

Yurek A. M., Tveten A. B. Interferometric measurement of low-frequency phase noise characteristics of diode laser-pumped Nd: YAG ring laser // Electronics Lett. 1989. V. 25. P. 774–776. DOI: 10.1049/el:19890523.

8. Meng Z., Hu Y., Xiong S., Stewart G., Whitenett G., Culshaw B. Phase noise characteristics of a diode-pumped Nd: YAG laser in an unbalanced fiber-optic interferometer // Appl. Opt. 2005. V. 44. No. 17. P. 3425–3428. DOI: 10.1364/AO.44.003425.

9. Pnev A. B., Stepanov K. V., Dvoretzkiy D. A., Zhirnov A. A., Nesterov E. T., Sazonkin S. G., Chernutsky A. O., Shelestov D. A., Fedorov A. K., Svelto C., Karasik V. E. Minimization of errors in narrowband laser phase noise measurements based on reference measurement channels // Intern. J. Advanced Biotechnology and Research. 2016. V. 7. No. 4. P. 1445–1451.

Дата принятия: 03.11.2017.

ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ

621.373.82

Минимизация нестабильности водородных стандартов частоты на длительных интервалах времени

В. И. ВАСИЛЬЕВ

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

Приведён обзор результатов исследований нестабильности частоты выходного сигнала водородного стандарта частоты. Рассмотрены причины увеличения нестабильности в интервалах измерения более 1000 с. Исследовано влияние температуры окружающей среды и геомагнитного поля. Изложена методика компенсации дрейфа частоты с помощью периодической коррекции.

Ключевые слова: водородный стандарт частоты, водородный мазер, нестабильность частоты, температурный коэффициент частоты, дрейф частоты.

The review of research results of frequency instability of the hydrogen frequency standard output signal is presented. The reasons for increasing instability in the measurement interval more than 1000 s are considered. Dependences on ambient temperature and geomagnetic field are investigated. The procedure of the frequency drift compensation by using a periodic correction is presented.

Key words: hydrogen frequency standard, hydrogen maser, frequency instability, temperature coefficient of frequency, frequency drift.

В ряду серийно выпускаемых высокостабильных генераторов водородный стандарт частоты (ВСЧ) обладает высочайшей стабильностью частоты выходного сигнала в интервалах времени измерения τ от 1 с до нескольких суток. Основой ВСЧ является водородный мазер (Н-мазер) в режимах генерации или усиления, поэтому стандарты данного типа называют либо активными (АВСЧ), либо пассивными (ПВСЧ). Они входят в состав Государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1–2012, вторичных и рабочих эталонов, а также применяются для проверки или синхронизации различных источников электрических колебаний.

Для ряда практических применений ВСЧ наиболее важна долгосрочная нестабильность частоты выходного сигнала. Например, в настоящее время в рамках Федеральной целевой программы «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012–2020 годы» поставлена задача разработки хранителя единицы времени и частоты со средне-

квадратическим относительным двухвыборочным отклонением (СКДО) на уровне $1\text{--}2 \cdot 10^{-16}$ при интервалах времени измерения более 10^5 с.

Предельная нестабильность частоты ВСЧ. Фундаментальной причиной нестабильности частоты Н-мазера при $\tau \geq 100$ с является тепловое излучение стенок СВЧ-резонатора в возбуждаемую моду. Существующая оценка долговременного СКДО частоты для АВСЧ связана с характеристиками спектральной линии Н-мазера [1]:

$$\sigma(\tau) = (1/Q_n) \sqrt{kT_p / (2P_a \tau)},$$

где Q_n – добротность спектральной линии водорода; k – постоянная Больцмана; T_p – абсолютная температура СВЧ-резонатора мазера; P_a – мощность индуцированного излучения атомов водорода, рассеиваемая в резонаторе.

