

Перспективный активный водородный стандарт частоты VCH-2021

© А. А. Беляев¹, В. Г. Воронцов¹, С. Д. Горелов¹, Н. А. Демидов¹, Д. Г. Князев¹,
В. А. Поляков^{1,2}, Ю. В. Тимофеев¹

¹АО «Время-Ч», г. Нижний Новгород, Россия

²ННГУ им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия

Реферат

В статье рассмотрены результаты инициативной разработки перспективного активного водородного стандарта частоты VCH-2021, основой которого служит квантовый водородный генератор с двойной сортировкой атомов водорода по квантовым состояниям. Проанализированы основные вклады в нестабильность частоты активных водородных стандартов частоты: влияние тепловых шумов резонатора и приемника. Поскольку нестабильность частоты на средних и длительных интервалах времени измерения в основном определяется тепловыми шумами резонатора, для уменьшения их вклада предложен метод двойной сортировки атомов водорода по квантовым состояниям.

Рассмотрены основные конструктивные особенности системы двойной сортировки атомов и результаты расчётов количества атомов, ежесекундно попадающих в накопительную колбу. Обосновывается выбор конструкции инвертирующей области. На данный момент известны два метода создания области инверсии: метод быстрого изменения направления магнитного поля и метод адиабатического быстрого прохождения. Основным преимуществом метода адиабатического быстрого прохождения с точки зрения применения в серийно-выпускаемых приборах является отсутствие необходимости в тщательной экранировке области инверсии. Величина постоянной составляющей магнитного поля в этом методе составляет единицы Гс, в то время как для корректной работы метода быстрого изменения направления магнитного поля величина остаточных внешних магнитных полей не должна превышать 1 мкГс.

Приведено описание основных электронных узлов VCH-2021. В приборе применена система цифровой фазовой автоподстройки частоты кварцевого генератора и система цифровой автоматической настройки резонатора. Это позволило уменьшить температурный коэффициент фазы выходных сигналов активных водородных стандартов частоты на уровне $2\text{пс}/^\circ\text{C}$; упростить регулировку; повысить точность, воспроизводимость, стабильность, компактность. Разработан модуль управления системой двойной сортировки атомов, обеспечивающий подачу постоянного тока и генерацию частоты зеэмановских переходов, необходимые для работы инвертирующей области по методу адиабатического быстрого прохождения.

Ключевые слова: активный водородный стандарт частоты, система двойной сортировки, метод адиабатического быстрого прохождения.

Контакты для связи: Поляков Виктор Александрович (polyakov@vremya-ch.com).

Для цитирования: Беляев А. А., Воронцов В. Г., Горелов С. Д., Демидов Н. А., Князев Д. Г., Поляков В. А., Тимофеев Ю. В. Перспективный активный водородный стандарт частоты VCH-2021 // Труды ИПА РАН. 2023. Вып. 67. С. 44–50.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.67.44-50>

Prospective Active Hydrogen Maser VCH-2021

A. A. Belyaev¹, V. G. Vorontsov¹, S. D. Gorelov¹, N. A. Demidov¹, D. G. Knyazev¹,
V. A. Polyakov^{1,2}, Yu. V. Timofeev¹

¹"Vremya-CH" JSC, Nizhniy Novgorod, Russia

²Lobachevsky University, Nizhniy Novgorod, Russia

Abstract

The results of the development of a prospective active hydrogen maser VCH-2021 based on physics package with single state selection are discussed. The main terms causing the active hydrogen maser frequency stability are analyzed: cavity thermal noise and receiver thermal noise. Since the medium- and long-term frequency stability is mainly caused by the cavity thermal noise a single state selection method is proposed to reduce its contribution.

The main design features of the single state selection system and the results of calculations of the number of atoms entering the storage bulb are considered. Inversion area design are reviewed. At the moment, two methods of creating an inversion region are known: the sudden field reversal method and the adiabatic rapid passage method. The main advantage of the adiabatic rapid passage method for serial production is no need to use careful shielding of the inversion region. The magnitude of the constant component of the magnetic field in this method is approximately G, while for the correct operation of the sudden field reversal method the magnitude of the residual external magnetic fields should not exceed 1×10^{-6} G.

The description of the main electronic parts of the VCH-2021 is given. The digital phase lock loop system of the crystal oscillator frequency and the digital cavity autotuning system are used in the instrument. All of this allowed to reduce the hydrogen maser output signals phase temperature coefficient less than 2 ps/°C; simplify adjusting procedure; improve accuracy, reproducibility, stability, portability. The single state selection control module has been developed provides direct current supply and Zeeman transition frequencies generation necessary for the adiabatic rapid passage method.

