

Помехоустойчивость водородных стандартов частоты пассивного типа

В. И. Васильев

Нижегородское научно-производственное объединение им. М. В. Фрунзе, Н. Новгород, Россия,
e-mail: vvladich@yandex.ru

Проанализировано влияние гармонических помех на метрологические характеристики выходного сигнала пассивного водородного стандарта частоты. Показано, что обусловленные помехами дополнительные сигналы в цепях управления приводят к возникновению сдвига частоты или паразитной модуляции частоты стандарта. Приведены результаты экспериментального исследования помехоустойчивости пассивных водородных стандартов частоты, а также рассмотрены способы повышения помехоустойчивости. Полученные результаты подтверждают теоретический анализ.

Ключевые слова: водородный стандарт частоты и времени, нестабильность частоты, помехоустойчивость, экранирование.

Пассивные водородные стандарты частоты (ПВСЧ) обладают высокой стабильностью, точностью частоты и спектральной чистотой выходного сигнала. ПВСЧ применяют и на Земле, и в космосе для синхронизации радиотехнических систем и проверки различных источников электрических колебаний [1, 2].

В ПВСЧ используют классическую систему частотной автоподстройки к частоте водородного мазера (Н-мазера) [2, 3]. Для этого реализованы два кольца: кольцо управления частотой кварцевого генератора и кольцо управления частотой сверхвысокочастотного (СВЧ) резонатора. Спектральную линию Н-мазера и амплитудно-частотную характеристику резонатора зондируют СВЧ-сигналом возбуждения частотой около 1420 МГц, сформированным с помощью умножения сигнала кварцевого генератора частотой 5 МГц. Предварительно сигнал кварцевого генератора подвергается частотной модуляции. В амплитуде и фазе огибающей сигнала возбуждения на выходе из Н-мазера содержится информация об отклонении частоты кварцевого генератора и СВЧ-резонатора от частоты Н-мазера. Полученный с выхода сигнал возбуждения усиливается маломощным супергетеродинным приёмником, детектируется амплитудным детектором (АД) и поступает на селективный усилитель. Сигналы управления резонатором и кварцевым генератором разделяют с помощью фазовращателей. Разделённые сигналы поступают на синхронные детекторы (СД). Интегрирующие усилители фильтруют сигналы ошибок и формируют итоговые сигналы управления.

Стабильность частоты изолированного ПВСЧ подробно рассмотрена в работе [4]. При работе ПВСЧ в составе группы близкорасположенных стандартов, а также в окружении другой частотно-временной аппаратуры и вспомогательных радиоэлектронных устройств происходит увеличение уровня электромагнитных помех. Влияние сигналов ПВСЧ друг на друга может приводить к появлению взаимной коррелированности их частот [5, 6]. В таких случаях вопрос помехоустойчивости ПВСЧ исследован явно недостаточно. Существует лишь работа [7], где рассмотрено воздействие помех от собственных узлов формирования сигнала возбуждения.

Анализ воздействия помех. На вход СД поступают опорный и информационный сигналы. Пусть в качестве опорного сигнала поступает меандр, напряжение которого описывается функцией вида

$$U_{\text{оп}} = U_0 + U_1 \sin(\omega_m t + \varphi) + \sum_{k=2}^{\infty} U_k \sin(k\omega_m t + \psi_k)$$

где $U_0, \dots, U_k$ – амплитуды; $\psi, \dots, \psi_k$ – начальные фазы сигналов; ω_m – угловая частота модулирующего напряжения; t – время.

Информационный сигнал с выхода АД в общем случае также не чисто гармонический:

$$u_{\text{вх}} = u_0 + u_1 \sin(\omega_m t + \varphi) + \sum_{k=2}^{\infty} u_k \sin(k\omega_m t + \varphi_k),$$

где $u_0, \dots, u_k$ – амплитуды; $\psi, \dots, \psi_k$ – начальные фазы сигналов.

