

## ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРАХ

УДК 53.082

### ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ СХЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ СИГНАЛА ВОЗБУЖДЕНИЯ СВЕРХВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ В ЦЕЗИЕВЫХ АТОМНЫХ ЧАСАХ

© 2021 г. А. А. Петров<sup>а</sup>, Д. В. Залетов<sup>а</sup>, В. В. Давыдов<sup>б, \*</sup>, Д. В. Шаповалов<sup>с</sup>

<sup>а</sup>Российский институт радионавигации и времени,  
просп. Обуховской Обороны, 120, лит. ЕЦ, Санкт-Петербург, 192012 Российская Федерация

<sup>б</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251 Российская Федерация

<sup>с</sup>АО “Информационные спутниковые системы” им. академика М.Ф. Решетнёва,  
ул. Ленина, 52, Железногорск, 662972 Российская Федерация

\*E-mail: Davydov\_vadim66@mail.ru

Поступила в редакцию 05.03.2020 г.

После доработки 11.06.2020 г.

Принята к публикации 04.07.2020 г.

Определены особенности формирования СВЧ-сигнала возбуждения в квантовом стандарте частоты на атомах цезия-133. Для улучшения характеристик сигнала СВЧ-возбуждения предложен способ оптимизации параметров блоков и схем квантового стандарта частоты с учетом установленных нами особенностей. Проведенные исследования показали, что применение данного способа позволяет улучшить спектральные характеристики сигнала СВЧ-возбуждения и уменьшить шаг перестройки его выходной частоты. Полученные экспериментальные результаты позволили установить, что использование данного способа улучшает стабильность выходной частоты квантового стандарта на 20%. Установленные нами особенности создают условия для проведения новых исследований, направленных на разработку способов и методик улучшения характеристик сигнала СВЧ-возбуждения.

DOI: 10.31857/S0033849421030177

#### ВВЕДЕНИЕ

В современном мире в условиях быстрого развития мировой науки, технологий и средств передачи информации невозможно обойтись без измерения времени с высокой точностью [1–5]. При передаче информации, при проведении научных исследований в различных точках планеты (например, планет Солнечной системы и т.д.), а также для определения положения различных объектов с использованием навигационных систем необходима взаимная синхронизация временных шкал приборов. Наибольшей точностью и надежностью среди источников опорных колебаний, используемых для измерения времени, обладают квантовые стандарты частоты (КСЧ) [1, 2, 6–9].

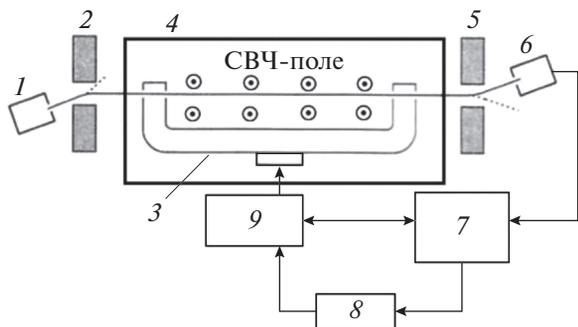
Среди всех моделей КСЧ особое место занимают цезиевые. Это обусловлено тем, что они обладают высокой долговременной стабильностью частоты выходного сигнала на уровне  $(1...3) \times 10^{-14}$  при времени наблюдения 1 сут. Это позволяет успешно применять их также для решения задач фундаментальной науки (продолжительные по вре-

мени физические эксперименты в атомной физике и геофизике, прецизионная спектроскопия) и т.д. [6, 10–15]. Повышение требований к точности синхронизации временных шкал и изменению массогабаритных характеристик КСЧ требует постоянной модернизации их конструкций.

Разработка новых моделей КСЧ на основе фундаментальных научных исследований очень длительный и дорогостоящий процесс, требующий объединения усилий многих научных групп. Такого запаса времени и средств для решения поставленных задач обычно нет.

Поэтому процесс модернизации КСЧ в основном заключается в улучшении характеристик одного или нескольких блоков КСЧ, что в свою очередь позволяет улучшить метрологические характеристики конструкции квантового стандарта частоты.

Одно из возможных решений задачи модернизации КСЧ на атомах цезия-133 представлено в данной работе. На основе проведенных исследований были установлены особенности формиро-



**Рис. 1.** Структурная схема стандарта частоты на атомах  $^{133}\text{Cs}$ : 1 – цезиевая печь; 2 – магнит-поляризатор; 3 – резонатор Рэмси; 4 – магнитный экран; 5 – магнит-анализатор; 6 – токовый детектор; 7 – блок автоматической подстройки частоты; 8 – кварцевый генератор; 9 – преобразователь частоты.

