

МАЛОГАБАРИТНЫЙ АКТИВНЫЙ ВОДОРОДНЫЙ СТАНДАРТ ЧАСТОТЫ

В.П. Сысоев, Ю.С. Самохвалов, В.И. Васильев, В.П. Нагирный,
Н.И. Нестеров, Д.А. Парёхин, С.Н. Овчинников

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Россия,
sysoev@vniiftri.ru

Аннотация. Представлены результаты разработки водородного стандарта частоты на основе активного водородного генератора с сапфировой накопительной колбой, позволяющей существенно уменьшить размеры резонатора и всего прибора. Рассмотрены вопросы обеспечения высокой стабильности частоты стандарта с помощью новой системы автоматической настройки резонатора.

Ключевые слова: квантовый водородный генератор, перевозимые часы водородные, СВЧ-резонатор.

COMPACT ACTIVE HYDROGEN FREQUENCY STANDARD

V.P. Sysoev, Yu.S. Samokhvalov, V.I. Vasiliev, V.P. Nagirny,
N.I. Nesterov, D.A. Paryokhin, S.N. Ovchinnikov

FSUE “VNIIFTRI”, Mendeleevo, Moscow region, Russia,
sysoev@vniiftri.ru

Abstract. The results of development of hydrogen frequency standard on the basis of active hydrogen maser with sapphire storage bulb and allowing significantly to reduce the size of the cavity and the hydrogen standard are presented. The issues of ensuring high stability of the standard frequency with the new automatic cavity control system are considered.

Keywords: hydrogen maser, transported quantum hydrogen clock, microwave cavity.

Перевозимые квантовые часы водородные (ПКЧВ) как активного, так и пассивного типа в настоящее время являются одними из наиболее точных мобильных стандартов частоты и времени. Основой ПКЧВ является водородный стандарт частоты (ВСЧ), к характеристикам которого предъявляются не только метрологические, но и массогабаритные требования.

В ПКЧВ, разработанных во ВНИИФТРИ, уменьшение размеров ВСЧ осуществляется за счёт уменьшения размеров водородного генератора (ВГ), габариты которого определяются размерами используемого СВЧ-резонатора. Уменьшение размеров резонатора ВГ выполняется за счёт размещения внутри него толстостенной накопительной колбы из лейкосапфира, материала с высокой диэлектрической проницаемостью ($\epsilon = 9,8$) и малыми потерями на СВЧ ($\text{tg } \delta < 10^{-5}$). Электромагнитное поле концентрируется в боковых стенках колбы, что позволяет уменьшить размеры резонатора, а малые потери в лейко-сапфире и удаление колбы от боковых стенок резонатора дают возможность получить высокую добротность резонатора. Это позволяет ВГ работать в активном режиме при существенно меньших габаритных размерах и массе [1].

Резонатор ВГ выполнен из титана диаметром и высотой 170 мм, внутренняя поверхность покрыта серебром. Колба имеет наружный диаметр 92 мм, внутренний — 80 мм, объём — 0,65 л. Внутренняя поверхность колбы покрывается фторопластом Ф-10, предохраняющим атомы водорода от изменения квантового состояния при столкновении со стенками. Собственная добротность резонатора с лейкосапфировой колбой составляет около $5 \cdot 10^4$.

Большим преимуществом применения лейкосапфировой накопительной колбы в транспортируемых стандартах частоты является конструктивная возможность её жёсткого закрепления между торцевыми стенками резонатора, что делает узел «накопительная колба — резонатор» механически прочным и позволяет сделать ВГ малочувствительным к механическим воздействиям и вибрациям.