Пусть коэффициент передачи неидеального СД на периоде описывается следующим законом:

$$A(\omega_m t) = \begin{cases} A_1, & \alpha < \omega_m t < \pi + \beta; \\ A_2, & \pi + \beta < \omega_m t < 2\pi + \alpha, \end{cases}$$

где α, β – фазы перехода через ноль.

Воспользуемся соотношениями из [8] и запишем выходное напряжение СД:

$$\begin{aligned} U_{\text{СД}} &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u_{\text{вх}} A(\omega_m t) d(\omega_m t) = \\ &= u_0 \left[\frac{A_1 + A_2}{2} + \frac{\beta - \alpha}{2\pi} (A_1 - A_2) \right] + \frac{A_1 - A_2}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{u_{2k-1}}{2k-1} \times \\ &\times \cos \left[\varphi_{2k-1} + (2k-1) \frac{\alpha + \beta}{2} \right] \cos \left[(2k-1) \frac{\alpha - \beta}{2} \right] - \\ &- \frac{A_1 - A_2}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{u_{2k}}{2k} \sin \left[\varphi_{2k} + k(\alpha + \beta) \right] \sin \left[k(\alpha - \beta) \right]. \quad (1) \end{aligned}$$

Считаем α, β малыми в приближении конечного числа гармоник с амплитудами меньше U_1 и получаем следующие выражения:

$$\alpha = -\frac{U_0 + \sum_{k=2}^m U_k \sin \psi_k}{U_1 + \sum_{k=2}^m k U_k \cos \psi_k}$$

$$\beta = \frac{U_0 + \sum_{k=2}^m (-1)^k U_k \sin \psi_k}{U_1 + \sum_{k=2}^m (-1)^k k U_k \cos \psi_k}$$

В случае идеального СД ($A_1 = -A_2$, $\alpha = \beta = 0$) постоянная составляющая опорного сигнала $U_0 = 0$. В таком случае выходное напряжение СД определяется только вторым членом выражения (1), зависящим от нечётных гармоник входного сигнала. Постоянная составляющая и гармоники сигналов приводят к появлению сдвигов частоты.

Исследуем, что произойдет, если к собственным сигналам ПВСЧ примешиваются внешние наведённые помехи.

Вариант № 1. Рассмотрим действие аддитивной гармонической помехи на рабочий сигнал 5 МГц кварцевого генератора на входе в умножитель частоты с коэффициентом умножения $M=280$. Пусть помеха имеет частоту, близкую

$$f_n - f_r = \Delta_n / (2\pi) \leq 2 \cdot 10^{-4},$$

где f_r, f_n – частоты кварцевого генератора и помехи соответственно; Δ_n – отстройка угловой частоты помехи.

На выходе умножителя частоты кроме рабочего сигнала образуется сигнал с частотой отстройки $280\Delta_n/(2\pi)$.

Аналитически исследуем сумму двух гармонических колебаний с близкими частотами ω_1, ω_2 и в общем случае неравными амплитудами $B_1 > B_2$. Используем комплексное представление тригонометрических функций, перегруппируем члены и выполним обратное преобразование, в итоге запишем следующее выражение:

$$B_1 \cos \omega_1 t + B_2 \cos \omega_2 t = (B_1 - B_2) \cos \omega_1 t + 2B_2 \cos[t(\omega_2 - \omega_1)/2] \cos[t(\omega_2 + \omega_1)/2]. \quad (2)$$

В случае равенства амплитуд колебаний первый член правой части выражения становится равен нулю. В результате получим общеизвестную формулу, которая на языке теории колебаний означает классический режим «биений». В случае $B_1 \gg B_2$ вторым членом можно пренебречь, остаётся только основное колебание. В промежуточном случае реализуется режим, близкий к амплитудной модуляции основного колебания. Частота модуляции совпадает с частотой биений $(\omega_2 - \omega_1)/2$, а коэффициент модуляции равен $2B_2/B_1$.