Keywords: active hydrogen maser, single state selection system, adiabatic rapid passage method.

Contacts: Victor A. Polyakov (polyakov@vremya-ch.com).

For citation: Belyaev A. A., Vorontsov V. G., Gorelov S. D., Demidov N. A., Knyazev D. G., Polyakov V. A., Timofeev Yu. V. Prospective active hydrogen maser VCH-2021 // Transactions of IAA RAS. 2023. Vol. 67. P. 44–50. <https://doi.org/10.32876/AplAstron.67.44-50>

Введение

Активные водородные стандарты частоты (АВСЧ) разрабатываются уже более пятидесяти лет, и к настоящему моменту в Российской Федерации в результате проведения интенсивных теоретических, экспериментальных исследований и выпуска конструкторских разработок АВСЧ (Ч1 – 1003М, Ч1 – 1035, производство АО «Время-Ч») достигнут практически теоретический предел по нестабильности частоты входящих в их состав водородных генераторов (ВГ) классического типа, определяемого на уровне $(2.8-3) \cdot 10^{-14} / \sqrt{\tau}$ и нестабильностью частоты на интервале времени измерения 1 сутки около $(5-3) \times 10^{-16}$.

АВСЧ составляют основу групповых водородных хранителей частоты и времени, являются источником опорного сигнала для новейших атомных часов на основе ультрахолодных атомов цезия или рубидия, применяются для корреляции сигналов, приходящих от разных антенн в радиointерферометрии со сверхдлинной базой, в том числе в качестве бортового синхронизирующего устройства на космическом радиотелескопе, а также для создания перевозимых квантовых часов. Поэтому задача уменьшения нестабильности частоты АВСЧ является актуальной и крайне важной.

Так, в рамках Федеральной целевой программы «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС» требуется создание хранителя единиц времени и частоты с СКДО не более $(1-2) \times 10^{-16}$ на интервале времени измерения одни сутки, а по федеральной космической программе предусмотрена разработка бортового водородного стандарта частоты для комплекса научной аппаратуры космической обсерватории «Миллиметр» с СКДО частоты выходного сигнала не более $2 \cdot 10^{-14} / \sqrt{\tau}$ на интервалах времени измерения от 10 до 1000 сек и не более 5×10^{-16} на интервале времени измерения 1 час.

Нестабильность частоты АВСЧ $\sigma(\tau)$ (рис. 1) складывается из нестабильности частоты ВГ, обусловленной тепловыми шумами СВЧ-резонатора (белый частотный шум убывает как $1/\sqrt{\tau}$), и нестабильности частоты, обусловленной шумами

приемной аппаратуры (белый фазовый шум убывает как $1/\tau$) (Kleppner et al., 1962).

$$\sigma(\tau) = \sqrt{\frac{kT}{2PQ_l^2\tau} + \frac{kTFB}{(2\pi)^2 f_0^2 \tau^2 P} \frac{1+\beta}{\beta}}, \quad (1)$$

где k — постоянная Больцмана, T — температура резонатора и приемника, Q_l — добротность спектральной линии, F, B — шум-фактор и полоса приёмника, f_0 — частота генерации, P — мощность генерации в резонаторе, β — коэффициент связи с приемником, τ — интервал времени измерения.

До интервала времени измерения 5–10 сек преобладают шумы кварцевого генератора и приемника, на временах $\sim 30-1000$ сек зависимость нестабильности частоты АВСЧ от интервала времени измерения определяется первым слагаемым в формуле 1, затем начинает сказываться влияние внешних условий и шумов системы автоматической настройки резонатора (АНР). Минимально возможная нестабильность частоты ВГ определяется температурой резонатора, мощностью генерации и добротностью спектральной линии. Уменьшение нестабильности частоты путем значимого

