

Устройство термостабилизации для стандарта частоты и времени

Е.В. Исупова^{1*} А.П. Валов^{2†}

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра,
Институт электроники и телекоммуникаций
Санкт-Петербург, Россия*

*Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича
Санкт-Петербург, Россия*

(Поступила в редакцию 09.06.2024; подписана в печать 24.07.2024)

В статье обоснована необходимость улучшения устройства термостабилизации для стандарта частоты и времени на атомах рубидия-87. Рассмотрены различные принципы термостатирования: системы с регулированием по возмущению, отклонению и комбинированные. Выбран наилучший вариант. На его основе для борьбы с температурной нестабильностью, которая оказывает негативное влияние на оптические элементы в составе всего устройства, разработана новая схема термостабилизации для газовой ячейки квантового стандарта частоты. После проектирования печатных плат был произведён монтаж всех элементов. Лабораторные испытания квантового дискриминатора в термокамере показали отличную работу схемы, при которой изменение сопротивления терморезистора в мосте на 25% меньше, по сравнению со старой схемой. Доказана эффективность использования в схеме инструментального усилителя, который уменьшил сигнал ошибки в мосте, и ПИД-контроллера, который скорректировал переходные процессы и обеспечил стабильную и точную регуляцию в схеме, при этом защищая её от перерегулирования. С помощью термостабилизации в дальнейшем может быть улучшена кратковременная и долговременная стабильность стандарта частоты и времени, что благоприятно скажется на синхронизации временных шкал в спутниковой навигационной системе, которая опирается на точные измерения времени и расстояния для определения местоположения объекта, что имеет большое значение для таких областей, как авиация, морская навигация, геодезия, а также для повседневного использования GPS-устройств.

PACS:06.20.fb.

УДК:53.06.

Ключевые слова: стандарт частоты и времени, газовая ячейка, терморегуляция, термостатирование, пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор, пассивная система терморегуляции.

ВВЕДЕНИЕ

Устройство, которое может воспроизводить широкий диапазон частот и сравнивать исследуемые и сгенерированные частоты, известно как стандарт [1–3]. Квантовый стандарт частоты на рубидии-87 содержит квантовый дискриминатор, который предназначен для обнаружения любого отклонения частоты зондирующего сигнала от частоты перехода атома изотопа рубидия-87 и генерирования сигнала ошибки [4–7]. В дополнение к термостатическому основанию квантовый дискриминатор также оснащен терморегуляторами для спектральной лампы, фильтрующей ячейки и газовой ячейки.

Все системы термостабилизации работают по одному и тому же принципу: когда температура объекта, который необходимо терморегулировать, отклоняется от определенного значения, количество тепла или холода, подаваемого на этот объект, должно быть соответствующим образом скорректировано. На заданное значение термостата могут влиять различные неконтролируемые факторы, такие как колебания температуры, перепады напряжений смещения и токов, перепады сопротивлений моста, тепловые напряжения между разнородными

ми металлами, шум и другие. Задача терморегулятора - поддерживать температуру датчика температуры в заданном диапазоне с определенным уровнем точности [8–10].

Исходя из анализа современных разработок [11–17], необходимо разработать конструкцию терморегулятора с сохранением габаритов устройства, в котором она будет установлена, а также характеристик по весу и энергопотреблению. В данной работе представлено одно из возможных решений этой проблемы.

1. ПРИНЦИПЫ И МЕТОДЫ ТЕРМОСТАТИРОВАНИЯ

Системы терморегулирования предназначены для автоматического поддержания заданной температуры объекта с допустимой погрешностью при изменении температуры окружающей среды и условий эксплуатации.

Различные системы терморегулирования отличаются принципом действия и методами автоматического регулирования температуры. По принципу действия термостатические системы делятся на пассивные и активные.

В пассивной системе постоянство температуры достигается за счет того, что термостатируемый объект снабжен тепловым фильтром инфранизких частот.