Таким образом, в случае помехи реализуется описываемый формулой (2) случай паразитной амплитудной модуляции основного колебания. В силу близости преобразованной частоты помехи к несущей частоте сигнала возбуждения Н-мазера частота модуляции является очень малой, она не отфильтровывается системой частотной автоподстройки. В таком случае выходное напряжение СД (см. (1)) и сигнал ошибки оказываются амплитудно-модулированными с периодами паразитной модуляции $10-10^6$ с и более. Коэффициент модуляции будет зависеть от соотношения сигнал/помеха на входе в приёмник. Такой сигнал ошибки приведёт к появлению паразитной частотной модуляции выходного сигнала ПВСЧ с частотой паразитной модуляции $\omega_{\text{пар}} = 280\Delta_n$.

Вариант № 2. Рассмотрим случай, когда к модулированному сигналу возбуждения на входе приёмника подмешивается сигнал гармонической помехи. Если частота отстройки $\Delta_n/(2\pi) \leq 1$ Гц, то способ воздействия сходен с описанным выше вариантом. При больших отстройках интегратор, стоящий на выходе СД и являющийся фильтром низких частот, подавит сигнал модуляции, поскольку его частота меньше частоты среза.

Однако существует ещё один механизм воздействия помехи. Для упрощения описания индекс модуляции сигнала возбуждения примем $m \leq 1$, в таком случае можно ограничиться спектром, состоящим из трёх спектральных составляющих. После супергетеродинного приёмника сигналы возбуждения и помехи поступают на вход АД:

$$u_A = u_{A1} \sin[(\omega_{\text{пр}} - \omega_m)t + \varphi_1] + u_{A2} \sin(\omega_{\text{пр}} t + \varphi_2) + u_{A3} \sin[(\omega_{\text{пр}} + \omega_m)t + \varphi_3] + V_n \sin[(\omega_{\text{пр}} - 2\pi\Delta_n)t + \varphi_n],$$

где $u_{A1}, \dots, u_{A3}, V_n, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_n$ – амплитуды и начальные фазы спектральных составляющих сигнала возбуждения и помехи соответственно; $\omega_{\text{пр}}$ – угловое значение промежуточной частоты.

В ПВСЧ обычно применяется диодный АД с удвоением выходного напряжения [3]. Такие детекторы используют для повышения коэффициента передачи, но данную схему можно рассматривать как последовательное соединение двух АД (параллельного и последовательного).

Вольт-амперную характеристику диодов будем считать квадратичной:

$$I = a_1 u + a_2 u^2,$$

где a_1, a_2 – коэффициенты.

После несложных, но громоздких вычислений на входе в СД (выходе второго АД) на частоте модуляции получим дополнительные сигналы, обусловленные помехой и пропорциональные следующим выражениям:

$$a_2^3 V_n^2 u_{A2} u_{A1} \cos(\omega_m t + \varphi_1 - \varphi_2);$$

$$a_2^3 V_n^2 u_{A2} u_{A3} \cos(\omega_m t + \varphi_3 - \varphi_2).$$

Данные сигналы в соответствии с формулой (1) приведут к возникновению сдвига частоты ПВСЧ.

Для помехи на входе в приёмник ПВСЧ можно записать следующее соотношение:

$$V_n \propto E_n K_o / (K_k K_{кр}), \quad (3)$$

где E_n – напряжённость электрической составляющей поля помехи в области расположения ПВСЧ; K_k , $K_{кр}$ – коэффициенты экранирования кабелей и крышек корпуса, равные отношению амплитуд внешнего поля и поля внутри экранируемых областей; K_o – коэффициент ослабления помехи СВЧ-резонатором и другими избирательными цепями.

Оценка коэффициента экранирования [9] для кабелей РК50-2-25 даёт $K_k \approx 10^8 \dots 10^9$, для крышек корпуса стандарта при перфорации $K_{кр} \approx 10^6 \dots 10^3$ при частоте помехи 20–1420 МГц [10].