Вакуумная камера ВГ для уменьшения веса сделана из титана. Откачка отработанного водорода выполняется двумя геттерными насосами цилиндрической формы, которые приварены к боковым поверхностям вакуумной камеры. Геттером (поглотителем водорода) является набор шайб из прессованного титанового порошка, установленных внутри геттерных насосов на титановой трубке, через которую осуществляется отжиг геттера при запуске ВГ, а также крепление вакуумной камеры к основанию ВГ при эксплуатации [2, 3]. В центре вакуумной камеры установлена 4-полюсная магнитная сортирующая система, эффективность которой увеличена за счёт использования самарий-cobальтовых магнитов и возможности улучшения фокусировки активных атомов водорода на входном отверстии накопительной колбы путём подбора размеров зазоров между полюсными наконечниками сортирующего магнита [4]. Это позволяет существенно увеличить долю активных рабочих атомов водорода в колбе и повысить мощность генерации ВГ. Источник атомов водорода изготовлен из кварцевого стекла и припаян свинцом к титановому фланцу узла источника, образуя высоко герметичное соединение, выдерживающее нагревание до +300 °C.

Такая конструкция вакуумной камеры позволяет существенно улучшить технологию отжига геттерных насосов при вакуумировании и запуске ВГ и обходиться без использования водяных охладителей.

В резонаторной части ВГ съём сигнала генерации осуществляется с помощью активной петли связи [5]. Непосредственно на петле смонтирован малошумящий усилитель СВЧ, что позволяет минимизировать коэффициент шума приёмного тракта. Также, вследствие особенностей конструкции петли, за счёт слабой положительной обратной связи СВЧ-усилителя с электромагнитным полем резонатора происходит компенсация потерь в резонаторе (регенерация), повышающая его нагруженную добротность в 1,5 раза, что также приводит к увеличению мощности генерации ВГ.

Новые конструктивные решения, использованные в малогабаритном водородном генераторе, существенно увеличили отношение «сигнал / шум» приёмного тракта, что позволило уменьшить относительную нестабильность выходной частоты ВСЧ до $2 \cdot 10^{-13}$ на интервалах времени 1 с.

Для уменьшения влияния магнитного поля (МП) на частоту спектральной линии ВГ резонатор окружён четырьмя магнитными экранами, обеспечивающими коэффициент экранирования около $2 \cdot 10^5$. Однако для обеспечения заданной магнитной чувствительности не более $1 \cdot 10^{-15} \text{ Гц}^{-1}$ при поле подмагничивания, соответствующем частоте Зеемана 330 Гц, требуется увеличить коэффициент экранирования до $1 \cdot 10^6$. В малогабаритном ВГ такой коэффициент экранирования реализован с помощью системы автоматической стабилизации МП [6].

Система стабилизации МП выполнена на основе микросхемы одноосного магниторезистивного датчика, который установлен между четвёртым и третьим экранами на торцевой крышке вакуумного колпака. Вакуумный колпак, изготовленный из титана, также расположен между третьим и четвёртым экранами. Он обеспечивает вакуумирование узла «накопительная колба — резонатор». Магнитное поле между экранами создаётся с помощью обмотки, расположенной на цилиндрической части вакуумного колпака. При изменении внешнего МП следящая система регулирует ток через обмотку так, чтобы суммарная продольная составляющая магнитного поля между третьим и четвёртым экранами оставалась неизменной. Это существенно уменьшает степень влияния внешнего магнитного поля на внутреннее поле и, соответственно, на частоту ВГ без применения дополнительного магнитного экрана.

Наиболее сильным дестабилизирующим фактором, влияющим на частоту ВГ, является эффект затягивания частоты спектральной линии резонатором (резонаторный сдвиг). Поэтому обеспечение постоянства частоты настройки резонатора в условиях воздействия возмущающих факторов (температура, механические воздействия, старение) является первоочередной задачей, которая решается с помощью системы автоматической настройки резонатора (АНР.). Так как резонатор ВГ с лейкосапфировой накопительной колбой из-за значительной зависимости диэлектрической проницаемости лейкосапфира от температуры имеет достаточно большой температурный коэффициент частоты ($\text{ТКЧ} \approx 4,5 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$), то разработке системы АНР уделяется особое внимание, так как она является ключевым элементом обеспечивающим, получение высоких метрологических характеристик ВСЧ.