На основании уточнённого рассмотрения продольной и поперечной релаксаций квантовой системы в [2, 3] была получена

более детализированная формула оценки СКДО частоты для Н-мазера:

$$\sigma(\tau) = \frac{1}{\sqrt{\tau}} \sqrt{\frac{kT_p \mu_0 \mu_B^2 \eta Q_{\min} T_1}{\pi^3 f_n^3 \hbar^2 V_p} \frac{T_1}{T_2} \left(\frac{18q - 5 + \Psi N_{\text{ст}} T_2^2 \Theta^2}{72q^2 + 18q - 5 + \Psi N_{\text{ст}} T_2^2 \Theta^2} \right)}, \quad (1)$$

где f_n – частота спектральной линии; μ_0 – магнитная постоянная вакуума; μ_B – магнетон Бора; η – фактор заполнения; $\hbar$ – постоянная Планка; T_1 , T_2 – продольное и поперечное времена релаксации ансамбля атомов, соответственно; Ψ – вероятность некогерентного перехода атома за одно столкновение; $N_{\text{ст}}$ – количество столкновений; Θ – нормировочный коэффициент; $q \propto T_k V_p I_{\text{обш}} / (V_k Q_p I_a)$ – параметр качества Н-мазера; T_k – время пребывания атомов в накопительной колбе; V_p , V_k – объём резонатора и накопительной колбы, соответственно; Q_p , $Q_{\min}$ – добротность резонатора и минимальная добротность резонатора, при которой лазер при любом потоке водорода не может перейти в генерирующий режим; I_a , $I_{\text{обш}}$ – интенсивность потока атомов водорода в возбуждённом состоянии и общая интенсивность потока атомов водорода.

Анализ выражения (1), проведённый в [3], показал, что минимум СКДО частоты наблюдается при минимальных значениях η , $I_{\text{обш}}/I_a$ и максимальных Q_p , V_k . При этом для Н-мазера с цилиндрическим резонатором значения параметров следующие: $V_k = 3,5$ л, $\eta = 2,5$; $Q_p = 4,5 \cdot 10^4$; $T_k \approx 0,65$ с; $I_{\text{обш}}/I_a \approx 2$; $\Psi \approx 2,2 \cdot 10^{-5}$. При этом предельное СКДО частоты АВСЧ составит примерно $3,1 \cdot 10^{-14} / \sqrt{\tau}$ и $1,0 \cdot 10^{-16}$ за сутки. При условии осуществления полной двойной сортировки атомов $I_{\text{обш}}/I_a \approx 1$, при этом предельное СКДО частоты составит $\approx 2,8 \cdot 10^{-14} / \sqrt{\tau}$ и $9,5 \cdot 10^{-17}$ за сутки.

Предельная нестабильность частоты ПВСЧ подробно рассмотрена в работе [4]. Согласно расчётам, проведённым для современных малогабаритных ПВСЧ с $V_p = 2,5$ л, предельная нестабильность частоты составляет $\approx 2,2 \cdot 10^{-13} / \sqrt{\tau}$ и $8,5 \cdot 10^{-16}$ за 1 сутки.

На рис. 1 показана предельная нестабильность частоты ВСЧ и результаты существующих моделей (с неисключённым дрейфом частоты).

Согласно формуле (1) нестабильность частоты Н-мазера должна уменьшаться с увеличением времени как $\tau^{-1/2}$. Однако так происходит лишь до определённого измерительного интервала, после чего (обычно при $\tau \geq 10^3$ с) начинает проявляться ряд других возмущающих физических факторов [5]. К наиболее важным факторам относятся систематическое изменение частоты ВСЧ (дрейф частоты) и изменение условий окружающей среды (температуры, магнитного поля, давления, влажности и напряжения промышленной сети).

Дрейф частоты. СВЧ-резонатор Н-мазера и излучающие атомы образуют пару связанных осцилляторов. Сдвиг частоты резонатора f_p будет затягивать частоту Н-мазера и, соответственно, частоту ВСЧ пропорционально отношению добротностей резонатора и спектральной линии водорода:

$$\Delta f_{\text{ст}} = Q_p (f_p - f_n) / Q_n, \quad (2)$$

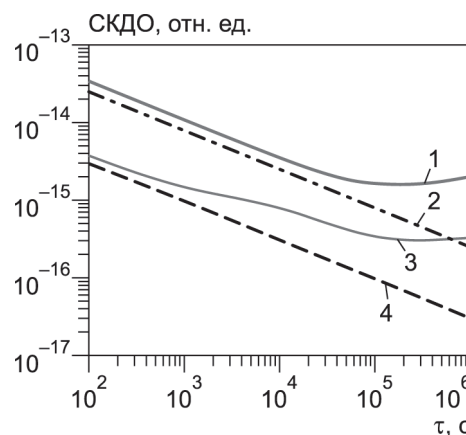


Рис. 1. Нестабильность ВСЧ в зависимости от интервала времени измерения τ :
1 – ПВСЧ Ч1-76Б; 2 – предел ПВСЧ; 3 – АВСЧ Ч1-95; 4 – предел АВСЧ

