

## Разработка системы формирования сигнала возбуждения в квантовом стандарте частоты на атомах рубидия-87

А.П. Валов<sup>1,\*</sup>, Е.В. Исупова<sup>2</sup>, В.В. Давыдов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича  
Россия, 193232, Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, к. 1

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого  
Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29 литера Б  
(Поступила в редакцию 10.06.2024; подписана в печать 11.09.2024)

Обоснована необходимость модернизации стандарта частоты на атомах рубидия-87 с целью улучшения их метрологических характеристик для применения в спутниковых навигационных системах. Разработана часть системы формирования сигнала возбуждения для рубидиевого стандарта частоты. Проведено экспериментальное исследование полученной системы. Установлено, что использование другой системы формирования сигнала возбуждения позволяет уменьшить уровень фазовых шумов, а также уменьшить габаритные размеры стандарта частоты.

PACS: 06.20.fb.

УДК: 004.032.32.

Ключевые слова: квантовый стандарт частоты, рубидий-87, оптическая накачка, фазовый шум, фазовая автоподстройка частоты.

### ВВЕДЕНИЕ

В современном мире точное измерение времени и частоты имеет критическое значение для проведения многочисленных экспериментов в различных научных областях, таких как атомная физика, исследование земной поверхности или космическое пространство [1–3]. Без высокостабильных источников частоты и времени невозможна нормальная работа оборудования связи и метрологических служб [3–6].

Особое место среди устройств определения частоты и времени занимают квантовые стандарты частоты (КСЧ) [7–9]. Их преимущество заключается в использовании лазерного излучения и оптических элементов для стабилизации частоты, обеспечивая тем самым высокую устойчивость работы систем [9–11]. Незначительное отклонение частоты может привести к значительным ошибкам, особенно при передаче больших объемов данных [12–16].

С одной стороны, расширение круга задач, для решения которых используются спутниковые навигационные системы, требует повышения точности определения положения объектов до 0.5 м. С другой стороны, развитие научно-технического прогресса ведет к изменениям в составе используемой радиоэлектронной аппаратуры, что также требует постоянной модернизации КСЧ [8, 11, 14–18].

Разработка и внедрение новых моделей КСЧ являются трудоемкими и затратными процессами, и часто отсутствует возможность и ресурсы для их полной реализации. Поэтому чаще всего проводится модернизация уже существующих систем, направленная на улучшение их характеристик, таких как уменьшение размеров и веса, снижение энергопотребления и повышение метрологической точности [10, 12, 15]. Важно

отметить, что модернизация может касаться как всей конструкции КСЧ, так и отдельных ее компонентов или блоков

### 1. ПРИНЦИП РАБОТЫ СТАНДАРТА ЧАСТОТЫ НА АТОМАХ РУБИДИЯ-87

Принцип работы КСЧ на атомах рубидия-87 основан на оптической накачке атомов [17, 18]. Работа рубидиевого стандарта частоты (РСЧ) строится на сложных процессах взаимодействия света и атомов рубидия-87, и ключевым элементом этой системы является кварцевый генератор, способный генерировать стабильную частоту. Кварцевый генератор настраивается на частоту квантового перехода атомов рубидия-87.

Процесс настройки частоты кварцевого генератора на квантово-частотный переход атомов рубидия-87 (6.8347 ГГц) выполняется путем использования сверхвысокочастотного (СВЧ) сигнала, который подается из преобразователя частоты (ПЧ) на вакуумную ячейку, заполненную атомами рубидия-87 и буферным газом. Когда частота СВЧ сигнала совпадает с частотой квантового перехода возбужденных атомов рубидия-87, фотодетектор регистрирует максимальный сигнал, который преобразуется в отношение сигнал/шум (S/N). Если частота СВЧ сигнала отклоняется от частоты резонансного перехода, отношение S/N уменьшается, и срабатывает электронная схема, которая формирует сигнал ошибки.

На основе этого сигнала ошибки корректируется частота кварцевого генератора [17, 18]. Поэтому, одним из важных аспектов работы атомных часов является формирование СВЧ-сигнала с учетом различных требований к его характеристикам. Этот процесс осуществляется в блоке синтезатора частоты (СЧ), который должен обеспечивать высокую точность частоты, минимальное наличие боковых амплитудных составля-

\* [tony.valov2015@yandex.ru](mailto:tony.valov2015@yandex.ru)

ющих в спектре выходного сигнала, а также стабильность выходной частоты и амплитуды при изменении температуры (рис. 1).

