621.373.82

Физическая модель систематического изменения частоты выходного сигнала водородных стандартов частоты и времени

В. И. ВАСИЛЬЕВ

Нижегородский научно-исследовательский приборостроительный институт «Кварц» им. А. П. Горшкова, Н. Новгород, Россия, e-mail: kvarz_asu@ kvarz.com

Рассмотрена физическая модель систематического изменения частоты выходного сигнала водородного стандарта частоты и времени. Дано сравнение результатов теоретического исследования и многолетних измерений дрейфа частоты стандартов. Доказано, что дрейф может изменять свой знак. Мониторинг параметров водородного генератора позволяет прогнозировать поведение его частоты.

Ключевые слова: *водородный стандарт частоты и времени, дрейф частоты сигнала, время релаксации, автоматическая настройка частоты резонатора, добротность спектральной линии.*

The physical model of hydrogen maser systematic frequency drift is discussed. Results of theoretical research are compared with results of experiments and long-term practical observations over drift of a hydrogen maser. One of conclusions of research is the statement that drift can change the value and a sign. The model allows to predict behavior of maser frequency with the help of maser parameters monitoring.

Key words: *hydrogen maser, frequency drift, relaxation time, cavity auto tuning, quality factor of the spectral line.*

Одна из основных метрологических характеристик водородных стандартов частоты и времени (ВСЧ) как активного, так и пассивного типа — систематическое изменение (дрейф) частоты выходного сигнала. Его минимизация и прогнозирование остаются важной задачей [1—3]. С этим тесно связана экспериментальная оценка невозмущенной частоты сверхтонкого перехода атома водорода, которая для ВСЧ на основе квантовых водородных генераторов определена f_{1-0} = (1420405751,770 ± 0,003) Гц [4], что соответствует погрешности ± ($2\cdot10^{-12}$) в относительных единицах. Одна из главных причин погрешности связана с неопределенностью стеночного сдвига частоты водородного генератора.

Результаты долговременных экспериментов и многолетних измерений дрейфа частоты стандартов показывают, что дрейф может иметь разный знак и даже изменять его в течение эволюции [5]. Данные факты осложняют понимание этого явления, так как противоречат интуитивно ожидаемому представлению об экспоненциальном уменьшении дрейфа со временем.

Ранее были высказаны предположения о природе дрейфа, но они носили или качественный [4], или статистически-описательный характер [1—3, 6—7]. Например, в [1, 2] отмечено, что дрейф частоты характеризуется постоянным коэффициентом относительного линейного изменения, а в [3] к нему добавлена медленно меняющаяся случайная составляющая.

Двухуровневая квантовая система. Здесь рассмотрена возможность теоретического описания эволюции частоты ВСЧ. Анализ эволюции основан на использовании решения системы дифференциальных уравнений атомного ансамбля водородного генератора как двухуровневой квантовой системы [4]:

$$\left.\begin{aligned}
&\frac{d^2H}{dt^2}+\frac{\omega_р}{Q_р}\frac{dH}{dt}+\omega_р^2H=K\frac{d^2M}{dt^2};\\
&\frac{d^2M}{dt^2}+\frac{\omega_л}{Q_л}\frac{dM}{dt}+\omega_л^2M=\frac{2\mu_B^2\omega_л\Delta NH}{\hbar};\\
&\frac{d\Delta N}{dt}+\frac{1}{T_1}(\Delta N-\Delta N_0)=-\frac{2H}{\hbar\omega_л}\frac{dM}{dt},
\end{aligned}\right\}\qquad(1)$$

где H — напряженность магнитной составляющей сверхвысокочастотного (СВЧ) поля в резонаторе; $\omega_р$, $Q_р$ — круговая резонансная частота и нагруженная добротность СВЧ-резонатора; $K=\mu_0\mu_B^2\eta/(\hbar V_р)$; μ_0 — магнитная постоянная; μ_B — магнетон Бора; η — коэффициент заполнения резонатора; $\hbar$ — постоянная Планка; $V_р$ — объем СВЧ-резонатора; $M = N(\rho_{12} + \rho_{21})$ — намагниченность активной среды в накопительной колбе; N — общее количество атомов; ρ_{ij} — элементы матрицы плотности; $\omega_л$, $Q_л$ — круговая частота и добротность линии перехода; $\Delta N = N(\rho_{22} - \rho_{11})$ — разность населенностей верхнего и нижнего уровней, ΔN_0 — их начальная разность; T_1 — продольное время релаксации ансамбля атомов.