В конце 1970-х гг. было обнаружено старение материала резонатора. Резонатор выполнен из ситалла – стеклообразного материала с чрезвычайно низким температурным коэффициентом расширения α . Механизм старения приводит к уменьшению размеров резонатора и в соответствии с (2) к дрейфу частоты ВСЧ примерно 10^{-14} в сутки. Данный механизм нестабильности может быть эффективно минимизирован системой автоматической настройки частоты резонатора (АНР).

Сдвиг частоты атома водорода из-за столкновения со стенками накопительной колбы Н-мазера может изменяться во времени, что также приводит к дрейфу частоты ВСЧ. У недавно изготовленных мазеров дрейф частоты, обусловленный данным механизмом, может достигать $3 \cdot 10^{-15}$ в сутки, затем он уменьшается [6]. Если знать истинный дрейф частоты, то его можно минимизировать с помощью периодической коррекции частоты выходного сигнала ВСЧ, возвратив её к номинальному значению. Теоретический анализ [7] показывает, что нестабильность АВСЧ, частота которого линейно дрейфует со временем, при периодической коррекции определяется выражением

$$\sigma_{\text{сум}}(\tau) = \sqrt{kT_p / 2P_a Q_n^2 \tau + (y \sin^2(\pi\tau / T_{\text{корр}}) / \pi\tau / T_{\text{корр}})^2}, \quad (3)$$

где y – значение коррекции; $T_{\text{корр}}$ – период коррекции линейного дрейфа.

Исследование формулы (3) показывает, что существует область значений $T_{\text{корр}} = 10 \dots 60$ ч, зависящая от скорости дрейфа частоты и нестабильности АВСЧ, при которой возмущение, вносимое процессом коррекции, не проявляется на графике $\sigma_{\text{сум}}(\tau)$.

Температурный фактор нестабильности. Частота Н-мазера зависит от температуры окружающей среды. При изменении температуры в небольшом диапазоне имеет место линейная зависимость f_p от величины, равной $-\alpha$, поэтому ранее основное внимание было уделено хорошему термостатированию объёма резонатора, использованию материалов с низким коэффициентом α и получению малого температурного коэффициента фазы блоков электроники.

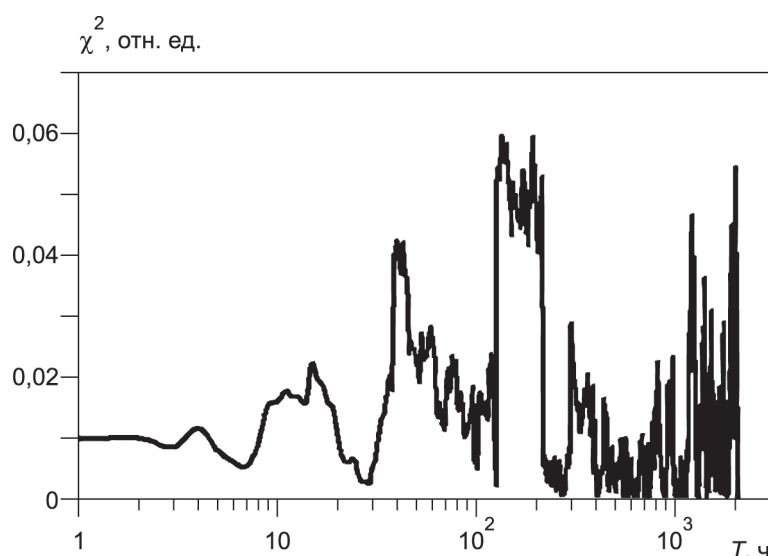


Рис. 2. Зависимость квадрата спектра когерентности χ^2 выходного сигнала АВСЧ Ч1-75А и геомагнитного поля от периода T

Изменения частоты выходного сигнала ВСЧ, обусловленные температурой, принято характеризовать температурным коэффициентом частоты (ТКЧ), определяющим статический относительный сдвиг частоты при изменении окружающей температуры. Для нахождения значения ТКЧ исследуемый прибор помещают в камеру тепла и холода и изменяют температуру внутри неё. До сих пор не объяснён давно известный факт: при нагреве частота СВЧ-резонатора всегда уменьшается, а ТКЧ разных ВСЧ одной и той же модели бывает разного знака. Эффект можно объяснить механизмом затягивания частоты по формуле (2) в случае неточной настройки резонатора на спектральную линию.