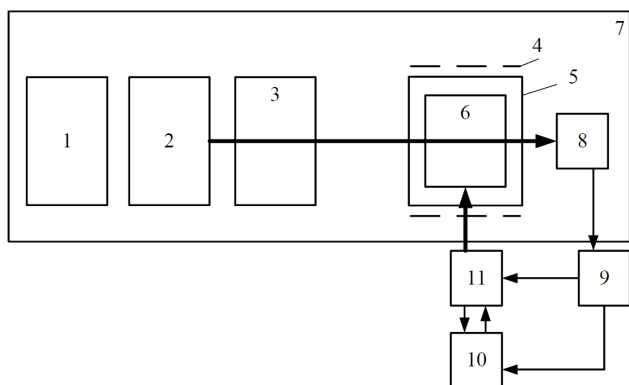


Рис. 1. Структурная схема КСЧ на атомах рубидия-87: 1 — рефлектор; 2 — лампа с парами рубидия — 87; 3 — ячейка — фильтр; 4 — соленоид С — поля; 5 — радиочастотный резонатор; 6 — ячейка с буферным газом; 7 — атомный дискриминатор; 8 — фотодетектор; 9 — система автоподстройки частоты; 10 — высокостабильный кварцевый генератор; 11 — синтезатор частоты

Подробно рассмотрев принцип формирования СВЧ сигнала, можно выделить ряд недостатков данной системы. Основным недостатком является отсутствие прямого управления частотой формируемого СВЧ сигнала, так как финальный этап синтеза необходимой частоты происходит внутри атомного дискриминатора. Это усложняет контроль и требует оценки совпадения частот по косвенным признакам. Другим недостатком является сложность согласования смеси сигналов с умножительным диодом атомного дискриминатора.

В нынешнем исполнении синтез частоты в РСЧ работает на методе прямого цифрового синтеза (DDS — direct digital synthesis) и умножении частоты до частоты атомного перехода рубидия-87. Использование DDS действительно позволяет довольно точно перестраивать сигнал частоты, однако, каскад умножения данный эффект уменьшает и не позволяет выдавать более качественную стабильность частоты.

Вышеизложенные недостатки ограничивают возможности улучшения характеристик системы. Рассматривается аналог системы формирования СВЧ сигнала для преодоления данных ограничений.

## 2. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ НА 100 МГц

В новой разрабатываемой системе формирования сигнала должен синтезироваться промежуточный сигнал с частотой 100 МГц и СВЧ сигнал с частотой 6.8347 ГГц.

Необходимую частоту сигнала предлагается синтезировать с помощью многопетлевой схемы фазовой ав-

топодстройки частоты (ФАПЧ) (рис. 2), основными элементами которой являются генератор, управляемый напряжением (ГУН), фазовый детектор (ФД) и фильтр нижних частот (ФНЧ).

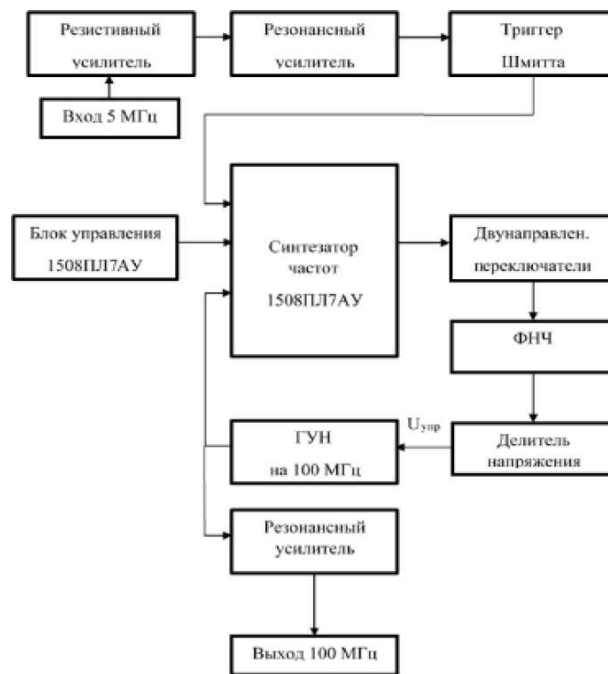


Рис. 2. Структурная схема фазовой автоподстройки частоты

Данный метод позволяет уменьшить спектральную плотность мощности фазового шума несущего сигнала до спектральной плотности мощности фазового шума у высокостабильного кварцевого генератора.