вания сигнала СВЧ-возбуждения и предложен способ улучшения его характеристик.

## 1. КВАНТОВЫЙ СТАНДАРТ ЧАСТОТЫ НА АТОМАХ ЦЕЗИЯ-133 И ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СИГНАЛА СВЧ-ВОЗБУЖДЕНИЯ

Работа КСЧ на атомах цезия-133 основана на принципе подстройки частоты высокостабильного кварцевого генератора по частоте квантового перехода атомов цезия-133 в атомно-лучевой трубке (АЛТ). Структурная схема КСЧ на атомах цезия-133 представлена на рис. 1.

Разогретый пучок атомов цезия-133 из специализированной пелки 1, с помощью магнит-поляризатора 2 подготавливается таким образом, что перед взаимодействием с СВЧ-полем атомы цезия-133 находятся либо на уровне  $F = 4$ ,  $m_f = 0$ , либо на уровне  $F = 3$ ,  $m_f = 0$ . СВЧ-поле формируется в блоке преобразователя частоты 9 из сигнала кварцевого генератора 8 и по волноводному тракту подается в АЛТ 4. Это поле вызывает переходы атомов на соответствующий незаселенный уровень. Измеряя населенность этого уровня после взаимодействия с СВЧ-полем, можно определить частоту опрашиваемого поля, при которой вероятность перехода атомов оказывается максимальной. Отношение сигнал/шум (ОСШ), регистрируемого резонансного сигнала от пучка атомов цезия-133 на токовом детекторе 6 в этом случае будет максимальным. Полученный сигнал обрабатывается системой автоматической подстройки частоты (АПЧ) и используется для того, чтобы изменить управляющие напряжение на кварцевом генераторе 8 пропорционально уходу частоты от номинального значения.

Данная частота корректируется с учетом эффектов, приводящих к сдвигам частоты центрально-

го резонанса. Основной вклад в сдвиг частоты центрального резонанса вносят флуктуации магнитного поля, а также параметры сигнала СВЧ-возбуждения [6, 14–16]. Поэтому к процессу формирования сигнала СВЧ, который подается в АЛТ из преобразователя частоты по волноводному тракту, необходимо уделять повышенное внимание при модернизации конструкции КСЧ. Кроме того, при формировании сигнала СВЧ-возбуждения и его последующем использовании возникает ряд особенностей, которые необходимо установить, чтобы модернизировать конструкцию преобразователя частоты для улучшения характеристик КСЧ.

Одна из них связана с формированием частоты сигнала СВЧ-возбуждения и сканированием линии резонансного перехода с частотой  $f_0$ , что приводит к появлению сигнала на токовом детекторе 6 (см. рис. 1). Спектральная линия регистрируемого в этом случае сигнала состоит из интерференционных полос резонанса Рэмси на широком пьедестале Раби [6, 9, 16]. Расстояние между интерференционными полосами, которые соответствуют резонансным переходам атомов цезия-133, составляет  $\approx 50$  кГц. Таких полос с учетом центрального максимума – семь. Частота кварцевого генератора стабилизируется относительно максимума центральной полосы (центральный переход), что соответствует частоте  $f_0$ . При расстройке частоты кварцевого генератора и, следовательно, частоты сигнала СВЧ-возбуждения от значения  $f_0$  в АЛТ вырабатывается сигнал ошибки, который несет информацию о величине расстройки. В этом случае точность настройки на резонансную частоту  $f_0$  будет зависеть от шага перестройки частоты  $\Delta f_{\text{СВЧ}}$  сигнала СВЧ-возбуждения. С учетом этой особенности нами был предложен новый способ формирования сигнала СВЧ-возбуждения в преобразователе частоты, который позволяет существенно уменьшить величину  $\Delta f_{\text{СВЧ}}$  по сравнению с ранее используемыми конструкциями КСЧ. На рис. 2 представлена структурная схема разработанной нами конструкции преобразователя частоты.

