



УДК 53.081.1

*А.А. Петров, В.В. Давыдов, Д.В. Залетов, В.Е. Шабанов***ЦИФРОВОЙ СИНТЕЗАТОР ЧАСТОТЫ ДЛЯ КВАНТОВОГО СТАНДАРТА  
ЧАСТОТЫ НА АТОМАХ Cs<sup>133</sup>***A.A. Petrov, V.V. Davydov, D.V. Zaletov, V.E. Shabanov***DIGITAL FREQUENCY SYNTHESIZER FOR THE QUANTUM STANDARD  
OF FREQUENCY ON ATOMS OF Cs<sup>133</sup>**

Рассмотрена новая конструкция цифрового синтезатора частоты для квантового стандарта частоты на атомах Cs<sup>133</sup>. Проведенные исследования работы новой конструкции синтезатора показали увеличение точности воспроизведения частоты. Увеличилось разрешение по частоте и фазе, улучшилось значение девиации Аллана. Новая конструкция синтезатора обладает более низким энергопотреблением.

КВАНТОВЫЙ СТАНДАРТ ЧАСТОТЫ; СИНТЕЗАТОР ЧАСТОТЫ; ЦИФРОВОЙ СИНТЕЗ; ГЕНЕРАТОР СИНУСОИДАЛЬНОГО СИГНАЛА; НЕСТАБИЛЬНОСТЬ ЧАСТОТЫ.

The article describes a new design of a digital frequency synthesizer of quantum frequency standard on atoms of Cs<sup>133</sup>. A research of the new synthesizer design showed an increase in the frequency accuracy. Permission on the frequency and a phase increased, improved the value of the Allan deviation. New design of the synthesizer has a lower power consumption.

QUANTUM FREQUENCY STANDARDS; FREQUENCY SYNTHESIZER; DIGITAL SYNTHESIS; SINE-WAVE GENERATOR; FREQUENCY INSTABILITY.

В связи с увеличением тенденции сведения измерения самых разнообразных физических величин к измерению частоты, предъявляются все более жесткие требования к точности, надежности и удобству измерения частоты. Поэтому модернизация действующих и разработка новых устройств измерения частоты являются одними из наиболее актуальных физических и технических задач.

В качестве примеров областей применения точного измерения частоты можно привести службу времени, навигацию, исследования космоса, космические спутники связи. В метрологических и измерительных службах частотные измерения постепенно вытесняют измерения других физических величин. Без надежной работы стандартов частоты невозможно также нормальное функционирование многих сфер деятельности человека, особенно если в них используется вычислительная техника.

В настоящее время квантовые стандарты частоты (КСЧ) являются основными устройствами, обеспечивающими формирование и воспроизведение с высокой точностью физической единицы измерения времени и частоты.

Учитывая большую значимость КСЧ в науке и технике, перед разработчиками квантовых стандартов частоты постоянно ставятся задачи по их модернизации и разработке новых моделей [1, 2]. Все это привело к тому, что после многочисленных модернизаций и усовершенствований одни модели КСЧ полностью вытеснили другие. Так, например, квантовые стандарты частоты на атомах Rb<sup>87</sup> и Cs<sup>133</sup>, имеющие малый объем, вес и низкую потребляемую мощность по сравнению со стандартами на атомах H<sup>2</sup> и Na<sup>23</sup>, вытеснили последние из конструкций различных подвижных носителей, летательных аппаратов и бортовой аппаратуры.

Необходимость в модернизации КСЧ возникает также в связи с изменяющимися требованиями к летательным аппаратам. Процесс модернизации включает в себя различные направления: изменение массы и размеров используемых КСЧ, снижение их энергопотребления, улучшение их метрологических характеристик [3]. Причем часто модернизации подвергается не вся конструкция КСЧ, а отдельные узлы или блоки, в зависимости от задач, стоящих в данный момент перед разработчиками.

В статье представлено одно из направлений модернизации КСЧ на атомах  $Cs^{133}$ : отдельного блока – синтезатора частоты с целью повышения точностных характеристик стандарта и увеличения его функциональных возможностей.