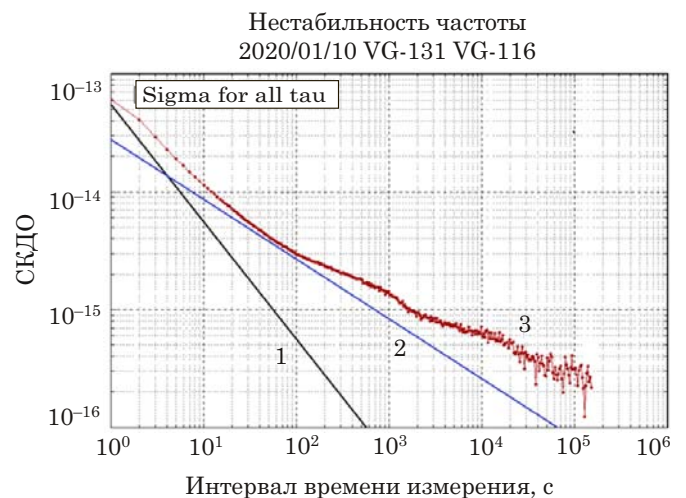


Рис. 1. Зависимость нестабильности частоты АВСЧ от интервала времени измерения: 1 — нестабильность частоты, определяемая шумами кварцевого генератора и приемника, 2 — тепловым шумом резонатора, 3 — нестабильность АВСЧ Ч1-1035

уменьшения температуры резонатора для серийных приборов практически исключено из-за усложнения конструкции и эксплуатации (требуется система охлаждения с применением жидкого азота). Отсюда следует, что добиться уменьшения нестабильности частоты можно только увеличением добротности спектральной линии и мощности генерации. В классической конструкции ВГ после пролета сортирующего магнита в накопительную колбу резонатора попадают примерно в равных количествах атомы в двух квантовых состояниях $F=1, m_F=0$ и $F=1, m_F=+1$. Первые генерируют СВЧ-мощность на частоте 0–0 перехода, вторые только препятствуют росту мощности генерации и уширяют спектральную линию за счет спин-обменных взаимодействий. Для устранения этого явления был предложен метод двойной сортировки, при котором в резонатор попадают атомы только в одном квантовом состоянии $F=1, m_F=0$ (Claude et al., 1968). По проведенным теоретическим оценкам при этом возможно увеличение произведения $Q_i\sqrt{P}$ в 1.5–1.6 раза (Urabe, 1980; Абрагам, 1972).

Конструкция системы двойной сортировки атомов VCH-2021

Схема двойной сортировки приведена на рис. 2. После вылета из первого сортирующего магнита атомы в состояниях $F=1, m_F=0, +1$ фокусируются на вход второго сортирующего магнита, проходя через инвертирующую область, где атомы из состояния с $m_F=+1$ переводятся в состояние $m_F=-1$, после чего отсортировываются из пучка вторым сортирующим магнитом. При разработке системы двойной сортировки (СДС) атомов для серийно выпускаемых АВСЧ было введено ограничение на общую длину: от источника пучка до выхода из второго магнита не более 200 мм. Известны два метода инверсии — метод встречных полей и метод

адиабатического быстрого прохождения (Mattison et al., 1986; Urabe et al., 1980). В первом случае между двумя антигильмгольцевскими катушками, оси которых совпадают с осью пучка, а магнитные поля направлены навстречу друг другу, создается плоскость, перпендикулярная оси пучка с нулевым значением продольной компоненты магнитного поля. В классическом представлении в этой области должны быть созданы такие условия, чтобы пролетающие ее атомы не успевали отследить изменение направления поля и, пересекая нулевую плоскость, сохраняли свою ориентацию в пространстве. Но поскольку магнитное поле сменило направление на противоположное, проекция магнитного момента атома на это поле оказывается противоположной по знаку, то есть после пересечения нулевой плоскости атомы оказываются в состоянии с $m_F=-1$ и должны быть отклонены из пучка вторым сортирующим магнитом. Атомы в состоянии с $m_F=0$ при этом своего состояния не меняют, так как магнитный момент атома остается перпендикулярным внешнему магнитному полю. Основной сложностью при реализации такой схемы инверсии населенностей является задача создания плоскости с нулевым значением продольного магнитного поля, так как проникновение в эту область даже очень слабых посторонних полей (~мкГс) нарушает работу устройства. Например, это могут быть поля рассеяния сортирующих магнитов, остаточная намагниченность магнитных экранов, неполная сбалансированность полей катушек. Несмотря на помещение катушек в тройной магнитный экран, получить полноценную и стабильную инверсию при условии жестких ограничений на длину СДС не удалось.

В методе адиабатического быстрого прохождения инверсия населенностей происходит при взаимодействии атомов с суперпозицией магнитных полей, образованной перпендикулярным осью пучка переменным магнитным полем зеемановской частоты и меняющимся по величине вдоль оси пучка продольным магнитным полем (Поляков и др., 2018). Для этого между сортирующими магнитами устанавливается секционный конический соленоид, создающий магнитное поле B , меняющееся по величине по длине соленоида, ось которого совпадает с осью пучка. По центру соленоида в области длиной 1–2 см, ограниченной металлическими экранами, устанавливаются катушки, которые могут создавать поперечное переменное магнитное поле амплитудой B_1 и частотой ~ единиц МГц. Все это устройство помещается в цилиндрический магнитный экран с отверстиями для пропускания пучка на торцах (рис. 3).

