжение, находящегося в блоке усилителя мощности, мгновенно реагировало на единичный скачок напряжения на входе схемы, а колебательные процессы после этого броска были минимальны.

На рис. 4 приведены результаты исследования изменения сопротивления терморезистора в течение 14 ч в термокамере для старой схемы терморегулятора в дискриминаторе. Температура воздуха в термокамере изменялась каждые 4 ч. Изменение сопротивления терморезистора составило около 3 Ом, что не приемлемо для терморегулятора в КСЧ.

Экспериментальный образец схемы терморегулятора был установлен в лабораторный макет КСЧ, проведены испытания в термокамере. На рис. 5 приведены результаты этого же опыта для новой схемы терморегулятора.

Результаты исследования показали, что в новой разработанной конструкции чувствительность сопротивления к изменению температуры составляет  $\approx 1$  Ом.

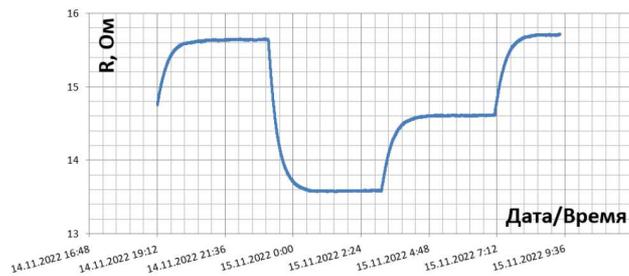


Рис. 4. Изменение сопротивления терморезистора в старой схеме терморегулятора в термокамере

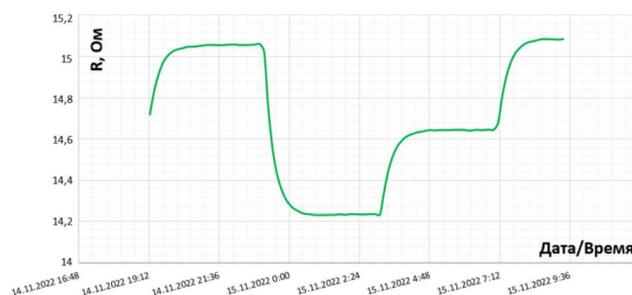


Рис. 5. Изменение сопротивления терморезистора в новой схеме терморегулятора в термокамере

То есть при изменении температуры нагревателя, сопротивление температурного датчика имеет ошибку в 1 Ом, из-за чего происходит разбалансировка моста Уитстона. Новая схема обрабатывает изменение температуры с меньшей ошибкой.

Далее было установлено, что при времени испытания 10 000 с улучшение стабильности частоты составило 7%. При времени испытания 1 000 с улучшение составило 6%.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ данных о работе систем регулирования температуры в различных моделях КСЧ на атомах рубидия-87 с оптической газовой ячейкой и результатов моделирования схемы терморегулятора показали, что новая схема реализации работает корректно, внедрение ПИД-регулятора вместо ранее используемого транзисторного каскада усилителя мощности улучшает работу терморегулятора. Получена температурная стабильность  $\pm 50$  мК. Порог изменения сопротивления терморезистора в мосте Уитстона  $\approx 1$  Ом позволяет улучшить отношение сигнал/шум регистрируемого оптического сигнала минимум в два раза, что улучшает кратковременную стабильность частоты КСЧ на 6–7%. Это автоматически улучшает синхронизацию шкал времени в спутниковой навигационной системе и повышает точность определения координат объекта.