В современных ВСЧ применяются автономные системы АНР, не требующие для своей работы внешнего высокостабильного сигнала. Они используют амплитудный критерий настройки, принцип работы которого заключается в том, что при частотной манипуляции (ЧМ) частоты резонатора ВГ или специального вводимого в резонатор зондирующего сигнала (ЗС) в сигнале генерации или в сигнале ЗС появляется амплитудная модуляция (АМ), по величине и фазе которой можно судить о степени и знаке расстройки резонатора. При точной настройке резонатора на частоту зондирующего сигнала, АМ отсутствует. Используя амплитудный критерий настройки, следящая система АНР вырабатывает сигнал управления и с помощью варикапа стабилизирует частоту резонатора.

Однако в этих системах АНР, вследствие нелинейных преобразований сигналов при формировании ЗС и при его обработке после похождения через резонатор, возникают помехи, влияющие на частоту генерации ВГ. К ним относится широкий спектр гармонических составляющих кратных частоте модуляции ЗС, переходные процессы в моменты переключения частоты модуляции, а также помехи, вызванные синхронным детектированием сигнала АНР. Эти процессы ограничивают допустимую мощность ЗС и отношение «сигнал / шум». Потенциальная точность поддержания частоты резонатора системой АНР, соответственно, и стабильность частоты ВСЧ, определяются отношением «сигнал / шум» сигнала АНР, по которому за ограниченное время, определяемое постоянной времени системы, вырабатывается сигнал управления частотой резонатора.

В рассматриваемом ВСЧ применена новая система АНР, использующая линейные преобразования как при формировании зондирующего сигнала без ЧМ, так и при обработке прошедшего через резонатор сигнала, и реализуемые с помощью быстродействующей вычислительной техники. При этом вблизи сигнала ВГ не образуются паразитные сигналы и помехи, влияющие на частоту генерации. Это позволяет увеличить допустимую мощность ЗС и увеличить отношение «сигнал / шум», что даёт возможность повысить точность стабилизации частоты резонатора ВГ и стабильность частоты ВСЧ [7].

Функциональная схема такой системы АНР приведена на рис. 1. Зондирующий сигнал формируется от выходного сигнала стандарта 100 МГц с помощью двух цифровых синтезаторов СЧ1 и СЧ2, вырабатывающих последовательности кодов сигналов одинаковой амплитуды с частотами $f + \Delta F$ и $f - \Delta F$ (где ΔF — полуширина полосы пропускания резонатора), которые затем складываются в сумматоре кодов и подаются на вход первого цифроаналогового преобразователя (ЦАП1). Из этого сигнала ЦАП1 вырабатывает аналоговый сигнал, состоящий из двух гармонических составляющих одинаковой амплитуды. Причём значения частот и равенство их амплитуд не зависят от времени, параметров внешней среды и напряжения питания, так как они сформированы из стабильного выходного сигнала стандарта частоты прямым цифровым синтезом с помощью одного и того же ЦАП. Далее этот сигнал переносится на заданную частоту резонатора ВГ с помощью частоты $f_{\text{КГ}}$ вспомогательного кварцевого генератора (КГ), привязанного системой фазовой автоматической подстройки частоты (ФАПЧ) к частоте выходного сигнала стандарта 100 МГц. Сигналы вспомогательного КГ и ЗС суммируются и подаются на смесительную петлю связи W3 резонатора. С помощью смесительного диода, установленного непосредственно на петле, образуются, а затем выделяются резонатором требуемые комбинационные составляющие сигнала АНР. Частоты сигналов $f_{\text{КГ}}$ и f подбираются таким образом, чтобы выполнялось условие:

$$n \cdot f_{\text{КГ}} \pm f = f_{\text{рез}} \approx f_0, \quad (1)$$

где n — номер гармоники частоты вспомогательного кварцевого генератора; $f_{\text{рез}}$ — частота настройки резонатора ВГ; f_0 — частота генерации ВГ.