### Цифровой синтезатор частоты

Работа КСЧ на атомах  $Cs^{133}$  основана на принципе подстройки частоты высокостабильного кварцевого генератора (КГ) по частоте квантового перехода атомов цезия  $Cs^{133}$  атомно-лучевой трубки (АЛТ). Струк-

турная схема КСЧ представлена на рис. 1.

На схеме следующие обозначения:

БГУВ – блок генератора и усилителей выхода; ПЧ – преобразователь частоты; СЧ – синтезатор частоты; АЛТ – атомно-лучевая трубка; УС – усилитель; РУ – реле управления; УУ – устройство управления; ИФ – интерфейс; УК – устройство контроля; ПЦА – преобразователь цифро-аналоговый.

Одним из важных функциональных узлов КСЧ является синтезатор частоты (СЧ). Он принимает участие в формировании резонансной частоты квантового перехода атомов цезия. Выходной сигнал блока генератора и усилителей выхода (БГУВ) частотой 5 МГц подается на преобразователь частоты (ПЧ) и СЧ. В СЧ частота входного сигнала 5 МГц преобразуется в частоту 12,631 МГц путем умножения частоты 5 МГц до 15 МГц и вычитания частоты 2,369 МГц. Частоту 2,369 МГц формирует цифровой синтезатор частоты. С выхода СЧ сигнал частоты 12,631 МГц поступает на генератор гармоник (ГГ) преобразова-