При влете в область взаимодействия атом начинает прецессировать вокруг вектора суммарного поля, имеющего некоторый угол θ относительно оси пучка, и проекция которого на ось

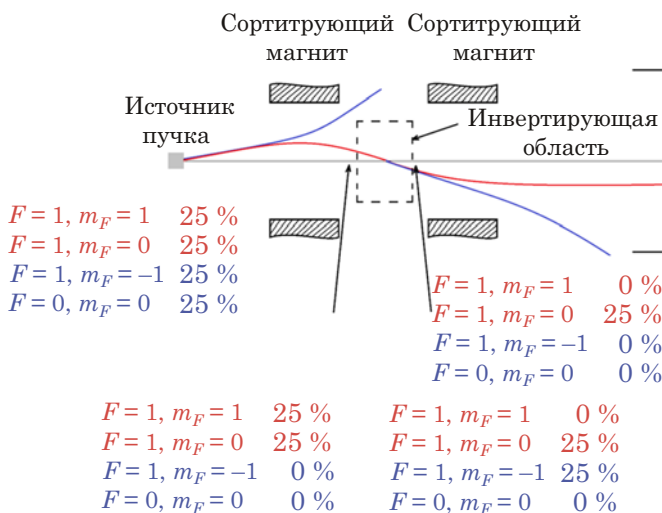


Рис. 2. Схема двойной сортировки атомов водорода

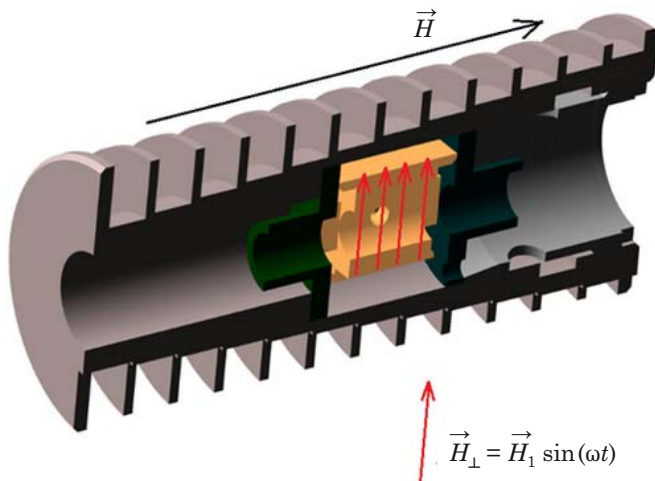


Рис. 3. Конструкция инвертирующей области по методу адиабатического быстрого прохождения

пучка совпадает с направлением H продольного магнитного поля. По мере движения атомов к центру области взаимодействия из-за уменьшения величины H угол θ начинает увеличиваться и проходит через $\pi/2$ в резонансе. Частота подаваемого ВЧ поля в этом случае становится равной частоте зеемановских переходов в атомах водорода. Далее угол θ продолжает увеличиваться, при этом проекция вектора суммарного поля на ось пучка становится антипараллельна H . Если магнитный момент атома успевает отслеживать вращение вектора суммарного поля, то по выходу из области взаимодействия с переменным полем он оказывается антипараллелен полю H в состоянии с $m_F = -1$. Условие адиабатичности процесса накладывает ограничения на величину и скорость изменения полей и углов. Преимуществом данного метода является то, что процесс переориентации происходит в полях величиной в единицы Гаусс и не требуется сверхтщательного экранирования области взаимодействия от внешних полей. Проведенные теоретические оценки дали следующие оптимальные результаты: $H \sim 5$ Гс, $H_1 \sim (0.7-1)$ Гс, $\Delta H/H \sim (0.12-0.16)$.