Влияние системы АНР на ТКЧ происходит как за счёт значения и знака остаточной отстройки, так и в результате точности перенастройки системы при изменении температуры резонатора в случае неидеальной работы термостатов. Идея была апробирована в работе [8] для ПВСЧ модели Ч1-76А, затем экспериментально подтверждена для АВСЧ модели Ч1-75А с помощью измерения ТКЧ при специальном смещении точки настройки системы АНР. Разный угол наклона зависимости в экспериментах для ПВСЧ и АВСЧ объяснялся разным изменением соотношения Q_p и Q_n в используемых моделях.

Ещё одним не учитываемым ранее механизмом увеличения ТКЧ является появление неоднородного магнитного поля в области накопительной колбы Н-мазера. Рассмотрим модель увеличения неоднородного магнитного поля из-за возникновения термоЭДС на примере ПВСЧ модели Ч1-76А. Термоэлектрический ток возникает в замкнутой цепи, состоящей из разнородных проводников, в том случае, если места их соединений находятся при разной температуре. СВЧ-резонаторы для ПВСЧ имеют квазимагнетронную конфигурацию [3] и изготавливаются из дюралюминиевого сплава Д-16, который для увеличения добротности Q_p покрывается слоями меди и серебра общей толщиной около 10 мкм. Нагреватели, рассеивающие менее 2 Вт, выполнены в виде бифилярного провода и расположены на боковой поверхно-

сти резонатора, образуя цилиндрическую спираль длиной 20 см с шагом 1 см. Тепло отводится в объём тела резонатора, разогревая его до температуры примерно 50 °С.

Для упрощения вычислений нагреватели считаем не внутренними источниками теплоты, а плоскими лентами, расположенными на границах области нагрева, и задаем их присутствие в виде граничных условий. Математическая модель для решения стационарной задачи о распределении температуры описывается уравнением Лапласа:

$$\partial^2 T / \partial x^2 + \partial^2 T / \partial y^2 + \partial^2 T / \partial z^2 = 0. \quad (4)$$

Численное решение уравнения (4) позволило подтвердить существование градиентов температуры. Максимальная рассчитанная разность температур равна примерно 27 мК, с учётом края резонатора она увеличивается до 60 мК. У алюминия и меди существенно разные коэффициенты термоЭДС по отношению к свинцу, поэтому между ними возникает разность потенциалов 3,6 мВ/К, зависящая от температуры. Расчёты показывают, что вблизи нагревателей по всей боковой поверхности

резонатора образуются линии тока, которые можно представить как набор торов со сплошными токовыми поверхностями с интегральным током на одном витке около 23 мкА.

Согласно оценке в центре резонатора магнитное поле торов будет нулевым, но к границам накопительной колбы значение поля может значительно превышать поля остаточной намагниченности.

Изменения добротности Q_n у ПВСЧ Ч1-76А из-за паразитных магнитных полей, образованных термотоками, исследовали методом когерентного возбуждения зеемановских переходов [9]. Для сдвига частоты Н-мазера при малом тестирующем поле в рамках стационарного режима автором получено следующее выражение:

$$\Delta f_{\text{ст}} = -|X_{34}|^2 \frac{\gamma_Z}{4\pi} \left(\frac{1}{T_1 T_2} + b_p^2 \right) \frac{\delta T_1}{(\gamma_Z^2 - \delta^2 + 0,25 b_p^2)^2 + (2\gamma_Z \delta)^2},$$

где $\delta = f_t - f_3$ – отстройка частоты тестирующего поля f_t от частоты Зеемана f_3 ; X_{34} – скорость перехода между подуровнями сверхтонкой структуры атома водорода; γ_Z – скорость релаксации при когерентном зеемановском возбуждении; b_p – частота Раби.