Синусоидальный сигнал с частотой 5 МГц от кварцевого генератора 1 подается на синтезатор частоты 2 и умножитель частоты 3, входящие в состав преобразователя частоты. В синтезаторе частоты выполняется преобразование входного сигнала с частотой 5 МГц в сигнал с частотой 12.6317727 МГц. В умножителе частоты выполняется преобразование входного сигнала с частотой 5 МГц в сигнал с частотой 270 МГц, который далее умножается на генераторе гармоник 4 до частоты 9180 МГц и, так же как и сигнал с выхода синтезатора частоты, поступает на вход баланс-

ного смесителя 5. Работу балансового смесителя можно описать следующим уравнением:

$$U_{\text{вых}} = \cos\omega_1 t \cos\omega_2 t = \frac{1}{2} \cos(\omega_1 - \omega_2)t + \frac{1}{2} \cos(\omega_1 + \omega_2)t, \quad (2)$$

где  $\cos\omega_1 t$  – колебание с выхода синтезатора частоты,  $\cos\omega_2 t$  – колебание с выхода умножителя частоты,  $\cos(\omega_1 - \omega_2)t$  – разностная частота,  $\cos(\omega_1 + \omega_2)t$  – суммарная частота.

В результате выходной сигнал сверхвысокой частоты балансового смесителя содержит ряд комбинационных частот, в том числе частоту 9.1926317727 ГГц, которая используется в работе КСЧ.

Необходимо отметить, что в спектре выходного сигнала балансового смесителя содержатся не только две указанные выше частотные составляющие, но и множество гармоник, возникающих в результате преобразования сигнала с частотой 5 МГц в умножителе частоты. Боковые составляющие, возникающие в умножителе частоты, отстоят от основного сигнала на величины, кратные выходной частоте кварцевого генератора. Эта величина достаточно велика и превосходит все частотные интервалы от центрального резонанса, на которых находятся боковые резонансы Рэмси. Поэтому погрешностями в определении номинального значения частоты КСЧ, создаваемые этими боковыми составляющими, можно пренебречь.

Характеристики выходного сигнала преобразователя частоты, такие как точность формирования выходной частоты, шаг перестройки частоты, скорость перестройки частоты, распределение спектра, обеспечиваются цифровой частью преобразователя частоты. Аналоговая часть обеспечивает главным образом стабильность амплитуды выходного сигнала при изменении температуры в диапазоне 0...50°C. Благодаря применению усилителя-ограничителя в схеме преобразователя частоты стабильность амплитуды выходного сигнала поддерживается с точностью  $\pm 4\%$ .

На точность настройки сигнала СВЧ-возбуждения на резонансную частоту  $f_0$  влияет шаг перестройки дробной частоты  $f_1 = 12631772.7$  Гц –  $\Delta f_{\text{СЧ}}$ , которая формируется в синтезаторе частоты 2 (см. рис. 2). В разработанной нами конструкции синтезатора частоты [8, 16] с использованием метода цифрового синтеза при тактовой частоте  $f_T = 15$  МГц было получено значение  $\Delta f_{\text{СЧ}} \approx 10^{-5}$  Гц. Это дает возможность с высокой точностью подстроить частоту сигнала СВЧ-возбуждения на частоту центрального резонанса  $f_0$  (максимум ОСШ в токовом детекторе б).