Считая резонансную кривую СВЧ-резонатора лоренцевской и добротность резонатора равной 10^4 , получим при частоте помехи 20–1320 МГц $K_o = 10^{-4} \dots 10^{-3}$. В действительности картина более сложная – сигнал помехи может проникать непосредственно на вход приёмника ПВСЧ, минуя резонатор. Дополнительное ослабление помехи связано также с избирательностью приёмопреобразующих цепей, например селективного усилителя.

При значительной (более 100 МГц) отстройке получим общий коэффициент ослабления помехи $K_o / (K_k K_{кр}) \approx 10^{-18} \dots 10^{-15}$ для разных частот. В полосе пропускания резонатора особенно вблизи спектральной линии Н-мазера ослабление помехи в формуле (3) значительно падает $K_o / (K_k K_{кр}) \approx 10^{-12}$.

Оценим, к какому сдвигу частоты может приводить действие гармонической помехи. Согласно [7] для напряжений на выходах СД при малых отстройках кварцевого генератора и резонатора для случая без помех можно записать следующие уравнения:

$$\begin{cases} U_{C1} = S_{11} M \Delta \omega_r + S_{12} \Delta \omega_{рез}; \\ U_{C2} = S_{21} M \Delta \omega_r + S_{22} \Delta \omega_{рез}, \end{cases}$$

где S_{ij} – крутизны дискриминационных характеристик Н-мазера при отстройках кварцевого генератора и резонатора; $\Delta \omega_r$, $\Delta \omega_{рез}$ – отстройки угловой частоты кварцевого генератора и резонатора.

Пусть напряжение помехи U_n аддитивно появится в канале 2 – канале управления резонатором. Данная ситуация является более вероятной, поскольку в общем случае помеха имеет отстройку от спектральной линии Н-мазера и не будет им усиливаться. Система частотной автоподстройки работает таким образом, чтобы напряжение на выходах СД равнялось нулю. Фазируем кольца управления частотой резонатора выполним таким образом, чтобы $S_{21} = 0$. В этом случае, разрешая систему уравнений относительно отстройки кварцевого генератора, получим

$$\Delta \omega_r = S_{12} U_n / (S_{11} S_{22} M).$$

Поскольку отстройка кварцевого генератора является отстройкой частоты ПВСЧ, то для $V_n = 0,1$ мВ при типичных значениях $S_{12} / (S_{11} S_{22}) \approx 1 \cdot 10^{-5}$ В/Гц на частоте 5 МГц имеем относительный сдвиг частоты, равный $1,1 \cdot 10^{-9}$.

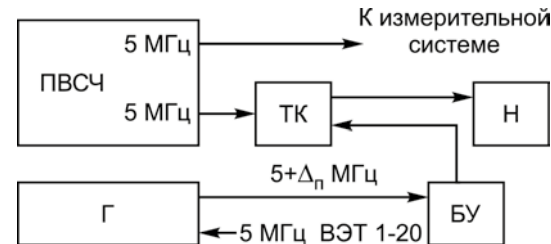


Рис.1. Первая схема измерений помехоустойчивости: ПВСЧ – пассивный водородный стандарт частоты; ТК – токоизмерительные клещи; Н – согласованная нагрузка; Г – генератор; БУ – буферный усилитель

Экспериментальная проверка. Экспериментальную оценку степени помехоустойчивости ПВСЧ (модель Ч1-76Б) проводили в два этапа и в соответствии с [11]. На частотах ниже 30 МГц доминирующим методом связи электромагнитного поля помех и стандартов частоты является воздействие на подключенные кабели, поэтому на первом этапе исследования применяли схему измерений, показанную на рис. 1. Использовали два выхода ПВСЧ Ч1-76Б. На кабель одного из выходов с помощью токоизмерительных клещей SMZ-11 наводилась помеха от генератора синусоидальных сигналов. Генератор был синхронизован с Вторичным эталоном единицы частоты ВЭТ 1–20. Для исключения переотражений к концу кабеля была подключена согласованная нагрузка. Для увеличения развязки применяли дополнительный буферный усилитель. Сигнал со второго выхода ПВСЧ Ч1-76Б подавали на измерительную систему из состава ВЭТ 1–20.