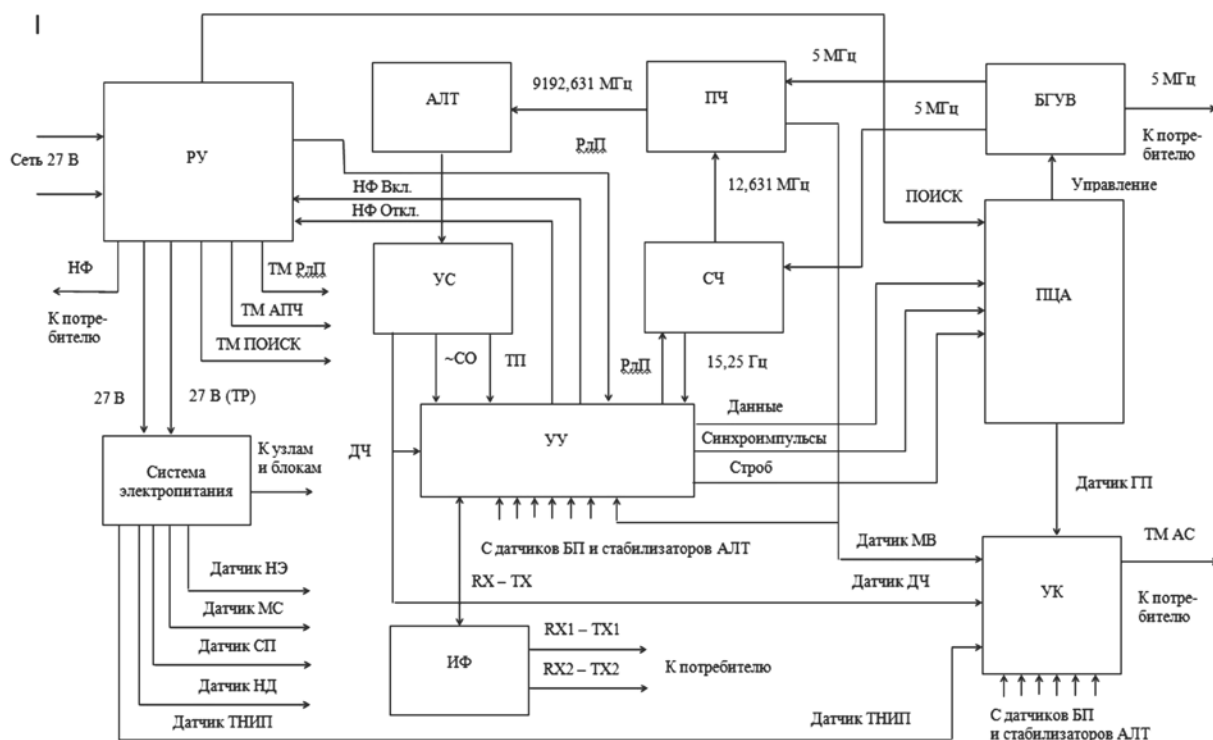


Рис. 1. Структурная схема КСЧ

теля частоты. В преобразователь частоты также поступает частота входного сигнала 5 МГц, которая в нем умножается до частоты 270 МГц, а потом сигнал этой частоты подается на генератор гармоник преобразователя частоты. Генератор гармоник осуществляет умножение сигнала частоты 270 МГц до частоты 9 180 МГц. К этой частоте прибавляется выходная частота синтезатора частоты 12,631 МГц, в результате чего выходной сигнал сверхвысокой частоты (СВЧ) преобразователя частоты представляет частоту 9 192,631 МГц, которая используется в работе КСЧ.

Весьма важным показателем синтезатора частоты является его способность влиять на характеристику нестабильности частоты преобразуемого сигнала, что определяет в некоторой степени достижимую стабильность частоты выходного сигнала КСЧ. Нестабильность частоты, вносимая синтезатором, определяется боковыми дискретными составляющими спектра сигнала, возникающими при делении, умножении, смещении частот сигналов, точностью выходной частоты, а также воздействием на сигнал естественных и технических шумов.

Метод формирования выходного сигнала синтезатора частоты исчерпал возможности по увеличению точности. Необходима большая разрешающая способность, поскольку точность воспроизведения частоты 12,631 МГц напрямую влияет на точность получения резонансной частоты атомного перехода. Кроме того, элементная база, на которой реализуется данный метод, устарела и требует замены. Для того чтобы новая конструкция синтезатора успешно применялась в космических аппаратах, необходимо разработать схему отечественного

производства под существующие космические аппараты с использованием новейшей зарубежной базы.

В статье рассматривается новая конструкция цифрового синтезатора частоты (генератора синусоидального сигнала управляемой частоты). В ней используется метод прямого цифрового синтеза (Direct Digital Synthesis – DDS). Выбор такого решения обусловлен рядом достоинств по сравнению с остальными методами синтеза частоты. Метод прямого цифрового синтеза уникален своей цифровой определенностью: генерируемый им сигнал синтезируется со свойственной цифровым системам точностью. Частота, амплитуда и фаза сигнала в любой момент времени точно известна и подконтрольна. Также к преимуществам данного метода можно отнести высокое разрешение по частоте и фазе, высокую скорость перестройки, цифровой интерфейс, широкий диапазон генерируемых частот.

Разработанная новая схема цифрового синтезатора приведена на рис. 2.

Блок Загрузка данных с помощью периферийного интерфейса передачи данных SPI (Serial Peripheral Interface) осуществляет загрузку кода частоты из микроконтроллера в последовательном режиме (42 разряда), что представлено на рис. 3.

Полученный код частоты поступает в Блок модуляции. Устройство модуляции осуществляет мультиплексирование кода частоты из двух регистров на вход аккумулятора фазы сигналом  $F_m$ , являющимся меандром низкой частоты (15, 30 или 78 Гц). Аккумулятор фазы (Накопительный сумматор) реализован в виде 40-разрядного накапливающего сумматора.