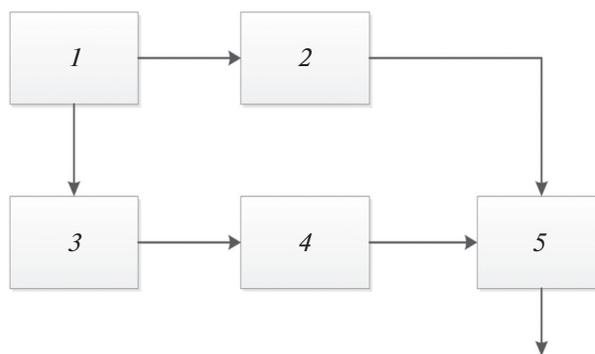


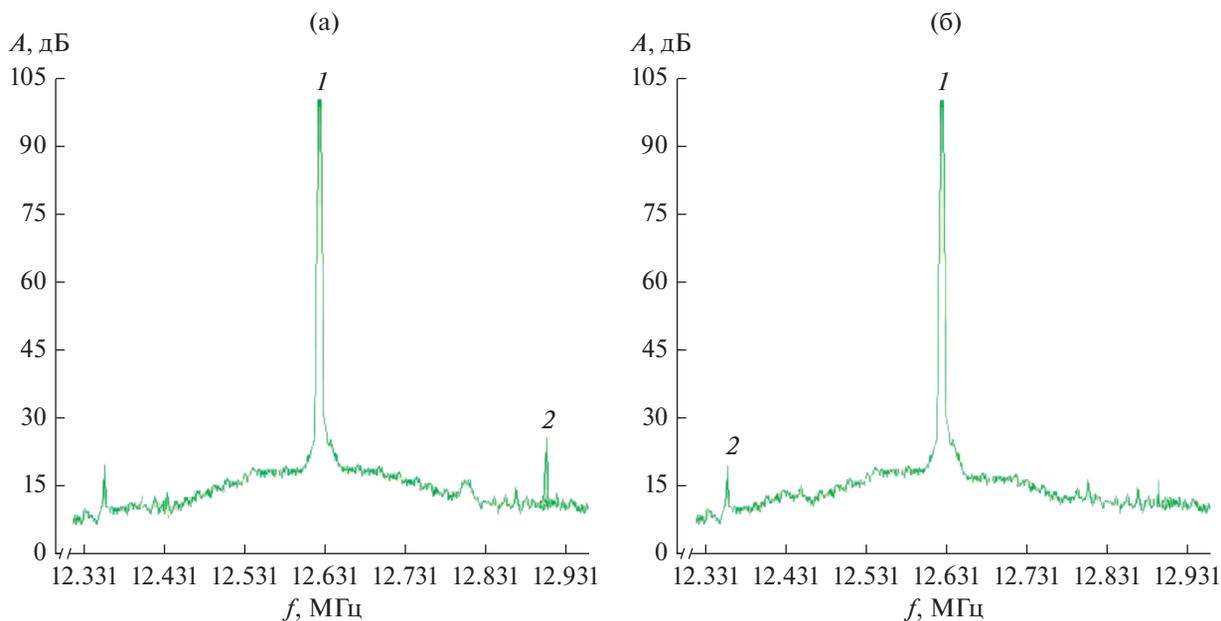
Рис. 2. Структурная схема преобразователя частоты: 1 – кварцевый генератор; 2 – синтезатор частоты; 3 – умножитель частоты; 4 – генератор гармоник; 5 – балансный смеситель.

Другая особенность связана с возможностью выбора различных частот модуляции выходного сигнала для работы системы автоматической подстройки частоты КСЧ. Это позволяет обеспечить компромисс при выполнении двух условий. С одной стороны, при выборе низкой частоты модуляции  $f_m$  возрастают пропорционально  $1/f_m$  фликкерные шумы дискриминатора, с другой стороны, выбор более низкой частоты модуляции обеспечивает лучшую точность измерения значения сигнала ошибки при подстройке на резонанс.

Кроме того, использование нами нового способа позволило исключить из состава КСЧ кварцевый фильтр (КФ). Кварцевый фильтр является наиболее температурно-чувствительным элементом в схеме преобразователя частоты, поскольку обладает большой добротностью, порядка 4000. Это приводит к тому, что даже при небольшом смещении рабочих точек других температурно-зависимых элементов при изменении температуры в диапазоне 0...50°C происходит заметное изменение параметров выходного сигнала ввиду узкой полосы пропускания кварцевого фильтра.

Температурный коэффициент частоты КСЧ определяется как изменение номинального значения частоты выходного сигнала КСЧ при изменении температуры на 1°C. Так как преобразователь частоты является основным узлом, принимающим участие в формировании частоты СВЧ-перехода, то низкая температурная зависимость изменения частоты и амплитуды выходного сигнала ПЧ наилучшим образом уменьшает температурную зависимость КСЧ в целом. Любые изменения частоты и амплитуды выходного сигнала преобразователя частоты при изменении температуры ухудшают значение температурного коэффициента частоты КСЧ.

Устранение кварцевого фильтра из новой конструкции преобразователя частоты в КСЧ сделало его конструкцию менее зависимой от температуры и позволило улучшить температурный коэффи-



**Рис. 3.** Спектральные характеристики сигнала дробной частоты на выходе синтезатора частот с подавлением боковых амплитудных составляющих для ранее используемой (а) и разработанной нами (б) конструкции ПЧ; 1 и 2 — максимумы амплитуд полезного сигнала и боковых составляющих соответственно.

циент частоты КСЧ. Также устранение кварцевого фильтра позволило расширить диапазон перестройки частоты сигнала СВЧ-возбуждения до 0.7 МГц. В ранее используемых конструкциях КСЧ данный диапазон был менее 3 кГц.