Вынужденное решение системы ищем в виде

$$H(t) = H_0(t)\sin[\omega t+\phi(t)];\quad M(t) = M_0(t)\sin[\omega t+\psi(t)],$$

где $H_0(t)$, $M_0(t)$, $\phi(t)$, $\psi(t)$ — медленно меняющиеся функции времени по сравнению с ωt, и поэтому любую из величин $dH(t)/(\omega dt)$, ..., $d\psi(t)/(\omega dt)$ можно рассматривать как малый параметр. После дифференцирования выражений по времени результат подставляем в (1) и, ограничиваясь членами

первого порядка малости, для медленно меняющихся составляющих получаем систему укороченных дифференциальных уравнений первого порядка:

$$\left.\begin{aligned}
&\left(2Q_{\text{р}}/\omega_{\text{р}}\right)db_{\text{R}}/dt+b_{\text{R}}=KQ_{\text{р}}M_0\cos\vartheta;\\
&T_2\,dM_0/dt+M_0=T_2\Delta Nb_{\text{R}}\cos\vartheta;\\
&T_1\,d\Delta N/dt+\Delta N=-T_1b_{\text{R}}M_0\cos\vartheta+T_1I;\\
&d\psi/dt=\omega_{\text{л}}-\omega+\left(\Delta N/M_0\right)b_{\text{R}}\sin\vartheta;\\
&d\phi/dt=\omega_{\text{р}}-\omega-\left[K\omega_{\text{р}}/\left(2b_{\text{R}}\right)\right]M_0\sin\vartheta,
\end{aligned}\right\}\qquad(2)$$

где $\vartheta=\phi-\psi$ — разность фаз между магнитной составляющей СВЧ-поля и намагниченностью активной среды; $b_{\text{R}} = \mu_{\text{в}}H_0/\hbar$ — частота Раби; T_2 — поперечное время релаксации ансамбля атомов; I — поток водорода в накопительную колбу.

Система сложна, ее точное аналитическое решение неизвестно, поэтому ограничиваемся приближением «стационарного режима», при котором все производные по времени принимаем равными нулю, а амплитуды и фазы — достигшими стационарных значений. Данное приближение общепринято, но получаемые при решении амплитудные и фазовые соотношения квантового ансамбля водородного генератора не содержат динамики. Это означает, что в приближении пренебрегают, в частности, дрейфовой составляющей частоты.

Эволюция частоты выходного сигнала ВСЧ. В соответствии с [8] под изменением частоты двухуровневой квантовой системы, находящейся в околорезонансном гармоническом электромагнитном поле, понимаем асимптотическое решение уравнения

$$\Delta\omega_{\text{c}}\equiv d\vartheta/dt=d\phi/dt-d\psi/dt.$$

Из укороченных уравнений водородного мазера (2) можно получить уравнение, зависящее от времени:

$$\Delta\omega_{\text{c}}(t)=\Delta\omega_{\text{р}}(t)-\left(K\omega_{\text{р}}\frac{M_0(t)}{2b_{\text{R}}(t)}+\Delta N(t)\frac{b_{\text{R}}(t)}{M_0(t)}\right)\sin\overline{\vartheta},$$

где $\Delta\omega_{\text{р}}$ — расстройка между собственной частотой резонатора и частотой квантового перехода; $M_0(t)$ — амплитуда намагниченности активной среды в накопительной колбе; $\overline{\vartheta}$ — усреднение по времени.

Для дальнейшего уточнения модели используем соотношения, полученные в приближении «стационарного режима» [4]. Для нетривиального решения полагаем $\sin(\overline{\vartheta})\approx\pm 0$. Это соотношение выполняется, когда собственная частота резонатора очень близка к частоте спектральной линии водорода, что можно показать в явном виде, если ввести малый параметр $0 < \varepsilon << 1$. Получаем выражение

$$\Delta\omega_{\text{c}}(t)=\Delta\omega_{\text{р}}(t)\pm\varepsilon\left(\frac{1}{T_2(t)}+\frac{K\omega_{\text{р}}}{2}\frac{T_1(t)T_2(t)I(t)}{1+T_1(t)T_2(t)b_{\text{R}}^2(t)}\right).\qquad(3)$$

Из (3) следует, что долговременные изменения частоты определяются медленными изменениями во времени основных параметров. Самый важный из них — зависимость от расстройки резонатора. Изменение частоты резонатора непосредственно отслеживается частотой стандарта через эффект затягивания спектральной линии. Остальные параметры влияют значительно слабее, на это указывает малый параметр ε, стоящий перед скобкой.