Рис. 2. Структурная схема цифрового синтезатора

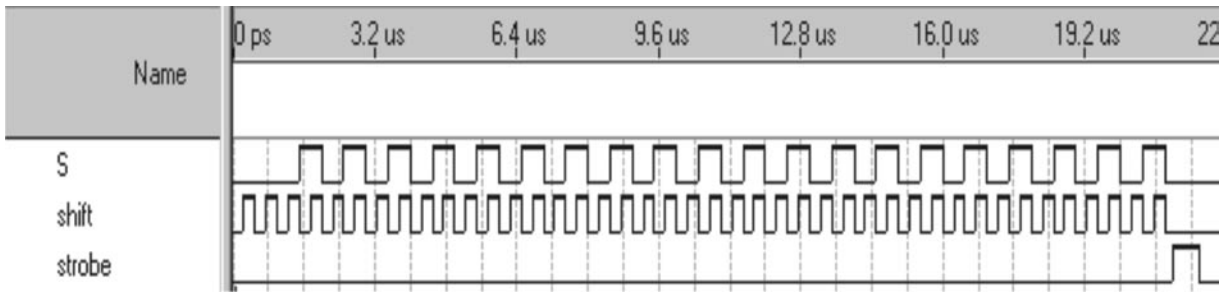


Рис. 3. Временная диаграмма загрузки кода частоты в последовательном режиме

Накопительный сумматор представляет собой 10-ступенчатый конвейер, разбивающий суммирование 40-разрядных слов на суммирование 10 групп по четыре разряда. Аккумулятор фазы работает с периодическими переполнениями, обеспечивая арифметику по модулю  $2^N$ . Такое периодическое переполнение соответствует периодическому поведению функции  $\sin(x)$  с периодом  $2\pi$  [4]. Другими словами, частота переполнений аккумулятора фазы равна частоте выходного сигнала. Эта частота определяется формулой:

$$F_{\text{out}} = \frac{M * F_{\text{clk}}}{2^N}, \quad (1)$$

где  $F_{\text{out}}$  — выходная частота;  $F_{\text{clk}}$  — тактовая частота;  $M$  — код частоты в двоичном виде;  $N$  — разрядность аккумулятора фазы.

В отличие от ранее использовавшихся

схем, где выходная частота формировалась с помощью сигналов переполнения накопительного сумматора, в разработанной схеме принципиально новым является использование логического устройства, в данном случае — дешифратора и цифро-аналогового преобразователя (ЦАП). Накопительный сумматор формирует аргумент функции синус, который поступает на логическое устройство, реализующее функцию синус с помощью таблицы синусов, заложенной в ПЗУ. На выходе этого блока формируется 10-разрядный цифровой код синуса, который далее поступает на ЦАП. В связи с применением 10-ступенчатого конвейера обеспечивается стабильная работа на заданной тактовой частоте 40 МГц. Большая разрядность аккумулятора фазы, а также возможность модуляции обеспечивают высокую точность выходной частоты. В предыдущей