Когда мощность помехи в первом кабеле превысила –20 дБм, частота сигнала второго выхода ПВСЧ Ч1-76Б стала испытывать регулярные колебания – сигнал стал частотно-модулированным. При увеличении мощности помехи увеличивался размах (индекс) паразитной модуляции, при уменьшении отстройки помехи – уменьшалась частота модуляции. Присутствие паразитной модуляции увеличивает нестабильность частоты выходного сигнала. Причём нестабильность максимальна, когда интервал времени измерений $\tau = n\pi / \omega_{пар}$, где n – целое число.

На рис. 2 представлена зависимость частоты паразитной модуляции выходного сигнала ПВСЧ Ч1-76Б от частоты отстройки помехи. При мощности помехи в первом кабеле 0 дБм размах модуляции составляет приблизительно $1 \cdot 10^{-13}$ отн. ед. Линия аппроксимации является линейной с достаточной точностью и коэффициентом пропорциональности около 278,8, близким к коэффициенту умножения. Это подтверждает механизм, описываемый формулой (2).

Экспериментальное исследование [12] показало, что размах паразитной модуляции частоты выходного сигнала ПВСЧ Ч1-76Б уменьшается приблизительно на порядок при уменьшении мощности помехи на 20 дБ. В таком случае при современном уровне развязки буферных усилителей Ч1-76Б (–70 дБ) для достижения нестабильности на уровне $1 \cdot 10^{-15}$ мощность помехи частотой 5 МГц в кабелях не должна превышать –50 дБм. Для дальнейшего улучшения характеристик следует увеличивать до –100...–120 дБ ко-

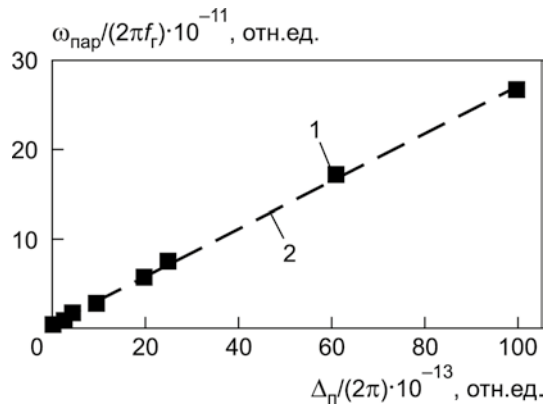


Рис. 2. Зависимость частоты $\omega_{\text{пар}}$ паразитной модуляции выходного сигнала Ч1-76Б от отстройки помехи:
1 – экспериментальные данные; 2 – линия аппроксимации

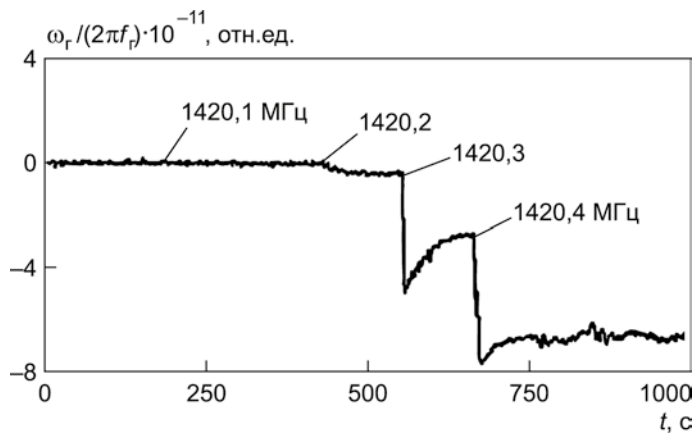


Рис. 3. Зависимость отстройки частоты Ч1-76Б со снятыми крышками корпуса от времени t при воздействии гармонической помехи различной частоты