Экспериментальная проверка спроектированной и изготовленной на основании проделанных расчетов СДС показала ее высокую эффективность. Не менее 95 % атомов инвертировались из состояния с $F = 1$, $m_F = +1$ в состояние с $F = 1$, $m_F = -1$. Следующим этапом подготовки к проектированию ВГ с СДС стал расчет и оптимизация фокусировки атомного пучка. Критерии оптимальности: максимальное количество атомов в состоянии $F = 1$, $m_F = 0$ на входе в накопительную колбу и отсутствие атомов в других квантовых состояниях. Необходимые для этого условия: атомы с $F = 1$, $m_F = -1$ и $F = 0$, $m_F = 0$ после первого сортирующего магнита не должны попадать на вход второго сортирующего магнита, а атомы с $F = 1$, $m_F = -1$ с выхода

второго сортирующего магнита не должны попадать на вход накопительной колбы. С учетом распределения атомов по скоростям и углам вылета из коллиматора источника пучка рассчитывались траектории атомов в зависимости от расстояний между элементами СДС, длинами сортирующих магнитов и диаметрами сортирующих каналов. По результатам расчетов была разработана СДС, удлинившая систему формирования пучка всего на 100 мм, что позволило вписать ВГ с двойной сортировкой в стандартный корпус от выпускающегося АВСЧ Ч1-1003М. Проведенные измерения состава атомов водорода в накопительной колбе показали, что не менее 96 % атомов находятся в состоянии $F = 1$, $m_F = 0$ (Беляев и др., 2022), что свидетельствует об оптимальности созданных конструкций как инвертирующей области, так и СДС в целом. Для оценки качества фокусировки атомов в состоянии с $F = 1$, $m = 0$ на входное отверстие накопительной колбы в системе двойной сортировки атомов были проведены аналогичные расчеты для классической сортирующей системы, используемой в промышленных ВГ. Результаты представлены в табл. 1.

По данным табл. 1 видно, что количество атомов в состоянии с $F = 1$, $m_F = 0$ в накопительной колбе в ВГ с СДС меньше, чем в ВГ 1003М лишь на 6 %. На экспериментальном макете ВГ с двойной сортировкой было получено увеличение произведения добротности спектральной линии на корень из мощности генерации в 1.5 раза, что обеспечило уменьшение нестабильности частоты, обусловленной тепловыми шумами водородного генератора до уровня $\sigma(\tau) \leq 2 \cdot 10^{-14} / \sqrt{\tau}$. Это позволило уменьшить нестабильность частоты выходного сигнала прибора на интервалах времени измерения от 100 с до 1 суток приблизительно в 1.5 раза по сравнению с лучшими современными АВСЧ. Дополнительным преимуществом использования пучка атомов в одном квантовом состоянии является значительное (в 10 раз) уменьшение влияния неоднородностей поля подмагничивания на частоту ВГ, благодаря отсутствию в резонаторе атомов на соседних энергетических уровнях. На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований по разработке СДС и по

Таблица 1
Сравнение количества атомов в состоянии с $F = 1$, $m_F = 0$ для ВГ с СДС и ВГ Ч1-1003М

| N/N_0 $F = 1$, $m_F = 0$ | Выход источника | Выход 1 ^{го} магнита | Вход 2 ^{го} магнита | Выход 2 ^{го} магнита | Вход в колбу |
|-----------------------------------|--------------------|-------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|-----------------|
| ВГ с СДС | 1 | 0.338 | 0.31 | 0.308 | 0.27 |
| ВГ 1003М | 1 | 0.338 | – | – | 0.285 |

влиянию двойной сортировки на характеристики ВГ были разработаны и изготовлены АВСЧ нового поколения — первые серийные АВСЧ на основе ВГ с двойной сортировкой — VCH-2021.

Основные конструктивные особенности электроники VCH-2021

Электронная часть прибора подверглась серьезной переработке. В АВСЧ VCH-2021 применена система цифровой фазовой автоподстройки частоты кварцевого генератора. Основные преимущества цифровой фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ):

1. Цифровые фильтры, применяемые в цифровой ФАПЧ, имеют высокую точность, воспроизводимость, стабильность, компактность.

2. Цифровая ФАПЧ более проста в разработке и реализации, меньше чувствительна к шумам напряжения.

3. Возможность менять параметры ПИ-регулятора через программу управления стандарта, в отличие от аналоговой петли ФАПЧ, где приходится подбирать номиналы резисторов в пропорционально-интегрирующем фильтре под каждый кварцевый генератор. Структурная схема цифровой ФАПЧ представлена на рис. 4.