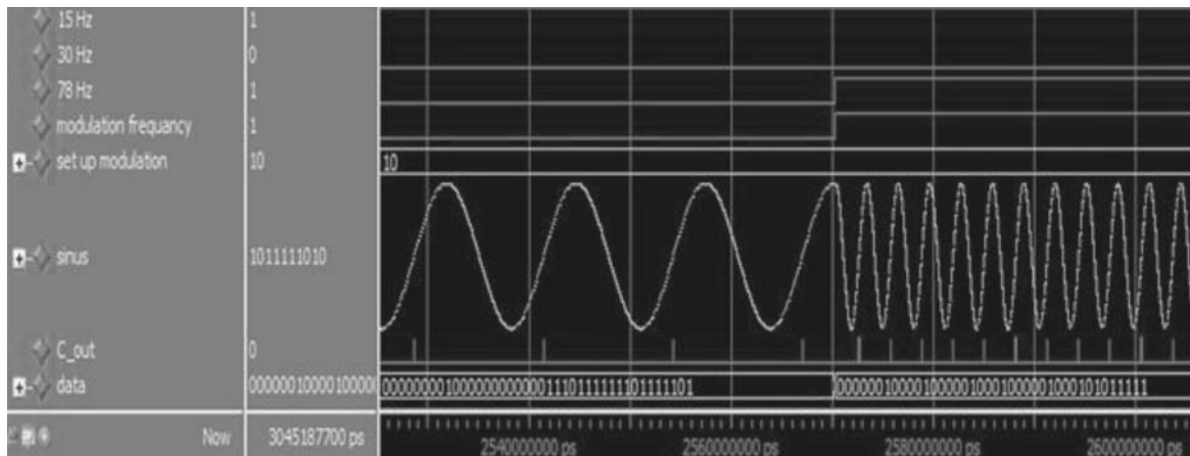


Рис. 4. Результат моделирования работы схемы

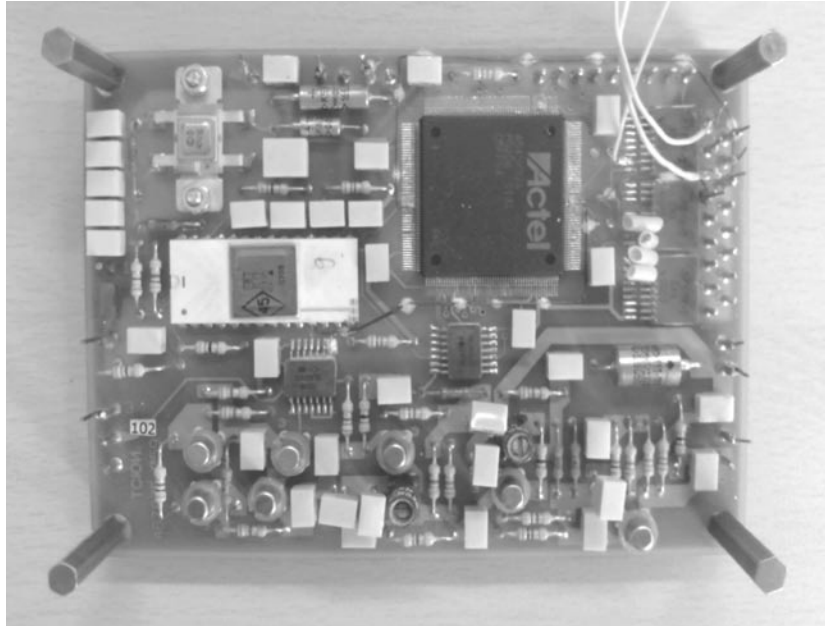


Рис. 5. Плата синтезатора частоты

конструкции синтезатора использовался 32-разрядный сумматор. Увеличение разрядности накопительного сумматора приводит к уменьшению шага перестройки частоты. В разработанной схеме синтезатора частоты при работе на тактовой частоте 40 МГц и разрядности аккумулятора фазы 40 разрядов, шаг перестройки будет составлять

$$\Delta F_{\text{out}} = \frac{F_{\text{clk}}}{2^N} = \frac{40 \text{ МГц}}{2^{40}} = 0,00004 \text{ Гц.} \quad (2)$$

Этот результат превышает значение, которое получалось в ранее используемых схемах синтезаторов для квантовых стандартов частоты, на два порядка.

Моделирование работы схемы разработанного синтезатора осуществлено в про-

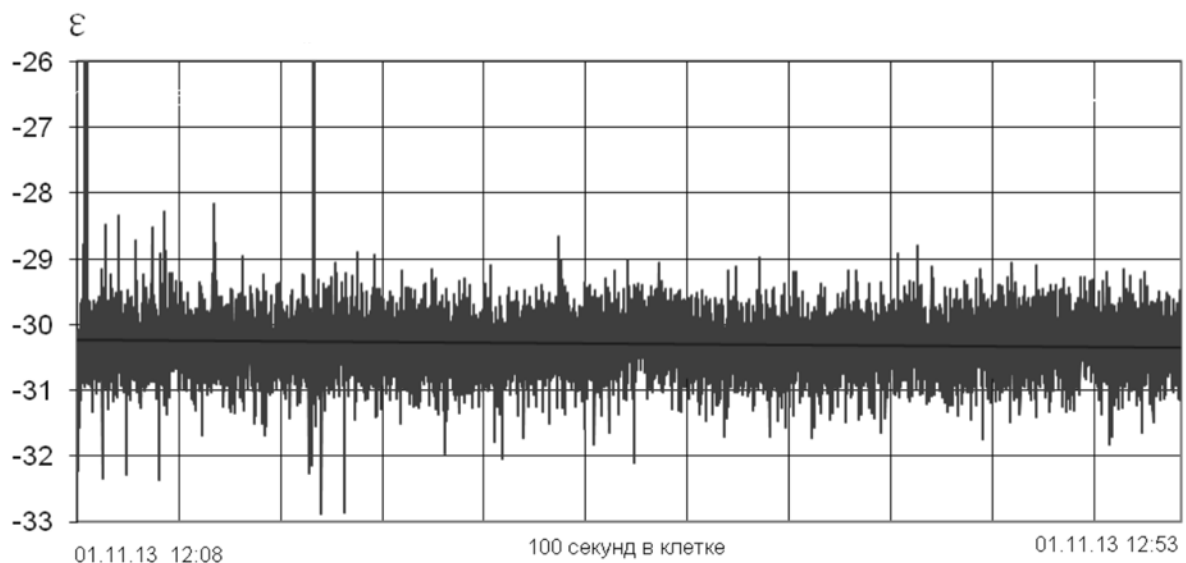


Рис. 6. Результат измерения относительного изменения частоты  $\varepsilon$  от времени с использованием применяемого ранее синтезатора частоты