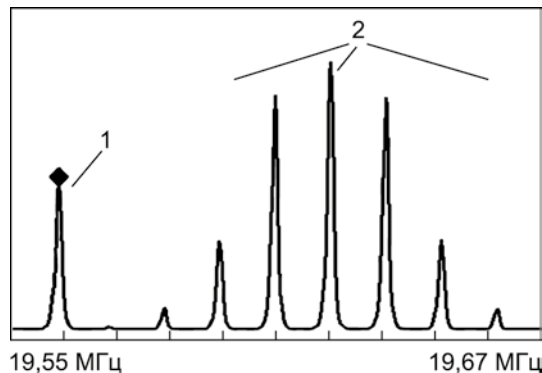


Рис. 4. Спектр гармонических составляющих на выходе усилителя промежуточной частоты:
1, 2 – сигналы помехи и возбуждения ПВСЧ соответственно

эффицент развязки между каналами, а также между входом и выходом в буферном усилителе ПВСЧ.

На втором этапе проверки исследовали воздействие некогерентных гармонических помех. Напротив антенны-излучателя на расстоянии 5 м размещали измерительную антенну, с помощью которой при двух её ортогональных поляризациях оценивали напряжённость электрической составляющей излучаемого поля помехи. Использовали калиброванные антенны ДР-3 дипольного типа. Был исследован диапазон частот 100–1421 МГц. Далее на место измерительной антенны устанавливали ПВСЧ Ч1-76Б на диэлектрической подставке. У стандарта были сняты крышки корпуса. Измерительную систему (в первом случае анализатор спектра, во втором случае – система из состава ВЭТ 1–20) размещали в экранированном помещении.

Допустим, что используемая антенна имеет идеальную линейную поляризацию, тогда для перехода от измеренного напряжения на входе приёмника к напряжённости электрической составляющей измеряемого поля применим следующую формулу [9]:

$$E \approx (U_1 + U_2) + K_{\text{пр}} + A_3,$$

где U_1, U_2 – напряжения, измеренные приёмником при двух ортогональных положениях антенны; $K_{\text{пр}}$ – коэффициент преобразования измерительной антенны; A_3 – затухание в антенном тракте приёмника.

Исследования электромагнитной обстановки в помещениях с комплексами частотно-временной аппаратуры, таких как ВЭТ 1–20, эталонные комплексы групповых хранителей частоты Ч0-110, Ч0-111 и УСЧ [12] показали, что максимальное значение E будет внутри объёма стоек аппаратуры и при этом не превысит 90 дБмкВ/м. Поэтому в качестве базового значения помехи выберем $E_{\text{п}} = 100$ дБмкВ/м.

На рис. 3, 4 представлены результаты облучения ПВСЧ Ч1-76Б электромагнитным полем разных частот с напряжённостью электрической составляющей 100 дБмкВ/м. На рис. 3 изображена зависимость частоты Ч1-76Б от времени при воздействии гармонической помехи, включённой через 200 с и дискретно перестраиваемой по частоте. Динамика процесса установления сдвига частоты занимает десятки секунд. Большая постоянная времени говорит о том, что отрабатывает кольцо управления частотой СВЧ-резонатора. На частоте 1420,4 МГц происходит увеличение нестабильности ПВСЧ.

На рис. 4 показано появление помехи на частоте 19,5656 МГц рядом с сигналом возбуждения на выходе усилителя промежуточной частоты. Частота излучаемого сигнала помехи составляла 1420,4344 МГц. Это означает, что сигнал помехи поступал на вход супергетеродинного приёмника ПВСЧ и происходило преобразование частоты.

Как показало исследование, некогерентные помехи также вызывают сдвиги частоты стандарта. Данный эффект тем более выражен, чем их частота ближе к частоте Н-мазера. Полученные результаты накладывают жёсткие ограничения на экранировку стандарта. Измерения в полосе пропускания СВЧ-резонатора позволили определить, что эффективность экранирования при установке приборных крышек корпуса в ПВСЧ Ч1-76Б увеличивается примерно на 27 дБ.