Маломощный преобразователь обеспечивает перенос частоты 1.420 ГГц сигнала с ВГ на частоту фазового детектора 405 кГц. Сигнал ПЧ 405 кГц оцифровывается на АЦП и обрабатывается программируемой логической интегральной схемой (ПЛИС). Далее оцифрованный сигнал ПЧ попадает на квадратурный демодулятор, где в качестве гетеродина используется синтезатор частоты 405.751 кГц. Синтезатор обеспечивает дискретную электронную перестройку выходных частот с относительным шагом $5 \cdot 10^{-17}$ от их номинальных значений. Полный диапазон перестройки выходной частоты стандарта синтезатором составляет $1 \cdot 10^{-10}$. Фильтрация I/Q компонент квадратурного демодулятора обеспечивается цифровыми фильтрами низких частот. Выборки I/Q компонент прореживаются и далее поступают в компонент «ARCTAN», где происходит вычисление фазы по алгоритму CORDIC. Сигнал ПЧ и сигнал синтезатора поступают на вход частотно-фазового детек-

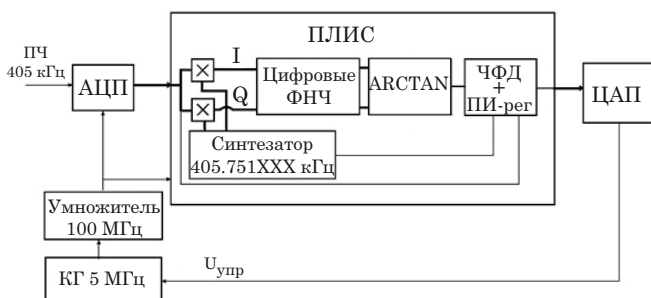


Рис. 4. Структурная схема цифровой ФАПЧ

тора (ЧФД), а вычисленная фаза поступает на вход ПИ-регулятора. ЧФД обеспечивает первоначальную «грубую» подстройку кода управляющего напряжения. «Точная» подстройка обеспечивается ПИ-регулятором.

Увеличение мощности генерации позволило уменьшить нестабильность частоты, обусловленную тепловыми шумами приемника, и за счет использования системы цифровой фазовой автоподстройки частоты удалось экспериментально достигнуть нестабильности частоты на интервалах времени измерения 1 с и 10 с соответственно менее 8×10^{-14} и 1×10^{-14} , а при использовании сверхмаломощного кварцевого генератора (в модели VCH-2021M) — менее 5×10^{-14} и 9×10^{-15} . Благодаря созданию умножителей, усилителей сигналов, цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП) и аналого-цифровых преобразователей (АЦП) с малым ТКФ, обработке сигналов в цифровом виде был получен общий ТКФ выходных сигналов АВСЧ на уровне 2 пс/°С.

В АВСЧ VCH-2021 применена также система цифровой автоматической настройки резонатора, структурная схема которой представлена на рис. 5.

Автономная система АНР использует метод модуляции частоты резонатора. Частота резонатора ВГ модулируется переключением напряжения U_m на модулирующем варикапе, что приводит к появлению амплитудной модуляции в сигнале генерации ВГ. Сигнал с ВГ после маломощного преобразователя частоты поступает на вход амплитудного детектора и оцифровывается с помощью АЦП. Далее оцифрованный сигнал поступает в ПЛИС, где происходит цифровая фильтрация сигнала амплитудной модуляции. Сигнал ошибки, несущий информацию о расстройке резонатора, выявляется при синхронном детектировании с опорным сигналом 87.2 Гц. Далее сигнал ошибки поступает в ПИ-регулятор, а затем полученный код поступает в ЦАП1. Управление частотой резонатора производится настраивающим варикапом.

Как следует из принципа работы СДС по методу адиабатического быстрого прохождения, для ее функционирования требуется источник посто-