Схема фазовой подстройки частоты на 100 МГц (рис. 2) использует перестраиваемый кварцевый генератор (КГ) на 100 МГц, микросхему синтезатора частоты, которая работает как фазовый детектор, на вход которой подается сигнал 5 МГц из состава рубидиевого стандарта частоты и сигнал 100 МГц с КГ. Сигнал 5 МГц преобразуется в прямоугольный сигнал с помощью системы усилителей и триггера Шмитта, так как используемая микросхема синтезатора частоты работает только с прямоугольным сигналом в роли опоры. Затем синтезатор частоты проводит сравнение фаз сигнала 5 МГц и 100 МГц, выдавая при этом сигнал о расхождении фаз между этими сигналами. Далее этот сигнал преобразуется в управляющее напряжения для генератора 100 МГц и происходит подстройка его частоты.

Был разработан макет схемы ФАПЧ для 100 МГц и проведены экспериментальные исследования выходных характеристик спектральной плотности мощности сигнала 100 МГц с ФАПЧ и без петли ФАПЧ (рис. 3).

Экспериментальное исследование полученной схемы позволило убедиться в работоспособности схемы в плане уменьшения спектральной плотности мощности шумов ФАПЧ относительно спектральной плотно-

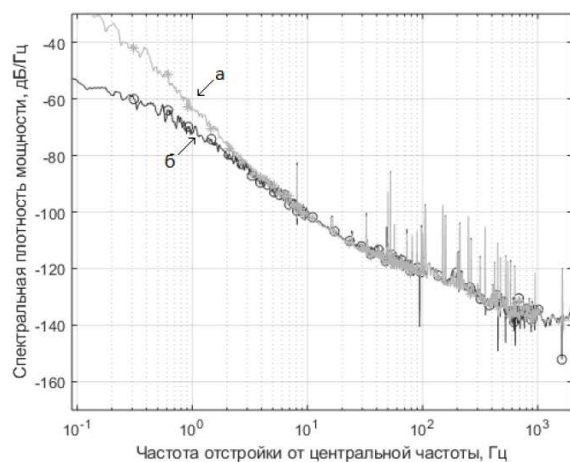


Рис. 3. Спектральная плотность мощности фазовых шумов сигнала 100 МГц: *a* — сигнал без ФАПЧ; *b* — сигнал с ФАП

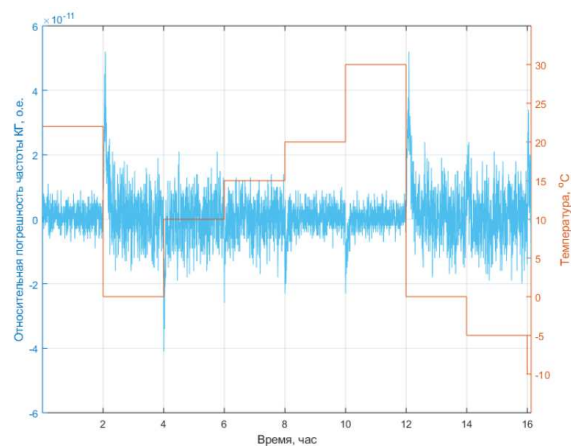


Рис. 4. График изменения относительной погрешности частоты выходного сигнала в диапазоне температур от  $-10^{\circ}\text{C}$  до  $30^{\circ}\text{C}$

сти мощности шумов КГ на 100 МГц для частот отстройки меньше 10 Гц. Для частот отстройки более 10 Гц уменьшение спектральной плотности мощности фазовых шумов не наблюдается.

Дополнительно проведено измерение относительной погрешности частоты выходного сигнала в диапазоне температур от  $-10^{\circ}\text{C}$  до  $30^{\circ}\text{C}$  с целью исследования влияния температуры на ход частоты системы (рис. 4).