Чтобы воспользоваться решением для нахождения эволюции частоты, необходимо знать, как изменяются наблюдаемые величины T_1, T_2, I, b_{R}. Если известна добротность $Q_{\text{л}}$ спектральной линии водорода при пороговом потоке атомов, то можно принять $T_{2\text{–п}}\approx 2Q_{\text{л}}/\omega_{\text{л}}$, а для большего потока атомов

$$T_1\approx(\chi+2\beta KQ_{\text{р}}I)^{-1},\quad T_2\approx(\chi+\beta KQ_cI)^{-1},$$

где χ, β — параметры.

Анализ полученного решения. В условиях корректной работы системы автоматической настройки резонатора будем полагать $\Delta\omega_{\text{р}}\approx 0 = \text{const}$. Тогда (3) с точностью до постоянного множителя примет вид

$$\Delta\omega_{\text{c}}(t)=\frac{K\omega_c}{2}\frac{T_1(t)T_2(t)I(t)}{1+T_1(t)T_2(t)b_{\text{R}}^2(t)}+\frac{1}{T_2(t)}.\qquad(4)$$

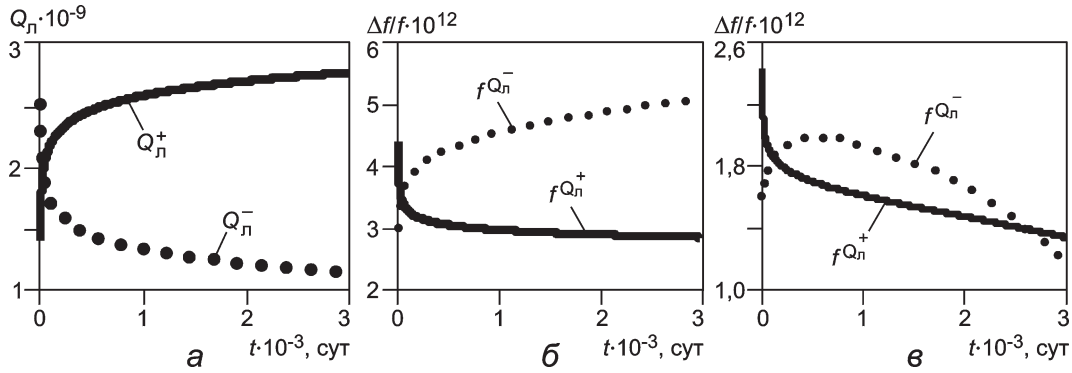

Рис. 1. Модельные зависимости:

а — добротности спектральной линии от времени; *б* — относительной частоты ВСЧ от времени при изменении добротности; *в* — относительной частоты ВСЧ от времени при изменении добротности и уменьшении потока водорода

Проанализируем полученное решение.

Вариант № 1. Пусть все параметры в (4) остаются постоянными. Тогда частота квантовой системы также остается постоянной.

Вариант № 2. Будем считать, что поток водорода постоянен и, следовательно, T_1, T_2 также постоянны. Частоту Раби возьмем из приближения «стационарного режима»:

$$b^2_{R\,\text{ст}} = KQ_\text{р}I - \left(T_1T_2\right)^{-1}.$$

На сверхдлительных промежутках времени (годы) в полимере, которым покрыты стенки накопительной колбы, происходят процессы, вызывающие изменения структуры и состава. Это проявляется в изменении добротности спектральной линии. Многолетние исследования показали, что добротность спектральной линии может изменяться, во-первых, из-за деградации покрытия накопительной колбы и ухудшения добротности линии, а во-вторых, в связи с очищением поверхности и соответственно увеличением $Q_л$.

Пусть добротность линии при пороговом потоке атомов изменяется со временем (увеличивается или уменьшается) и подчиняется соотношению

$$Q_л = Q_{л0} + a\,\lg t,$$

где $Q_{л0}$, a — параметры.