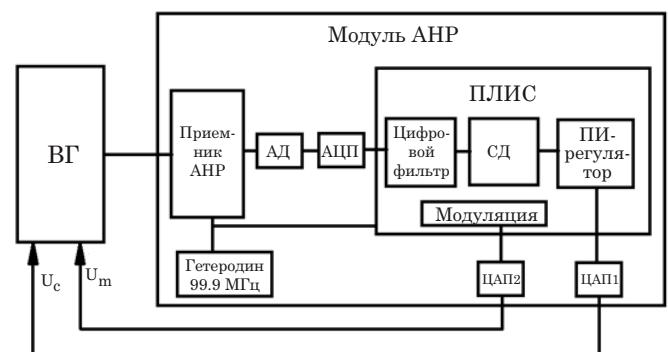


Рис. 5. Структурная схема цифровой автоматической настройки частоты резонатора

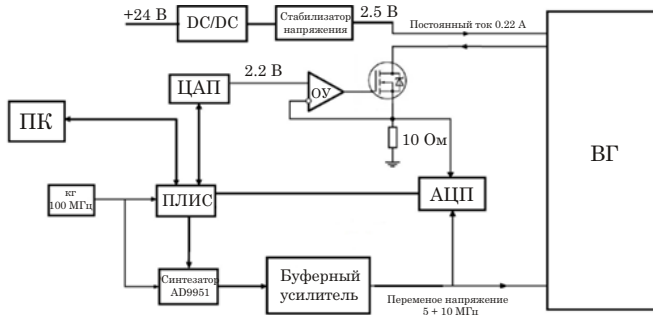


Рис. 6. Структурная схема модуля управления СДС

янного тока и генератор частоты зеemanовских переходов. Был разработан модуль для формирования и управления этими параметрами СДС. Он включает в себя: ПЛИС, регулируемый стабилизатор тока, синтезатор частоты, АЦП. Структурная схема модуля представлена на рис. 6.

Параметры СДС

1. Постоянный ток сортирующей системы (I_{dss}) в диапазоне 0–0.22 А задается кодом ЦАП.
2. Частота синусоидального сигнала в диапазоне 5–10 МГц задается кодом частоты в синтезаторе.
3. Амплитуда синусоидального сигнала в диапазоне 0–10 В задается кодом амплитуды в синтезаторе.

Напряжение на токозадающем резисторе 10 Ом и амплитудное напряжение синусоидального сигнала измеряется с помощью АЦП. Коды параметров СДС записываются и хранятся в энергонезависимой памяти модуля. При включении питания прибора параметры СДС восстанавливаются. Требования к стабильности параметров СДС: чтобы частота АВСЧ не менялась более чем 1×10^{-16} , нестабильность тока и частоты СДС не должна превышать 2×10^{-4} .

Экспериментальные результаты

Были проведены приемочные испытания разработанных приборов VCH-2021 и VCH-2021M, в котором применяется кварцевый генератор со сверхнизкими фазовыми шумами. На рис. 7 представлены полученные результаты по нестабильности частоты (СКДО) двух VCH-2021M.

Исследуемые приборы были размещены в климатической камере, где допустимые отклонения температуры не превышали $\pm 0.1^\circ\text{C}$. Для установления нестабильности исследуемых приборов с помощью компаратора с полосой пропускания 0.5 Гц были проведены измерения нестабильности частоты на интервале времени наблюдения 48 суток, линейный дрейф исключен. По графику видно, что на интервалах времени измерения более суток нестабильность частоты продолжает спадать как 1 на корень из τ и уверенно уходит в 17-ый знак.

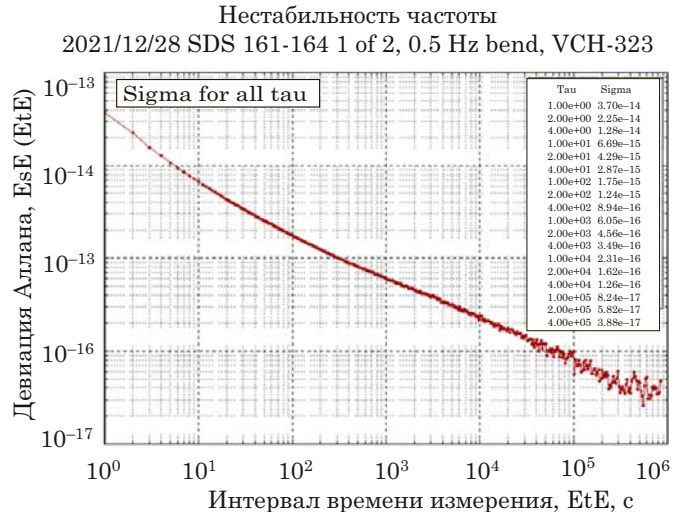


Рис. 7. Нестабильность частоты (СКДО) выходного сигнала 5 МГц VCH-2021M

По результатам проведенных испытаний и с учетом технологического запаса для АВСЧ VCH-2021 и VCH-2021M утверждены технические характеристики, указанные в табл. 2.

Приведенные значения гарантируются с учетом и исключением суточного дрейфа частоты АВСЧ, при колебаниях внешней температуры не более $\pm 0.1^\circ\text{C}$ в пределах рабочего диапазона температур со скоростью изменения не более 0.3°C в час.

Достигнутые характеристики по нестабильности частоты (СКДО) являются наивысшими как в России, так и в мире для всех стандартов частоты СВЧ диапазона.

Внешний вид прибора VCH-2021 представлен на рис. 8.