* isupova.e24@mail.ru

† tony.valov2015@yandex.ru

Система пассивного термостатирования не содержит устройств для регулирования температуры, не требует дополнительных затрат энергии и поддерживает температуру, равную средней температуре окружающей среды. Эффективность пассивного термостатирования зависит от инерции (постоянной времени) теплового фильтра и скорости изменения температуры окружающей среды. Пассивное термостатирование эффективно, если теплопроводность электрических входов объекта невелика и, если объект с термостатическим управлением не содержит нестабильных источников тепла [18]. Структурная схема системы пассивного термостатирования показана на рис. 1.

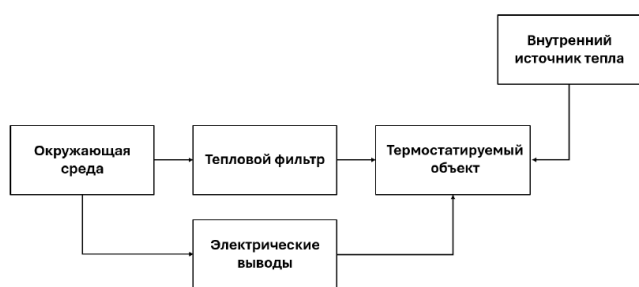


Рис. 1. Структурная схема пассивной системы термостатирования

В активных системах электрического термостатирования (СЭТ) заданная температура поддерживается за счет автоматического регулирования потока тепла или холода, подаваемого в термостатируемый объем, при изменении температуры окружающей среды и других воздействиях. Система активного термостатирования может быть представлена структурной схемой, показанной на рис. 2.

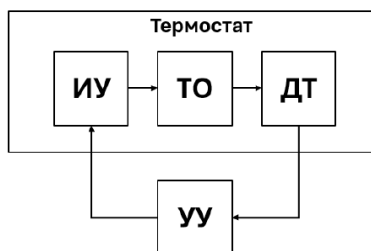


Рис. 2. Структурная схема активной системы термостатирования

Активная СЭТ включает в себя объект терморегулирования ТО и датчик температуры ДТ, который является термочувствительным элементом. Он контролирует температуру объекта терморегулирования и преобразует ее отклонение от заданного значения в электрический сигнал. Этот сигнал подается на управляющее устройство УУ блока управления, которое усиливает его по напряжению и мощности. Управляющее напряжение с выхода управляющего устройства подается на

исполнительное устройство ИУ, которое влияет на температуру объекта.

Совокупность всех тепловых элементов системы представляет собой термостат, в который помещен объект с термостатическим управлением. В большинстве случаев термостатируется не сам объект, а изотермическая камера с объемом, температура в которой должна поддерживаться с некоторой допустимой погрешностью относительно номинального значения [19–21].

Привод создает тепловой поток, который компенсирует потерю тепла или холода камерой термостата в окружающее пространство.

В соответствии с теорией автоматического регулирования термостатируемый объект может быть представлен схемой, показанной на рис. 3.

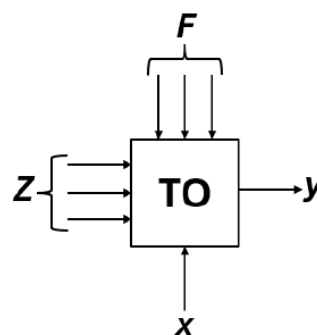


Рис. 3. Объект термостатирования

На объект термостатирования воздействует комбинация возмущений внешних $Z (Z_1, Z_2, \dots, Z_n)$, внутренних $F (F_1, F_2, \dots, F_n)$ и управляющих $X (X_1, X_2, \dots, X_n)$.

Основными внешними возмущениями являются: изменение температуры окружающей среды, изменение условий теплообмена между термостатом и окружающей средой, изменение напряжения питания управляющего устройства, изменение напряжения питания датчика температуры.

Основными внутренними возмущениями являются: изменение тепловыделения внутри терморегулируемого объекта, изменение температуры датчика в результате нагрева от протекающего через него тока, изменение параметров управляющего устройства. Управляющие возмущения могут быть функциями одного или нескольких возмущений. В зависимости от типа возмущения, определяющего управляющее воздействие, системы активного термостатирования делятся на системы с регулированием по возмущению, отклонению и комбинированные [8].