Измерение относительной погрешности частоты показало отсутствие сильного влияния температуры внешней среды на работу схемы в целом.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментальное исследование полученной схемы позволили убедиться в работоспособности выбранного решения. Работа системы ФАПЧ зафиксирована для

частот отстройки меньше 10 Гц. Для улучшения работы петли ФАПЧ для отстройки больше 10 Гц предлагается доработка фильтра низких частот и замена генератора, управляемого напряжением, на более стабильный генератор и с более низкими характеристиками фазовых шумов. Климатические испытания в диапазоне температур показали отсутствие влияния температуры на частоту генератора, это связано с тем, что генератор термостатирован. Изменение частоты генератора 100 МГц составило менее 1% от его номинальной частоты.

Для дальнейшего улучшения схемы предполагается переработка схемы фильтра низких частот и возможная замена КГ на 100 МГц на аналогичный, но с лучшими характеристиками по спектральной плотности мощности фазовых шумов.

- [1] Glazov A.I., Grigor'ev V.V., Kravtsov V.E. et al. // Measurement Techniques **51**. 1064 (2008).
- [2] Kolmogorov O.V., Shchipunov A.N., Prokhorov D.V. et al. // Measurement Techniques **60** 901 (2020).
- [3] Kartoshkin V.A. // J. Phys.: Conf. Ser. **1697** N 1. 012146. (2020).
- [4] 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).
- [5] Davydov R.V., Antonov V.I., Moroz A.V. // Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics, EExPolytech 2018 (Saint-Petersburg) 8564378 236 (2018).
- [6] Shavshin A.V. // 8th International Conference on Information Technology and Nanotechnology, ITNT 2022. 232 (2022).
- [7] Isupova E., Shavshin A.V. // Proceedings of the 2024

- Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EICon 2024. 41 (2024).
- [8] 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).
- [9] Pakhomov A.A. // Journal of Communications Technology and Electronics **52**. 1114 (2007).
- [10] Davydov V.V., Ermak S.V., Karseev A.U. et al. // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics) **8638** LNCS 694 (2014).
- [11] Blinov I.Y., Boiko A.I., Domnin Y.S. et al. // Measurement Techniques **60**. 30 (2017).
- [12] Nazarov L.E., Golovkin I.V. // Journal of Communications Technology and Electronics **52**. 1125 (2017).
- [13] Petrov A.A., Vologdin V.A., Davydov V.V., Zalyotov D.V.

- // Journal of Physics: Conference Series **643**(1). 012087 (2015).
- [14] *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. 52 (2018).
- [15] *Lukashev N.A., Petrov A.A., Davydov V.V. et al.* // Proceedings of 18th International conference of Laser Optics ICLO-2018 (Saint-Petersburg) 8435889. 271 (2018).
- [16] *Исупова Е.В., Будников А.С., Давыдов В.В. et al.* // [Ученые записки физического ф-та Московского ун-та.](#) № 4. 2241201 (2022).
- [17] *Риле Ф.* Стандарты частоты. Принципы и применения. М.: Физматлит, 2009.
- [18] *Одуан К., Гино Б.* Измерение времени. Основы GPS. М.: Техносфера, 2002.

## Development of a system for generating an excitation signal in a quantum frequency standard based on rubidium-87 atoms

**A.P. Valov<sup>1</sup>, E.V. Isupova<sup>2</sup>, V.V. Davydov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications  
St Petersburg, 193232, Russia*

<sup>2</sup>*Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU)  
St.Petersburg, 195251, Russia*

*E-mail: <sup>1</sup>tony.valov2015@yandex.ru*

The need to modernize the frequency standard on rubidium-87 atoms in order to improve their metrological characteristics for use in satellite navigation systems is substantiated. A part of the excitation signal generation system for the rubidium frequency standard has been developed. An experimental study of the resulting system was carried out. It has been established that the use of a different system for generating the excitation signal makes it possible to reduce the level of phase noise, as well as reduce the overall dimensions of the frequency standard.

PACS: 06.20.fb.

*Keywords:* quantum frequency standard, rubidium-87, optical pumping, phase noise, phase-locked loop.

*Received 10 June 2024.*

### Сведения об авторах

1. Валов Антон Петрович — сотрудник; e-mail: [tony.valov2015@yandex.ru](mailto:tony.valov2015@yandex.ru).
2. Исупова Екатерина Васильевна — магистр 1-го курса Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого; e-mail: [isupova.e24@mail.ru](mailto:isupova.e24@mail.ru).
3. Давыдов Вадим Владимирович — доктор физ-мат. наук, профессор; e-mail: [davydov\\_vadim66@mail.ru](mailto:davydov_vadim66@mail.ru).