Кроме того, применение нового метода формирования выходного сигнала в новой конструкции преобразователя частоты позволяет более эффективно подавлять боковые составляющие в спектре сигнала СВЧ-возбуждения, которые могут вызвать переходы атомов на боковых резонансах Рэмси.

Необходимо также отметить, что размеры новой конструкции преобразователя частоты по сравнению с ранее используемой не изменяются. В новой конструкции преобразователя частоты после использования разработанных нами схем освобождается дополнительное место, которое можно будет использовать для размещения новых элементов при дальнейшей модернизации конструкции КСЧ.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные нами экспериментальные исследования параметров выходного сигнала СВЧ-возбуждения при использовании новой конструкции преобразователя частоты (ПЧ) совпали с результатами моделирования, а также пока-

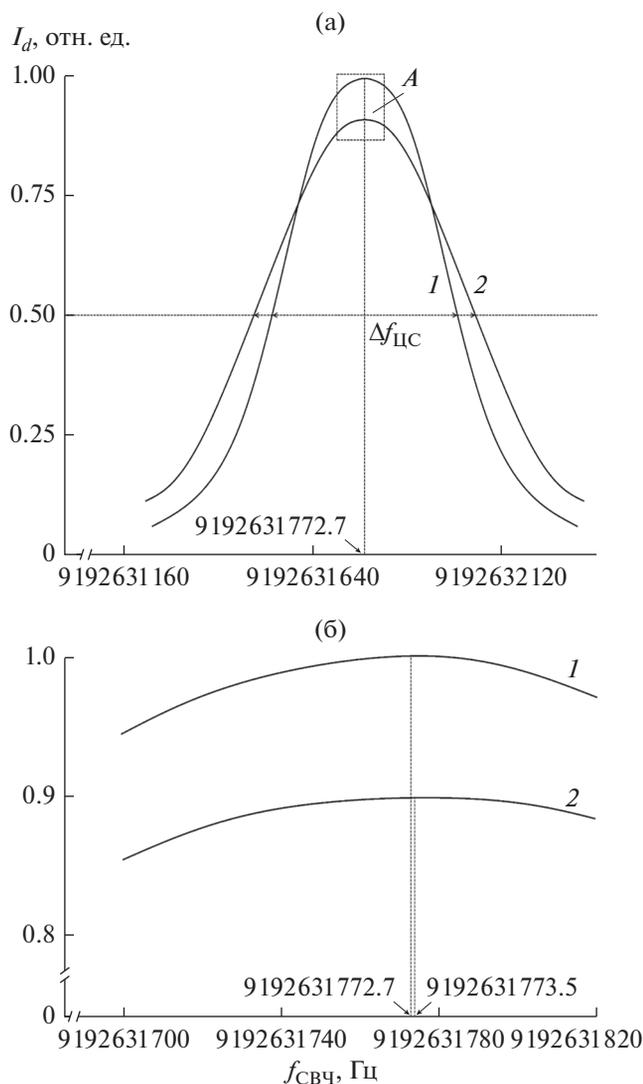
зали ее преимущества по сравнению с ранее используемыми ПЧ.

На рис. 3 представлена часть спектра сигнала СВЧ-возбуждения, за формирование которой отвечает спектр сигнала частотой 12631772.7 Гц. В окрестности частоты 12631772.7 Гц содержатся боковые составляющие (рис. 3а). Ранее [5–7, 16] было обосновано, что только эти близлежащие составляющие могут вызвать дополнительное излучение на боковых резонансных частотах линии Рэмси.

Полученные экспериментальные результаты показывают, что подавление боковых амплитудных составляющих в спектре сигнала с частотой 12631772.7 Гц в новой конструкции преобразователя частоты составило 88 дБ в полосе регистрации 600 кГц. При таком подавлении уровень боковых составляющих не оказывает существенного влияния на точность измерения резонансной частоты  $f_0$ .

Использование новой конструкции преобразователя частоты позволяет в отличие от ранее применяемой осуществлять подстройку величины магнитного поля внутри АЛТ по соседнему резонансному переходу [1, 16]. Эта подстройка позволяет компенсировать частотный сдвиг, который ухудшает долговременную стабильность частоты КСЧ.