В нашей работе рассматривается комбинированная система, которая сочетает в себе принципы контроля отклонений и возмущений. В системе такого термостатирования воздействие на датчик температуры определяется разницей между фактической температурой термостатируемого объекта и заданной температурой.

Компенсация влияния изменений температуры окружающей среды достигается путем выбора параметров тепловой связи датчика с внешней средой таким образом, чтобы обеспечить одинаковую величину и скорость, но противоположный знак изменения температуры термостатируемого объекта. Система контроля температуры отклонения представляет собой замкнутую саморегулирующуюся систему. Эта система термостатирования является наиболее гибкой, поскольку в ней управляющее воздействие реагирует на всевозможные возмущающие факторы, так как датчик непосредственно контролирует температуру неподвижного объекта.

2. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ И ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ СХЕМЫ

При создании систем термостатирования приходится решать множество задач, одной из которых является поддержание высокой долговременной стабильности температуры, которая зависит от стабильности параметров датчика температуры. В высокоточных системах контроля температуры часто используются проволочные термисторы, изготовленные из медных или платиновых проволок.

В данной статье представлена схема (рис. 4) для стабилизации температуры газовой ячейки в квантовом дискриминаторе [22]. Термистор прямого нагрева с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС) TR-2 включен в мост Уитстона в качестве датчика температуры [23].

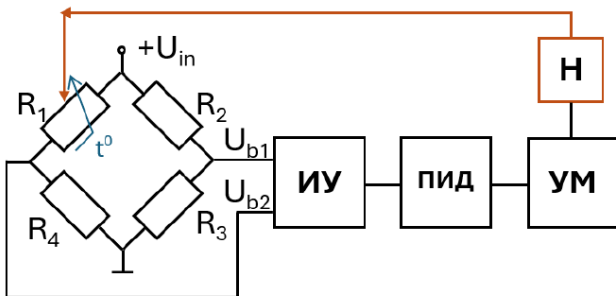


Рис. 4. Схема термостабилизации для квантового стандарта частоты (ИУ — инструментальный усилитель, ПИД — ПИД-контроллер, УМ — усилитель мощности, Н — нагреватель)

Сигнал ошибки рассчитывается по следующей формуле:

$$U_{bridge2} - U_{bridge1} = U_{in} \left(\frac{R_2}{R_2 + R_3} - \frac{R_1}{R_1 + R_4} \right). \quad (1)$$

Температурный коэффициент сопротивления моста и дрейф входного напряжения смещения интерфейсных операционных усилителей являются основными

источниками ошибок в терморегуляторах. На рис. 4 показано, что увеличение (или уменьшение) R_3 и увеличение (или уменьшение) R_2 оказывают противоположное влияние на напряжение $V_{bridge1}$ [4].

Это означает, что если R_3 и R_2 имеют температурный коэффициент одинакового знака, то температурное воздействие на $V_{bridge1}$ будет сведено к минимуму и даже может быть сведено к нулю. Аналогичный эффект невозможен для резистора R_4 . Поэтому в идеале сам R_4 должен иметь очень низкий температурный коэффициент.

Использование ПИД-регулятора в схемах термостабилизации обеспечивает эффективное и точное управление процессом нагрева или охлаждения, что особенно важно при работе с чувствительными к изменениям температуры системами [24].

На рис. 5 представлены разведённые на платформе EasyEDA печатные платы.

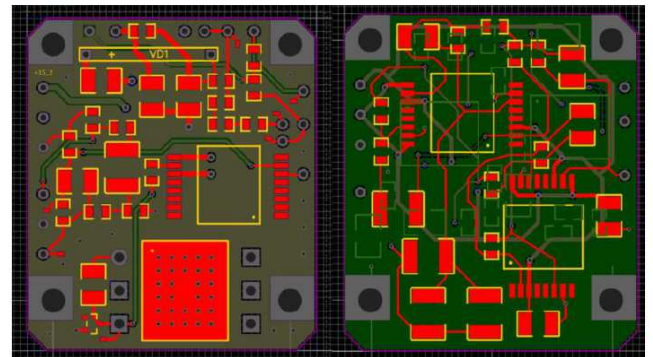


Рис. 5. Разведённые печатные платы схемы терморегулятора

После изготовления плат, был произведён монтаж элементно-компонентной базы.