Использовался ряд экспериментальных значений сдвига частоты, полученный при приближении к частоте Зеемана слева и справа с шагом 4 Гц, в условиях разных температур. Паразитные магнитные поля учитывали введением времени релаксации $T_{n,p}$, обусловленным неоднородностью постоянного магнитного поля в области накопительной колбы:

$$T_1^{\text{терм}} = (T_1^{-1} + T_{n,p}^{-1})^{-1}; \quad T_2^{\text{терм}} = (T_2^{-1} + T_{n,p}^{-1})^{-1};$$

$$\gamma_Z^{\text{терм}} = \gamma_Z + 1/T_{n,p}.$$

Решена задача нахождения параметров, наилучшим образом аппроксимирующая зависимость сдвига от отстройки частот. Об-

наружено, что при увеличении температуры окружающей среды уменьшаются градиенты внутренней температуры резонатора, вследствие этого уменьшается термоЭДС и значение неоднородного магнитного поля. Определены варианты использования нагревателей, минимизирующие эффекты неоднородного поля.

Чувствительность к изменению внешнего магнитного поля. В Н. Новгороде значение средней индукции магнитного поля Земли составляет примерно 40 А/м, магнитное наклонение – около 70°. Существуют вариации магнитного поля Земли, наиболее явными из которых являются солнечно-суточные с периодами 24; 12; 8; 6 ч с интенсивностью порядка 0,03 А/м, и нерегулярные вариации (магнитные бури) с наиболее вероятной максимальной в интервале 1 месяц интенсивностью около 0,1 А/м. Для создания приемлемых остаточных магнитных полей и достижения стабильности частоты 10^{-15} – 10^{-16} коэффициент экранирования должен быть не менее $5 \cdot 10^4$, чувствительность к магнитному полю должна быть не более $2,6 \cdot 10^{-16}$ и $1,3 \cdot 10^{-16}$ А/м соответственно для ПВСЧ и АВСЧ.

Для экспериментальной проверки чувствительности ВСЧ к регулярным вариациям геомагнитного поля использовалось сравнение сличений относительно вторичного эталона частоты ВЭТ1-20 с геомагнитными данными, зафиксированными в г. Троицк Московской области (ИЗМИРАН). Для количественной оценки использовали значение квадратичного спектра когерентности двух процессов, равное квадрату коэффициента корреляции этих процессов в диапазоне возможных периодов [10]. Для его вычисления применяли пакет Spectra_Analyzer разработки Российского государственного геологоразведочного университета [11]. На рис. 2 представлен квадратичный спектр когерентности χ^2 синхронных процессов: разности частот АВСЧ модели Ч1-75Б и вторичного эталона частоты ВЭТ1-20 со значением Z компонента геомагнитного поля в июне–декабре 2014 г. Значение χ^2 на суточном интервале не превышает 0,023. Вычисленное значение χ^2 не превысило 0,014 для ПВСЧ Ч1-76А в июне–декабре 2014 г. Это свидетельствует о пренебрежимо малой взаимосвязанности процессов. Спектральные составляющие с суточными периодами магнитного поля не проявляются.

Результаты измерений, полученные во время магнитных бурь, показывают увеличение СКДО частоты, при этом нестабильность (особенно у АВСЧ) возрастает при увеличении интервала времени измерения τ . В спокойный день гистограмма фазовых измерений близка к симметричной. Во время бури экспериментальное распределение становится уширенным и асимметричным, что свидетельствует о нестационарном характере измерений. На рис. 3 представлены результаты измерения СКДО частоты пары Ч1-75А из состава ВЭТ1-20. В первом случае (кривая 1) рассмотрен относительно спокойный период (май–август 2014 г.) со средним индексом геомагнитной активности $K_i=2,1$, во втором случае (кривая 2) – возмущенный период (февраль – май 2015 г.) с $K_i=2,8$.