При конструировании прибора следует стремиться к тому, чтобы внешний корпус был эффективным экраном. При разработке системы, включающей в себя ПВСЧ, необходимо обращать внимание на электромагнитную обстановку и по возможности избегать применения частот $(1420,4 \pm 1,0)$ МГц.

Выводы. Рассмотрены варианты влияния гармонической помехи на метрологические характеристики ПВСЧ. Показано, что дополнительные сигналы, зависящие от мощности помехи на входе в приёмник ПВСЧ, приводят к возникновению сдвига частоты ПВСЧ, а в случае малой отстройки частоты помехи вызывают появление паразитной модуляции частоты ПВСЧ. Мощность помехи на входе в приёмник ПВСЧ зависит от частоты помехи, напряжённости электрической составляющей поля помехи в окружающем прибор пространстве, коэффициента экранирования, коэффициента ослабления помехи СВЧ-резонатором и другими избирательными цепями, а также степени развязки выходных буферных усилителей.

Литература

1. Xie Y., Chen P., Shuai T. et al. Characteristics of Space Mini Passive Hydrogen maser in Shanghai Astronomical Observatory // Proc. Frequency and Time Forum and IEEE Intern. Frequency Control Symposium, Besançon, France, 2017. P. 607–611.
2. Васильев В. И., Козлов С. А. Тонкая настройка параметров пассивного водородного стандарта частоты и времени для улучшения стабильности частоты выходного сигнала // Метрология времени и пространства: Материалы VII Междунар. симпозиума. Менделеево: ВНИИФТРИ, 2014. С. 70–75.
3. Колосовский Е. А. Устройства приема и обработки сигналов. М: Горячая линия-Телеком, 2012.

4. Васильев В. И. Исследование предельной кратковременной нестабильности частоты выходного сигнала пассивного водородного стандарта частоты // Измерительная техника. 2016. № 9. С. 25–29.

5. Васильев В. И., Пашев Г. П. Анализ нестабильности частоты сигнала группы высокостабильных генераторов // Измерительная техника. 2017. № 8. С. 43–45.

6. Нарезний А. П., Чинков В. Н. Исследование режимов взаимодействия прецизионных мер частоты с близкими частотами // Авиационно-космическая техника и технология. 2005. № 5. Вып. 21. С. 52–56.

7. Логачев В. А. Исследование стабильности пассивного водородного стандарта частоты // Техника средств связи. Сер. РИТ. 1986. Вып. 1. С. 30–36.

8. Гительсон В. Д. Определение погрешности синхронных детекторов // Измерительная техника. 1977. № 10. С. 65–66.

9. Уилльямс Т. Электромагнитная совместимость для разработчиков продукции. М.: Издательский дом «Технологии», 2003.

10. Барнс Дж. Электронное конструирование: методы борьбы с помехами. М.: Мир, 1990.

11. ГОСТ 30804.4.3–2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к радиочастотному электромагнитному полю. Требования и методы испытаний.

12. Беленов Ю. Д., Васильев В. И., Козлов С. А., Логачев В. А. Квантовые водородные стандарты частоты и эталонные комплексы на их основе // Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение: Материалы всерос. конф. СПб.: ИПА РАН. 2011. С. 47–49.

Дата принятия: 23.08.2018.

Noise immunity of passive hydrogen frequency standard

V. I. Vasilyev

Institute of Electronic Measurements KVARZ, Nizhny Novgorod, Russia, e-mail: vvladich@yandex.ru

The analysis of influence of harmonic interference on metrological characteristics of the passive hydrogen frequency standard is provided. It is shown that additional signals in control circuits caused by harmonic interference will lead to frequency shift or to parasitic modulation of frequency of the standard. Methods for increasing noise immunity are considered. Experimental results confirming the theoretical analysis are described.

Key words: hydrogen frequency and time standard, frequency instability, noise immunity, noise shielding.