На рис. 6 приведены результаты измерения изменения сопротивления термодатчика в термокамере для двух схем терморегулятора.

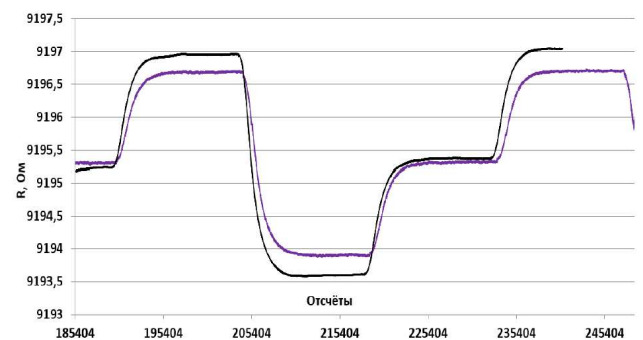


Рис. 6. График изменения сопротивления температурного датчика в термокамере (для сравнения: чёрным — действующая схема, фиолетовым — улучшенная)

Чёрным цветом здесь отмечена схема с дифференциальным усилителем и пропорциональным усилителем;

фиолетовым — схема с инструментальным усилителем (ИУ) и ПИД-контроллером. Устанавливались циклы температуры 20°C длительностью 4 часа и чередующиеся с ними циклы 15°C длительностью 4 часа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изменение сопротивления термодатчика в улучшенной схеме на 25% меньше, чем в действующей, что свидетельствует о большей изоляции моста (которую обеспечил ИУ) от остальной части схемы. Также это говорит о меньшей его разбалансировке и уменьшении сигнала ошибки (формула 1).

ПИД-контроллер обеспечил более точное управление процессом регулирования. Он быстро реагирует на изменения внешних условий, что позволяет поддерживать стабильность температуры в системе. ПИД-регулятор помогает избежать осцилляций и перерегу-

лирования, что может быть проблемой при использовании простых регуляторов. Инструментальный усилитель обеспечивает усиление и фильтрацию сигналов, что способствует повышению стабильности работы системы и уменьшению шумов. Хотя настройка ПИД-регулятора может потребовать некоторого опыта, он более гибок и легче настраивается для текущей задачи, чем старые схемы регулирования. Таким образом, схема с ПИД-регулятором и инструментальным усилителем более эффективна, точна и удобна в области настройки.

Полученные результаты по стабилизации температуры должны улучшить в конструкции квантового стандарта частоты как кратковременную, так и долговременную стабильность частоты выходного сигнала, которая в большей степени зависит от изменения температурного режима в различных блоках, особенно в оптической части. В дальнейшем данная схема будет проведена в составе всего КСЧ.