Рис. 8. Внешний вид прибора VCH-2021

Основные технические характеристики VCH-2021 и VCH-2021M

| СКДО от интервала времени измерения, τ | VCH-2021 | | | VCH-2021M | | |
|----------------------------------------|---------------------------------------------------------|-------------|-------------|------------------------|-------------|------------------------|
| | Полоса 3 Гц | | | Полоса 0.5 Гц | | Полоса 3 Гц |
| 1 с | $1.0 \cdot 10^{-13}$ | | | $5.0 \cdot 10^{-14}$ | | $7.0 \cdot 10^{-14}$ |
| 10 с | $1.5 \cdot 10^{-14}$ | | | $0.9 \cdot 10^{-14}$ | | $1.0 \cdot 10^{-14}$ |
| 100 с | $3.0 \cdot 10^{-15}$ | | | $2.5 \cdot 10^{-15}$ | | $2.5 \cdot 10^{-15}$ |
| 1000 с | $1.0 \cdot 10^{-15} *$ | | | $1.0 \cdot 10^{-15} *$ | | $1.0 \cdot 10^{-15} *$ |
| 1 час | $8.0 \cdot 10^{-16} *$ | | | $8.0 \cdot 10^{-16} *$ | | $8.0 \cdot 10^{-16} *$ |
| 1 сутки | $1.5 \cdot 10^{-16} *$ | | | $1.5 \cdot 10^{-16} *$ | | $1.5 \cdot 10^{-16} *$ |
| СПМФШ, дБ/Гц | 5 МГц | 10 МГц | 100 МГц | 5 МГц | 10 МГц | 100 МГц |
| 1 Гц | ≤ -118 | ≤ -112 | ≤ -92 | ≤ -130 | ≤ -121 | ≤ -100 |
| 10 Гц | ≤ -135 | ≤ -129 | ≤ -109 | ≤ -148 | ≤ -135 | ≤ -115 |
| 100 Гц | ≤ -149 | ≤ -143 | ≤ -122 | ≤ -153 | ≤ -145 | ≤ -125 |
| 1 кГц | ≤ -156 | ≤ -149 | ≤ -122 | ≤ -158 | ≤ -150 | ≤ -130 |
| 10 кГц | ≤ -158 | ≤ -153 | ≤ -153 | ≤ -158 | ≤ -153 | ≤ -153 |
| 100 кГц | ≤ -158 | ≤ -153 | ≤ -153 | ≤ -158 | ≤ -153 | ≤ -153 |
| Дрейф выходной частоты за 1 сутки | $\leq -3 \cdot 10^{-16}$ (через год непрерывной работы) | | | | | |
| ТКЧ | $\leq \pm 1.5 \cdot 10^{-15}/1^\circ\text{C}$ | | | | | |

Заключение

В данный момент разработка перспективного активного водородного стандарта частоты VCH-2021 и VCH-2021 успешно завершена. Опытные образцы изделий успешно выдержали приемочные испытания, на предприятии АО «Время-Ч» запущены в серийное производство 25 приборов, ориентировочный срок изготовления — начало 2024 г.

Благодарность

Поляков В. А. выражает благодарность ННГУ им. Н. И. Лобачевского за финансовую поддержку по программе «Приоритет-2030».

Литература

- Kleppner K., Goldenberg H. M., Ramsey N. F.* Theory of hydrogen maser // Phys. Ref. 1962. Vol. 126. № 2.
Claude A., Desaintfuscien M., Petit P., Schermann J.-P. Design of a double focalization in a hydrogen maser // IEEE Trans. on Instr. and Mass. 1968. IM-17. P. 351.

Urabe S., Nakagiri K., Ohta Y., M., et al. Majorana effect on atomic frequency standards // IEEE Trans. Instrum. Measur. 1980. Vol. IM-29, no. 4. P. 304–310.

Абрагам А., Блيني Б. Электронный парамагнитный резонанс переходных ионов. М.: «Мир», 1972. Т. 1. С. 111–125.

Mattison E. M., Vessot R. F. C., Shen Wei. Single-state selection system for hydrogen masers // IEEE Transactions on ultrasonics ferroelectrics and frequency control. 1987. Vol. 34 (6). P. 622–428.

Поляков В. А., Беляев А. А., Демидов Н. А., Тимофеев Ю. В. Система двойной сортировки атомов по квантовым состояниям для промышленного водородного стандарта частоты // Измерительная техника. 2018. № 8. С. 31–36.

Беляев А. А., Воронцов В. Г., Демидов Н. А. и др. Методы оценки эффективности формирования пучка атомов в одном квантовом состоянии водородного стандарта частоты с двойной сортировкой атомов водорода // Вестник метролога. 2022. Вып. 1. С. 21–28.