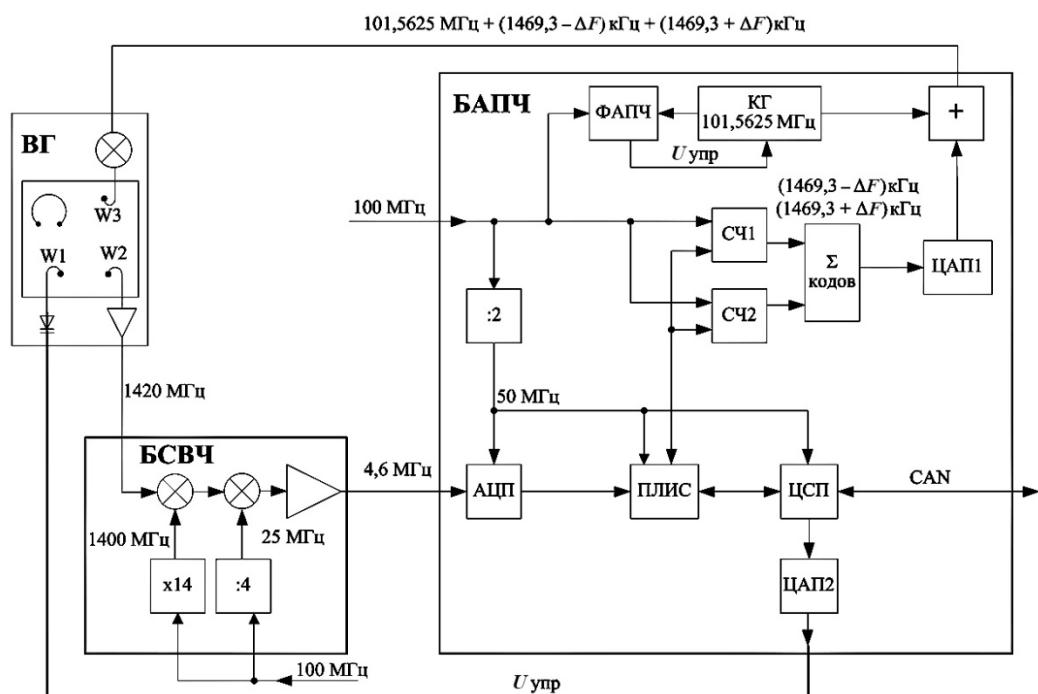


Рис. 1. Функциональная схема цифровой системы АНР с ЗС

Частота вспомогательного КГ выбирается, исходя из возможности простой реализации ФАПЧ по выходному сигналу ВСЧ 100 МГц. Уровень сигнала от вспомогательного КГ стабилизируется по выпрямленному напряжению смесительного диода, что позволяет уменьшить влияние реактивности петли на частоту резонатора. Частота f выбирается, исходя из условия (1). Она определяет заданное значение частоты настройки резонатора. Дискретность перестройки её частоты составляет 1 Гц. Мощность ЗС при этом оказывается вполне достаточной для нормальной работы системы АНР.

В нашем случае: $f_{\text{КГ}} = 101,5625 \text{ МГц}$; $f = 1,4693\dots \text{ МГц}$; $n = 14$.

В резонаторе ВГ под воздействием его амплитудно-частотной характеристики появляется разность амплитуд между двумя гармоническими составляющими ЗС, которая зависит от степени расстройки резонатора. При точной настройке резонатора на заданную частоту амплитуды гармонических составляющих становятся одинаковыми. В данном случае также используется амплитудный критерий настройки резонатора, но в работе системы АНР реализована возможность настройки частоты резонатора не только по равенству амплитуд гармонических составляющих ЗС, но и по программно задаваемой разнице амплитуд с дискретностью $1 \cdot 10^{-6}$ относительно амплитуды составляющих ЗС. Это позволяет обеспечить точную настройку резонатора ВГ по критерию независимости частоты ВГ от интенсивности пучка атомов водорода.