Характер изменения добротности при $Q_л = 1{,}8 \cdot 10^9$, $a = \pm(3{,}9 \cdot 10^8)$ показан на рис. 1, *а*. Результаты вычислений в условиях изменения добротности линии при $KQ_р = 5{,}1 \cdot 10^{-10}$, $I = 3 \cdot 10^{12}$ приведены на рис. 1, *б*. В отличие от варианта на рис. 1, *а* частота водородного генератора изменяется со временем, при этом с увеличением добротности линии частота уменьшается и наоборот.

Вариант № 3. По-прежнему полагаем поток водорода постоянным. Введем феноменологическое предположение. Примем, что $b'_R = zb_{R\,\text{ст}}$, $z = \text{const} < 1$. Это значит, что частота Раби b'_R будет отличаться от $b_{R\,\text{ст}}$, полученной в приближении «стационарного режима», постоянным множителем. Предположение связано с тем, что в таком приближении неявно считается, что все атомы успевают отдать квант энергии, и при этом ни один атом не успевает получить квант обратно. Это не соответствует действительности. Результаты моделирования показывают, что в этом случае при возрастании $Q_л$ дрейф несколько увеличивается, а при убывании меняет знак.

Вариант № 4. В современных моделях ВСЧ при напуске через очиститель поток водорода подчиняется соотношению [5]:

$$I = L_\text{оч}\sqrt{p_{H_2}}\,\exp\left\{-E_д / T\right\}, \qquad (5)$$

где $L_\text{оч}$ — константа, определяемая геометрическими размерами очистителя; p_{H_2} — давление в аккумуляторе водорода; $E_д$ — энергетическая характеристика диффузии водорода в никеле; T — температура трубки очистителя.

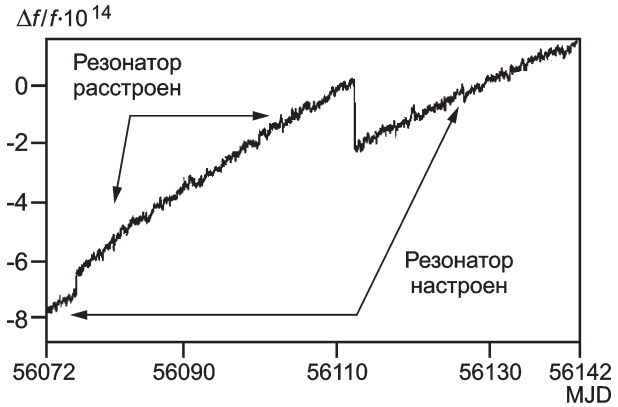

Рис. 2. Эволюция частоты выходного сигнала Ч1-75Б с настроенным и расстроенным на +40 Гц СВЧ-резонатором

При работе стандарта происходит расход водорода, поэтому его давление со временем уменьшается, и в соответствии с (5) поток водорода в накопительную колбу ослабевает.

В дополнение к варианту № 3 примем, что за весь рассматриваемый отрезок времени поток водорода линейно уменьшился в три раза. Результаты моделирования при возрастании и убывании $Q_л$ в случае $z = 0{,}97$ приведены на рис. 1, *в*. При убывании $Q_л$ инверсия знака дрейфа частоты сохраняется, и в конце указанного интервала времени наблюдается ускорение дрейфа. Результаты моделирования показывают важность постоянства потока водорода.

Результаты эксперимента. Внутренняя поверхность накопительной колбы водородных генераторов, изготовленных в ННИПИ «Кварц», покрывается фторопластами марки Ф4-мд(б) разных модификаций и Ф-10. Марка Ф-10 предпочтительнее, поскольку, как показано в таблице, при этом достигаются более высокие метрологические характеристики.

Характеристики ВСЧ с разными марками фторопластового покрытия накопительной колбы

Марка фторопласта	$Q_л$ при пороговом пучке	Сдвиг частоты из-за столкновений со стенкой при T = 50 °С	Воспроизводимость сдвига от стандарта к стандарту
Ф4-мд(б)	$1{,}5 \cdot 10^9$	$-1{,}9 \cdot 10^{-11}$	$\pm(2 \cdot 10^{-12})$
Ф-10	$2{,}6 \cdot 10^9$	$-2{,}9 \cdot 10^{-12}$	$\pm(5 \cdot 10^{-13})$

По данным экспериментальных исследований для фторопласта Ф-10 характерно, что с течением времени $Q_л$ при потоке атомов водорода, близком к пороговому, уменьшается [5]. Особенно быстро добротность изменяется вначале. Данное явление нельзя представить как простую деградацию фторопласта, так как мощность генерации при этом возрастает.