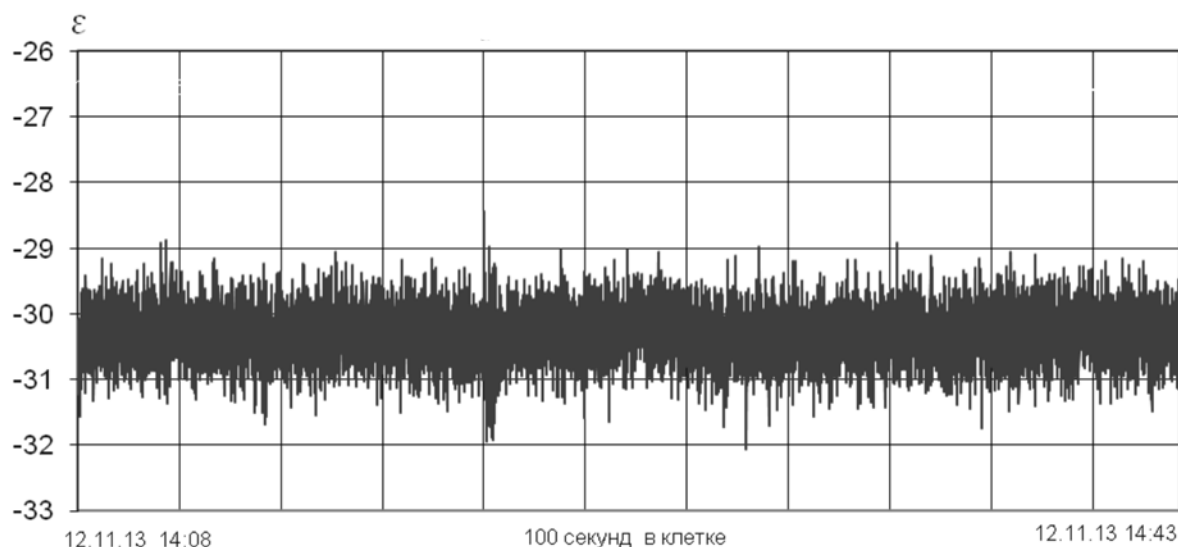


Рис. 7. Результат измерения относительного изменения частоты  $\varepsilon$  от времени с использованием нового цифрового синтезатора частоты

грамме ModelSim, позволяющей учесть особенности работы схемы на поведенческом (логическом) уровне, а также учитывающей внутренние задержки переключения элементов и дополнительные задержки при трассировке соединений элементов. На рис. 4 представлен полученный результат: синусоидальный сигнал, меняющий свою частоту при изменении управляющего сигнала модуляции.

После моделирования работы схемы синтезатора частоты была изготовлена рабочая плата, представленная на рис. 5.

Проверка на работоспособность также показала удовлетворительные результаты, совпадающие с теоретическими расчетами.

Затем плата синтезатора частоты была включена в состав КСЧ, как отдельный блок. Был произведен эксперимент, заключающийся в измерении частоты стандар-

та и последующем вычислении дисперсии Аллана, позволяющей оценить нестабильность частоты.

На рис. 6 и 7 приведены результаты измерения относительного изменения частоты  $\varepsilon$  от времени с использованием применяемого до настоящего времени и разработанного нами цифрового синтезатора частоты, где  $\varepsilon = \frac{f_i - f_{\text{ном}}}{f_{\text{ном}}}$ . Цена деления  $\varepsilon$  составляет  $10^{-12}$ .

Расчет дисперсии Аллана произведен по следующей формуле:

$$\sigma_y = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_{0i}^2}{n-1}, \quad (3)$$

где  $\sigma_{0i} = \frac{f_{i+1} - f_i}{f_{\text{ном}}}$  — относительная  $i$ -я вариация частоты;  $n$  — число вариаций.