Снимаемый с петли связи W2 резонатора ВГ сигнал АНР усиливается, преобразуется в блоке СВЧ (БСВЧ) к промежуточной частоте (ПЧ) 4,594 МГц, усиливается с помощью широкополосного усилителя и затем оцифровывается аналого-цифровым преобразователем (АЦП). В дальнейшем обработка ведётся по специально разработанному алгоритму. С помощью программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) методом цифровой обработки сигнала реализуется фильтрация (выделение) обеих гармонических составляющих ЗС, являющаяся линейной операцией. Далее с помощью цифрового сигнального процессора (ЦСП) определяются их амплитуды, вычисляется разность амплитуд, которая затем интегрируется. На основании этих данных с помощью ЦАП2 вырабатывается напряжение, подаваемое на петлю варикапа резонатора W1, управляющее частотой резонатора и обеспечивающее её стабилизацию.

Обработка сигнала АНР и формирование сигнала управления выполняются по программе цифровым способом, поэтому не зависят от времени и параметров окружающей среды. Узлы системы АНР, на которые оказывает влияние температура, термостабилизируются. В блоке БСВЧ весь узел усиления и преобразования сигналов ВГ и АНР к промежуточной частоте $\approx 4,6$ МГц, умножения и деления частоты 100 МГц, а также усиления и фильтрации сигналов ПЧ термостатирован. Использование элементов Пельтье позволяет поддерживать температуру узлов в пределах $(+35\text{--}37)$ °C с погрешностью не более $\pm 0,1$ °C в рабочем диапазоне внешних температур от + 5 до + 40 °C.

Влияние температуры на систему синхронизации опорного КГ по сигналу генерации ВГ также уменьшено за счёт термостабилизации *LC*-контуров, фильтров и кварцевых резонаторов. Кроме того, внутри корпуса прибора поддерживается тепловой режим за счёт циркуляции воздуха с помощью двух вентиляторов (один — на приток, другой — на отток воздуха), управляемых от регулятора температуры. Дальнейшее уменьшение влияния температуры на частоту ВСЧ осуществляется за счёт термокомпенсации. Весь комплекс мероприятий обеспечивает температурный коэффициент частоты ВСЧ не более $1,5 \cdot 10^{-15}$ 1/°C.

Оценим степень влияния ЗС, состоящего из двух спектральных составляющих, на частоту ВГ. Экспериментальным путём было установлено, что при работе системы АНР при отклонении заданной частоты настройки резонатора на $\Delta f_{\text{рез}}$ от частоты генерации f_0 ВГ, рядом с сигналом генерации появляется небольшая спектральная компонента. Причём её отклонение Δf_c от частоты генерации зависит от величины отстройки резонатора, при этом $\Delta f_c = 2 \cdot \Delta f_{\text{рез}}$. При настройке резонатора выше частоты генерации она расположена на $2\Delta f_{\text{рез}}$ выше линии генерации ВГ, а при настройке резонатора ниже расположена на $2\Delta f_{\text{рез}}$ ниже. При уменьшении уровня генерации уровень этой спектральной компоненты уменьшается, при исчезновении генерации она пропадает.

Эффект имеет квантовую природу. Известно [7], что при воздействии на квантовую систему внешним сигналом близкой частоты f_c возникает полигармонический режим, при котором наблюдаются колебания с частотой внешнего сигнала, а также интерференционные колебания с комбинационными частотами $mf_c \pm kf_0$, где m и k — натуральные числа.

Измерения значений частот и уровней мощности всех спектральных компонент в процессе работы выполнялись с помощью анализатора спектра Keysight N9010A. Для анализа влияния ЗС на частоту генерации будем использовать формулу для сдвига частоты генерации ВГ под воздействием внешнего сигнала, отстоящего по частоте значительно больше полусирины спектральной линии [8]:

$$\frac{\Delta f_0}{f_0} = -\frac{1}{8Q_{\text{л}}^2} \cdot \frac{f_0}{\Delta f_c} \cdot \frac{P_c}{P_0}; \quad \Delta f_c \gg \delta, \quad (2)$$

где Δf_0 — сдвиг частоты ВГ, вызываемый внешним сигналом; P_0 — мощность генерации ВГ; P_c — мощность внешнего сигнала; $Q_{\text{л}}$ — добротность линии излучения атомов водорода; δ — полусирина линии излучения атомов водорода.