- [1] Davydov R., Antonov V., Moroz A. // IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EEXPolytech - 2018). **8906791**. 295. Saint-Petersburg, 2019.
- [2] Logunov S.E., Koshkin A.Y., Davydov V.V. // Journal of Physics: Conference Series. **741**, N 1. 012092. (2016).
- [3] Hegarty C. J., Chatre E. // Proceedings of the IEEE. **96**, N 12. 1902. (2008).
- [4] Batori E. et al. // Advances in Space Research. **68**, N 12. 4723. (2021).
- [5] Arinushkina K., Valov A., Isupova E. // Proceedings of 8th International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT), Samara, Russian Federation. **21992028**. 20302.(2022).
- [6] Huang X., Xia B., Zhong D. et al. // Proceedings of the 2001 IEEE International Frequency Control Symposium. 105. (2001).
- [7] Hudson A., Camparo J. // Physical Review Applied. **13**, N 6. 064007. (2020).
- [8] Petrov A.A., Shabanov V.E., Zalyotov D.V. et al. // IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics, EEXPolytech. **8564389**. 52. (2018).
- [9] Riehle F. // Frequency standard. Basic and applications, WILEY-VCH Verlag GmbH Co. KGaA: New-York. 2008. 514 p.
- [10] Lukashov N.A., Davydov R.V., Glinushkin A.P., Rud' V.Yu. // Journal of Physics: Conference Series. **1326**, N 1. 012046. (2009).
- [11] Shavshin A.V. // IEEE VIII International Conference on Information Technology and Nanotechnology. **21991987**. 56. (2022).
- [12] Bonetti M., Calmettes P. // Review of scientific instruments. **68**, N 11. 4163. (1997).
- [13] Dratler Jr Jay. // Review of Scientific Instruments. **45**, N 11. 1435. (1974).
- [14] Esman R.D., Rode D.L. // Review of scientific instruments. **54**, N 10. 1368. (1983).
- [15] Lee Ho Seong et al. // Review of scientific instruments. **61**, N 9. 2478. (1990).
- [16] Sarid D., Cannell D.S. // Review of Scientific Instruments. **45**, N 9. 1082. (1974).
- [17] Grubic M., Wurz U. // Journal of Physics E: Scientific Instruments. **11**, N 7. 692. (1978).
- [18] Larsen Neil T. // Review of Scientific Instruments. **39**, N 1. 1. (1968).

## Improvement of the thermoregulation system of the quantum frequency standard with a rubidium gas cell

E.V. Isupova<sup>1,a</sup>, S.Y. Shvetsov<sup>2</sup>, A.V. Shavshin<sup>1</sup>, A.P. Valov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia

<sup>2</sup>Russian Institute of Radionavigation and Time, Saint Petersburg, Russia

<sup>3</sup>The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications, Saint-Petersburg, Russia

E-mail: <sup>a</sup>isupova.e24@mail.ru

The necessity of increasing the metrological characteristics of the quantum frequency standard on rubidium-87 atoms is substantiated. It is noted that the main destabilizing factor that reduces the accuracy of frequency determination is temperature. To control it in the quantum frequency standard, thermostating and thermoregulation are used. It is established that the currently used systems for laser and optical components cannot provide the necessary temperature stability, which is required to improve the metrological characteristics of the quantum standard. A new circuit of a quantum frequency standard temperature controller with a rubidium gas cell using a PID controller has been developed, and its operation in the Micro-Cap environment has been simulated. Transient processes in the circuit of the thermostat are analyzed. A decrease in the influence of temperature on the optical components and characteristics of the laser in the quantum frequency standard was found.

PACS: 06.20.fb.

**Keywords:** quantum frequency standard, optical pumping, laser radiation, frequency stability, temperature, thermoregulation, differential amplifier, PID controller.

Received 20 May 2023.

### Сведения об авторах

1. Исупова Екатерина Васильевна — студентка бакалавриата; e-mail: isupova.e24@mail.ru.
2. Швецов Сергей Юрьевич — вед. инженер АО «Российский институт радионавигации и времени»; e-mail: shvetsov0000@gmail.com.
3. Шавшин Артём Владимирович — студент магистратуры; e-mail: shavshin.av@edu.spbstu.ru.
4. Валов Антон Петрович — аспирант; e-mail: tony.valov2015@yandex.ru.