Значения дисперсии Аллана для различных КСЧ

	100 с	1000 с	Час	Сутки
С ранее используемым синтезатором	5,91E-13	1,34E-13	6,76E-14	6,06E-14
С разработанным синтезатором	3,88E-13	1,14E-13	6,69E-14	5,94E-14



Результаты величин дисперсии Аллана, полученные при работе КСЧ со старым и новым синтезаторами частоты, приведены в сравнительной таблице.

Из полученных результатов видно, что использование нового синтезатора дает возможность получить улучшение кратковременной стабильности частоты на  $2 \cdot 10^{-13}$ .

По результатам исследований работы новой конструкции синтезатора частоты установлено, что появилась возможность с большей точностью получать различные частоты синусоидального сигнала с выхода синтезатора частоты. Увеличилась точность

воспроизведения частоты: улучшено значение девиации Аллана ( $\sigma_y$ ). По сравнению с предыдущими значениями кратковременная нестабильность улучшилась на  $2 \cdot 10^{-13}$  и теперь составляет  $\sigma_y = 3,9 \cdot 10^{-13}$ . Разрешение по частоте и фазе увеличено более чем на два порядка. Реализована возможность цифрового управления частотой и фазой. Улучшены спектральные характеристики, подавление боковых амплитудных составляющих составило около  $-60$  дБ. Собранная новая конструкция синтезатора частоты обладает более низким энергопотреблением, что очень важно для эксплуатации спутников.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дудкин В.И., Пахомов Л.Н. Квантовая электроника. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. — 496 с.
2. Риле Ф. Стандарты частоты. Принципы и применения. — М.: Физматлит, 2009. — 511 с.
3. Гужва Ю.Г., Геворкян А.Г., Басевич А.Б. и др. Глобальная навигационная спутниковая

система ГЛОНАСС и роль РИРВ в ее создании и совершенствовании // Радионавигация и время. — 1997. — № 1. — С. 64–69.

4. Ридико Л.И. Прямой цифровой синтез частоты // Компоненты и технологии. — 2001. — № 7. — С. 34–38.

#### REFERENCES

1. Dudkin V.I., Pakhomov L.N. Kvantovaya elektronika. — St.-Petersburg: Izd-vo Politekh. un-ta, 2012. — 496 s. (rus)
2. Rile F. Standarty chastoty. Printsipy i primeneniia. — Moscow: Fizmatlit, 2009. — 511 s. (rus)
3. Guzhva Yu.G., Gevorkian A.G., Basevich A.B. i dr. Global'naia navigatsionnaia sputnikovaia

sistema GLONASS i rol' RIRV v ee sozdanii i sovershenstvovanii / Radionavigatsiia i vremia. — 1997. — № 1. — S. 64–69. (rus)

4. Ridiko L.I. Priamoi tsifrovoi sintez chastoty / Komponenty i tekhnologii. — 2001. — № 7. — S. 34–38. (rus)

---

**ПЕТРОВ Александр Анатольевич** — студент 6 курса Института физики, нанотехнологий и телекоммуникаций Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

E-mail: Alexandrpetrov.spb@yandex.ru

**PETROV, Aleksandr A.** St. Petersburg State Polytechnical University.

195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St.-Petersburg, Russia.

E-mail: Alexandrpetrov.spb@yandex.ru

**ДАВЫДОВ Вадим Владимирович** — доцент кафедры квантовой электроники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат физико-математических наук.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

E-mail: davydov\_vadim66@mail.ru

**DAVYDOV, Vadim V.** St. Petersburg State Polytechnical University.

195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St.-Petersburg, Russia.

E-mail: davydov\_vadim66@mail.ru

**ШАБАНОВ Владимир Евгеньевич** — *начальник лаборатории квантовых стандартов частоты Российского института радионавигации и времени.*

191124, Россия, Санкт-Петербург, пл. Растрелли, д. 2.

**SHABANOV, Vladimir E.** *The Russian Institute of Radionavigation and Time.*

191124, pl. Rastrelli 2, St.-Petersburg, Russia.

**ЗАЛЕТОВ Дмитрий Валерьевич** — *ведущий инженер Российского института радионавигации и времени.*

191124, Россия, Санкт-Петербург, пл. Растрелли, д. 2.

**ZALETOV, Dmitry V.** *The Russian Institute of Radionavigation and Time.*

191124, pl. Rastrelli 2, St.-Petersburg, Russia.