На рис. 2 представлен спектр сигнала генерации ВГ с работающей системой АНР. При этом мощность составляющих ЗС, отстоящих на ± 14 кГц от сигнала ВГ, на 20 дБ больше мощности сигнала ВГ, а частота настройки резонатора установлена ниже частоты генерации на 22 Гц. Спектральная компонента Δf_c появляется вследствие воздействия зондирующего сигнала системы АНР на сигнал генерации ВГ. Можно оценить сдвиг частоты ВГ из-за воздействия данной спектральной компоненты, используя формулу (2).

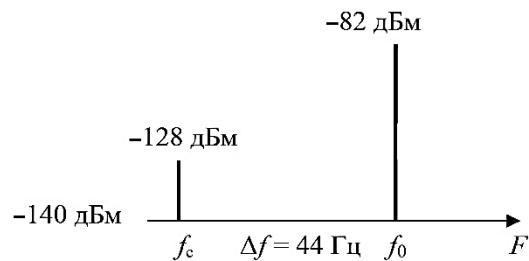


Рис. 2. Спектр сигнала генерации ВГ с работающей системой АНР

При $Q_{\text{л}} = 10^9$, $f_0 = 1,42 \cdot 10^9$ Гц, $\Delta f_c = 44$ Гц и $P_c / P_0 = 2,48 \cdot 10^{-5}$ (-46 дБ) сдвиг частоты сигнала ВГ составляет:

$$\frac{\Delta f_0}{f_0} = -1 \cdot 10^{-16}.$$

Можно считать, что влияние мощности двух спектральных составляющих ЗС на частоту генерации ВГ пренебрежимо мало. Влияние нестабильности частоты сигнала Δf_c также мало, так он получен в результате воздействия на сигнал генерации ВГ двух высоко стабильных составляющих ЗС, полученных от очень стабильного выходного сигнала ВСЧ.

Таким образом, разработанная новая система АНР обеспечивает малое влияние ЗС на сигнал генерации ВГ, а также отсутствие помех и паразитных сигналов, влияющих на частоту генерации. Это даёт возможность увеличить

допустимую мощность ЗС и отношение «сигнал / шум» сигнала АНР, что позволяет уменьшить нестабильность частоты ВСЧ как на малых, так и больших интервалах времени.

При работе малогабаритного СЧВ в составе ПКЧВ обеспечивается низкая погрешность сличения шкал времени территориально разнесённых эталонов времени и частоты за счёт малой погрешности хранения шкалы времени ПКЧВ, которая не превышает 1,5 нс при транспортировании автомобильным транспортом в течение 24 ч при ходовом времени 12 ч.

Технические, метрологические и эксплуатационные характеристики разработанного ВСЧ с новой системой АНР приведены в таблице.

Таблица

Параметры малогабаритного активного водородного стандарта частоты

№ п/п	Параметр	Значение
1	Среднеквадратическое значение напряжения выходных сигналов 5, 10, 100 МГц	$(1 \pm 0,2)$ В $R_H = 50$ Ом
2	Импульсный сигнал 1 Гц положительной полярности при $R_H = 50$ Ом	τ_i 10 мкс
		τ_f 1,5 нс
		Амплитуда < 3,5 В
3	Спектральная плотность мощности фазовых шумов в выходном сигнале 10 МГц при отстройке от несущей:	1 Гц – 106 дБ/Гц
		10 Гц – 118 дБ/Гц
		100 Гц – 136 дБ/Гц
		1 кГц – 139 дБ/Гц
		10 кГц – 146 дБ/Гц
		100 кГц – 146 дБ/Гц
4	Диапазон перестройки выходной частоты	$\pm 1 \cdot 10^{-9}$ с шагом 10^{-15}
5	СКДО выходной частоты в стационарных условиях (не более) при времени измерения:	1 с $2 \cdot 10^{-13}$
		10 с $4 \cdot 10^{-14}$
		100 с $1,2 \cdot 10^{-14}$
		1000 с $4 \cdot 10^{-15}$
		3600 с $1,8 \cdot 10^{-15}$
		10000 с $1,5 \cdot 10^{-15}$
		24 ч $2 \cdot 10^{-15}$
6	Погрешность синхронизации внешними импульсами положительной полярности	< 50 нс
7	Диапазон рабочих температур	+5 ... +40 °C
8	Температурный коэффициент частоты, не более	$1,5 \cdot 10^{-15}$ 1/K
9	Магнитный коэффициент частоты, не более	$1 \cdot 10^{-15}$ 1/Гс
10	Электропитание	сеть переменного тока 100–240 В 48–440 Гц
		сеть постоянного тока 10–36 В
11	Потребляемая мощность	при прогреве < 200 Вт
		в прогретом состоянии < 150 Вт
12	Масса	55 кг