Для проверки гипотезы об уменьшении дрейфа, когда собственная частота резонатора близка к частоте спектральной линии водорода $\left(\sin\bar{\vartheta} \approx \pm 0\right)$, использовался стандарт

новой модели Ч1-75Б. В этой модели можно настраивать резонатор с регулируемой (задаваемой) точностью. На рис. 2 представлен график эволюции частоты выходного сигнала Ч1-75Б с настроенным и расстроенным на +40 Гц резонатором. После расстройки резонатора частоту выходного сигнала ВСЧ сместили (скорректировали) на $\Delta f/f = -1 \cdot 10^{-12}$. Как следует из графика, после расстройки резонатора дрейф увеличился в 1,5 раза с $1{,}3 \cdot 10^{-15}$ до $1{,}9 \cdot 10^{-15}$ сут$^{-1}$. Через 38 суток резонатор был вновь настроен, корректор частоты возвращен в первоначальное состояние. Дрейф частоты вернулся к прежнему значению.

Выводы. Основной причиной систематического изменения частоты выходного сигнала активного водородного стандарта частоты и времени является эволюция времени релаксации квантовой системы, которая связана с ослаблением потока водорода, изменениями добротности спектральной линии и амплитуды генерации водородного генератора. Минимизация дрейфа частоты ВСЧ может быть достигнута уменьшением изменений параметров работы водородного генератора, например стабилизацией потока водорода. Дрейф возрастает при увеличении остаточной расстройки между частотами СВЧ-резонатора и спектральной линии водорода. Предложена физическая модель, которая на основании мониторинга параметров водородного генератора позволяет прогнозировать дальнейшее поведение его частоты.

Литература

1. **Logachev V. A., Pashev G. P.** Estimation of linear frequency drift coefficient of frequency standards // Proc. IEEE Intern. Frequency Control Symp. Honolulu (USA), 1996. P. 960—963.

2. **Пашев Г. П.** Погрешность определения коэффициента линейного изменения и постоянного отклонения частоты высокостабильных генераторов по радиосигналам космических навигационных систем // Измерительная техника. 2011. № 5. С. 42—46; **Pashev G. P.** The error in determining the linear frequency drift coefficient and constant frequency deviation of highly stable oscillators by the radio signals of spase navigation systems // Measurement Techniques. 2011. V. 53. N. 5. P. 536—543.

3. **Смирнов Ю. Ф.** Оценка погрешности хранения шкалы времени водородных стандартов с учетом систематических изменений частоты // Измерительная техника. 2007. № 3. С. 42—45; **Smirnov Yu. F.** Estimation of errors of hydrogen standards time scale preservation taking into account systematic frequency changes // Measurement Techniques. 2007. V. 50. N. 3. P. 293—297.

4. **Audoin C., Vanier J.** The quantum physics of atomic frequency standards. Bristol, Philadelphia: IOP Publ., 1989. V. 2.

5. **Васильев В. И., Гаврилов В. В.** Исследование систематического изменения частоты выходного сигнала активных водородных стандартов частоты и времени // Метрология пространства и времени: Материалы 6 Междунар. симп. Менделеево, ВНИИФТРИ, 2012. С. 141—147.

6. **Peters H. E. e. a.** Experimental frequency phase stability of the hydrogen maser standard output as affected by cavity autotuning // Proc. 46 Ann. Symp. Frequency Control. Hershey (USA), 1992. P. 92—103.

7. **Matsakis D., Koppang P., Garvey R. M.** The long-term stability of the U.S. Naval observatory's masers // Proc. 36 Ann. Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting. Washington (USA), 2004. P. 411—421.

8. **Chirkov A. G., Pestov E. N.** New results of the investigations of the nature of the long term instability in quantum frequency standards and magnetometers. Non removable resonance drift // Proc. 16 Europ. Frequency and Time Forum. St.-Petersburg (Russia), 2002. P. E63—66.

Дата принятия 10.12.2013 г.