- [1] *Riley, W.J.* A history of the rubidium frequency standard. IEEE UFFC-S History. 2019. P. 2.
- [2] *Petrov A.A., Davydov V.V.* Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). **9247**, 739 (2015).
- [3] *Davydov V.V., Sharova N.V., Fedorova E.N.* et al. // 2015 Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). **9247**, 721 (2015).
- [4] *Григорьянц В.В., Жаботинский М.Е., Золин В.Ф.* Квантовые стандарты частоты. Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1968.
- [5] *Дулин В.Н.* Электронные и квантовые приборы СВЧ. 1972.
- [6] *Картошкин В.А.* // Оптика и спектроскопия. **125**, № 1. 14 (2018).
- [7] *Semenov V.V., Nikiforov N.F., Ermak S.V., Davydov V.V.* // Soviet journal of Communications Technology and Electronics. **36**, 59 (1991).
- [8] *Ингберман М.И., Фромберг Э.М., Грабой Л.П.* Термостатирование в технике связи. М., 1979.
- [9] *Petrov A.A., Davydov V.V., Myazin N.S.* Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). **10531** LNCS, 561 (2017).
- [10] *Lukashev N.A., Petrov A.A., Davydov V.V.* et al. // Proceedings of 18th International conference of Laser Optics ICLO-2018 (Saint-Petersburg). **8435889**, P. 271.
- [11] *Bonetti M., Calmettes P.* // Review of scientific instruments. **68**, N 11. 4163 (1997).
- [12] *Esman R.D., Rode D.L.* // Review of scientific instruments. **54**, N 10. 1368 (1983).
- [13] *Petrov A.A., Davydov V.V., Grebenikova N.M.* // Journal of Communications Technology and Electronics. **63**, 1281 (2018).
- [14] *Arinushkina K., Valov A., Isupova E.* Improvement of the frequency standard on cesium atoms used in spacecraft for remote sensing of the Earth, in: Proceedings of 8th International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT), Samara, Russian Federation. **21992028**. P. 20302. (2022).
- [15] *Petrov A.A., Shabanov V.E., Zalyotov D.V.* et al. // Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics, EExPolytech 2018 (Saint-Petersburg). **8564389**, P. 52.
- [16] *Zeng Wenjie* et al. // Progress in Nuclear Energy. **132**. 103564 (2022).
- [17] *Dong He* et al. // Case Studies in Thermal Engineering. **50**. 103442 (2023).
- [18] *Alcayde V., Vercher-Martinez A., Javier Fuenmayor F.* // Advances in Space Research. **68**(4). 1975 (2021).
- [19] *Герасимов С.Г.* Теоретические основы автоматического регулирования тепловых процессов: Учебное пособие. Выш. шк., 1967.
- [20] *Lucas S.* et al. // Thermal Science and Engineering Progress. **27**. 100990 (2022).
- [21] *Tang Xingwang, Yujia Zhang, Sichuan Xu* // International Journal of Heat and Mass Transfer. **206**. 123966 (2023).
- [22] *Isupova E.V., Shvetsov S.Y., Davydov V.V.* Improvement of the thermoregulator of the quantum frequency standard on rubidium-87 atoms. **4**. 5 (2023).
- [23] *Madhavan Unni P.K., Gunasekaran M.K., Kumar A.* // Review of scientific instruments. **74**, N 1. 231 (2003).
- [24] *Zhang, Zhaoli* et al. // Journal of Energy Storage. **71**. 107911 (2023).

Thermal stabilization device for frequency and time standards

E.V. Isupova^{1,a}, A.P. Valov^{2,b}

¹*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Institute of Electronics and Telecommunications
St. Petersburg, Russia*

²*St. Petersburg State University of Telecommunications named after Prof. M.A. Bonch-Bruевич
St. Petersburg, Russia*

E-mail: ^aisupova.e24@mail.ru, ^btony.valov2015@yandex.ru

The article discusses the need to improve the thermal stability of the frequency and time standard based on rubidium-87 atoms. Different methods of thermostating, such as perturbation-controlled, deflection-controlled, and combined systems, are considered. After analyzing these options, a new approach to thermal stabilization for a gas cell in a quantum frequency standard is proposed.

Based on this new approach, a thermal stabilization scheme has been developed to combat temperature fluctuations that can negatively affect the optical elements of the device. After designing the printed circuit boards and installing all the necessary components, laboratory tests were conducted in a thermal chamber to test the operation of the quantum discriminator. The results showed that the resistance change of the thermistor in the new circuit was 25% lower than in the previous version, demonstrating the effectiveness of the improved thermal stabilization scheme. The efficiency of using an instrumental amplifier in the circuit has been proven, reducing the error signal in the bridge and providing stable and accurate regulation. A PID controller has also been used to correct transients, protecting the circuit from overshoot. With the help of thermal stabilization, the long-term and short-term stability of the frequency and time standards can be further improved. This will benefit the synchronization of time scales in satellite navigation systems, which rely on accurate measurements of time and distance to determine the location of objects. This is of great importance in areas such as aviation, maritime navigation, and geodesy, as well as everyday use of GPS devices.

PACS: 06.20.fb.

Keywords: frequency and time standard, gas cell, thermoregulation, thermostating, proportional-integral-differential regulator, passive thermoregulation system.

Received 09 June 2024.

Сведения об авторах

1. Исупова Екатерина Васильевна — студентка магистратуры; e-mail: isupova.e24@mail.ru.
2. Валов Антон Петрович — инженер; e-mail: tony.valov2015@yandex.ru.