На рис. 4 представлено изменение амплитуды тока  $I_d$  в токовом детекторе при сканировании ча-



**Рис. 4.** Зависимость изменения амплитуды  $I_d$  в токовом детекторе  $b$  от частоты сигнала СВЧ-возбуждения  $f_{\text{СВЧ}}$  (а) и увеличенный фрагмент А (б): 1 – регистрация сигнала в токовом детекторе при использовании подстройки магнитного поля в АЛТ, 2 – без использования подстройки поля; ЦС – центральный сигнал.

стоты сигнала СВЧ-возбуждения  $f_{\text{СВЧ}}$  в окрестности резонансной частоты  $f_0$  (спектральная линия) при подстройке магнитного поля по соседнему резонансу и без нее.

Анализ полученных результатов (см. рис. 4) показывает, что разработанная нами подстройка магнитного поля компенсирует случайное изменение величины магнитного поля и поддерживает его на изначально заданном уровне, препятствуя смещению резонансной линии по частоте. Смещение резонансной частоты атомного пере-

хода, вызванное флуктуацией магнитного поля, при таком масштабе на рис. 4а не наблюдается, поэтому на рис. 4б представлен фрагмент А. Это позволило установить наличие смещения частоты  $f_0$  на 0.8 Гц. Изменилось также значение ширины спектральной линии  $\Delta f_{\text{ЦС}}$  центрального резонанса (см. рис. 4а).

Необходимо отметить, что смещения частоты  $f_0$  совпадает с расчетным, вычисленным с помощью формулы Брайта–Раби [1, 16]. Такой непрогнозируемый уход частоты  $f_0$  создает дополнительные погрешности в определении действительного значения выходной частоты КСЧ, что приводит к ухудшению долговременной стабильности частоты КСЧ на длительных временах наблюдения. Использование разработанной нами дополнительной подстройки магнитного поля в комбинации с основной по центральному максимуму резонанса позволяет поддерживать заданное значение поля внутри АЛТ постоянным и компенсировать измененный нами частотный сдвиг (см. рис. 4б).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты исследований показали обоснованность учета установленных нами особенностей формирования сигнала СВЧ-возбуждения при модернизации конструкции преобразователя частоты для КСЧ на атомах цезия-133.

Установлено, что новая конструкция ПЧ в КСЧ, а также система стабилизации магнитного поля позволяют улучшить: температурный коэффициент частоты КСЧ в 2.9 раза и дисперсию Аллана выходного сигнала КСЧ более чем на 20% на временах наблюдения 1 сутки по сравнению с ранее используемыми конструкциями.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Petrov A.A., Davydov V.V., Grebenikova N.M. // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). 2018. V. 11118 LNCS. P. 641.
2. Павельев А.Г., Матюгов С.С., Яковлев А.И. // РЭ. 2008. Т. 53. № 9. С. 1081.
3. Горгадзе С.Ф., Бойков В.В. // РЭ. 2014. Т. 59. № 3. С. 264.
4. Пахомов А.А. // РЭ. 2007. Т. 52. № 10. С. 1209.
5. Petrov A.A., Grebenikova N.M., Lukashev N.A. et al. // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. V. 1038. № 1. P. 012032.
6. Риле Ф. Стандарты частоты. Принципы и применения. М.: Физматлит, 2009.
7. Петров А.А., Давыдов В.В. // РЭ. 2017. Т. 62. №. 3. С. 300.
8. Petrov A.A., Vologdin V.A., Davydov V.V., Zalyotov D.V. // J. Phys.: Conf. Ser. 2015. V. 643. № 1. P. 012087.

9. Барышев В.Н., Купалов Д.С., Новоселов А.В. и др. // Измерит. техника. 2016. № 12. С. 33.
10. Соколов С.В., Каменский В.В., Ковалев С.М., Тищенко Е.Н. // Измерит. техника. 2017. № 1. С. 19.
11. Petrov A.A., Davydov V.V. // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. V. 769. № 1. P. 012065.
12. Petrov A.A., Davydov V.V. // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). 2015. V. 9247. P. 739.
13. Petrov A.A., Davydov V.V., Myazin N.S., Kaganovskiy V.E. // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). 2017. V. 10531. P. 561.
14. Karaulanov T.S., Graf M.T., English D.P. et al. // Phys. Rev. A. 2009. V. 79. № 1. P. 012902.
15. Semenov V.V., Nikiforov N.F., Ermak S.V., Davydov V.V. // Soviet J. Commun. Technol. Electronics. 1991. V. 36. № 4. P. 59.
16. Петров А.А., Давыдов В.В., Гребеникова Н.М. // РЭ. 2018. Т. 63. № 11. С. 1159.