Примечание: R_H — сопротивление нагрузки; τ_i , τ_f — длительность импульса и его фронта.

ПКЧВ на основе разработанного малогабаритного водородного стандарта частоты с ВГ с сапфировым резонатором и новой системой АНР позволяют существенно уменьшить нестабильность выходной частоты на интервалах времени от 10 с до 24 ч. Широкое применение цифровых технологий позволило выполнять контроль работы системы и узлов во время транспортирования прибора. Это дало возможность существенно уменьшить погрешность хранения шкалы времени при транспортировании.

ПКЧВ могут также быть использованы на подвижных и стационарных объектах в качестве постоянно действующих стандартов частоты для получения высокостабильных опорных сигналов и хранения шкалы времени. При этом они экономичны, компактны, не требуют специальных климатических условий и имеют хорошие метрологические характеристики.

Список литературы

1. Гайгеров Б.А. Водородный генератор с малогабаритным резонатором // Измерительная техника. — 1986. — № 6. — С. 8–9.
2. Сысоев В.П., Самохвалов Ю.С., Овчинников С.Н., Нестеров Н.И., Грачев Н.М., Алексеев М.И., Нагирный В.П., Шаталов А.А. Разработка перевозимых квантовых часов водородных нового поколения // Альманах современной метрологии. — 2020. — № 1 (21). — С. 116–125.
3. Пат. Российской Федерации, МПК G01R 33/00. Магнитная сортирующая система водородного генератора / В.П. Сысоев, С.Н. Овчинников, А.А. Шаталов; патентообладатель Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (РОССТАНДАРТ) — № 2722871; опубл. 04.06.2020, Бюл. № 16.
4. Пат. Российской Федерации. МПК H03B 1/00. Активная петля связи СВЧ-резонатора водородного генератора / В.П. Сысоев, Н.М. Грачев, В.П. Нагирный; патентообладатель Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (РОССТАНДАРТ). — № 2714218; опубл. 13.02.2020, Бюл. № 5.
5. Сысоев В.П., Овчинников С.Н., Грачев Н.М., Нагирный В.П. Система стабилизации магнитного поля водородного генератора // Метрология времени и пространства. Доклады IX Международного симпозиума, Менделеево Московской области, 12–14 сентября 2018 г. — Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2019. — С. 177–185.
6. Пат. Российской Федерации. МПК H01S 1/00. Способ автоматической настройки резонатора водородного генератора / И.Ю. Блинов, Ю.Ф. Смирнов, Ю.С. Самохвалов, В.П. Сысоев; патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений» (ФГУП «ВНИИФТРИ»). — № 2741476; опубл. 26.01.2021, Бюл. № 3.

7. Audoin C., Vanier J. The quantum physics of atomic frequency standards. — Bristol and Philadelphia: IOP Publishing, 1989. — V. 2.
8. Гайгеров Б.А., Сысоев В.П., Самохвалов Ю.С. Активный транспортируемый водородный стандарт частоты с цифровой системой АНР // Труды ВНИИФТРИ. — 2005. — Вып. 50 (142). — С. 57–70.

Статья поступила в редакцию: 13.10.2022 г.

Статья прошла рецензирование: 21.10.2022 г.

Статья принята в работу: 01.11.2022 г.