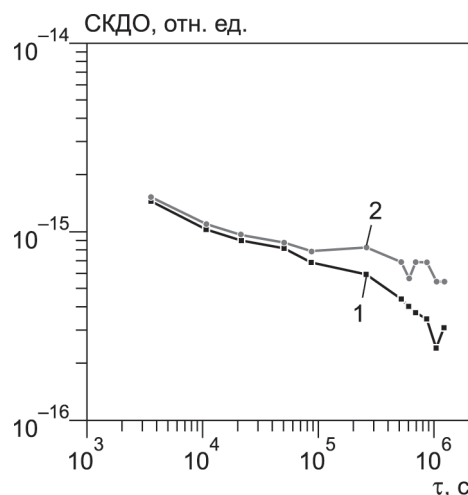


Рис. 3. Нестабильность АВСЧ Ч1-75А в спокойный (1) и возмущенный (2) периоды геомагнитной активности

Разница СКДО частоты между возмущенным и спокойным периодами увеличивается по мере увеличения τ . В возмущенный период при $\tau > 10^4$ СКДО частоты всегда больше.

Магнитная буря кроме возмущения геомагнитного поля сопровождается возмущением геоэлектрического поля. Как известно [12], в электросетях и любых протяженных линиях наводятся геоиндуцированные электрические токи.

Возрастающая во время геомагнитной бури нестабильность выходного сигнала АВСЧ и ПВСЧ при $1 \leq \tau \leq 100$ свидетельствует

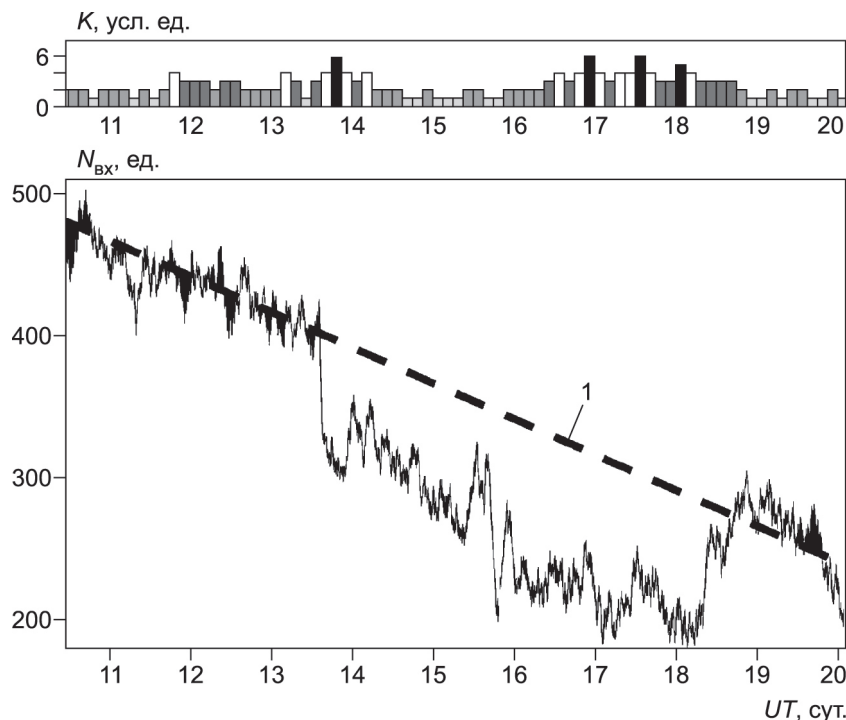


Рис. 4. Индекс N_{vx} геомагнитной активности и запись кода К ЦАП Ч1-75А в период с 10 по 20 июня 2012 г.: 1 – среднемесячный тренд кода

об увеличении возмущений в системе фазовой и частотной автоподстройки. Увеличение нестабильности при больших τ связано с возмущениями, вносимыми в систему АНР. Об этом свидетельствует запись кода цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) сигнала управления системы АНР. На рис. 4 приведён индекс геомагнитной активности и запись $N_{\text{вх}}$ (код ЦАП Ч1-75А) относительно всемирного времени UT в период с 10 по 20 июня 2012 г. Существование систематического среднемесячного тренда $N_{\text{вх}}$ обусловлено старением материала резонатора. Во время активной фазы бури со средним $K_p = 3,7$ у $N_{\text{вх}}$ наблюдается значительное отклонение от тренда. После окончания бури код ЦАП вернулся к значению, предсказанному трендом.

Увеличения помехозащищённости АВСЧ можно добиться улучшением цифровых фильтров АНР, а также миниатюризацией блоков – применением компактных плат в хорошо экранированных боксах с тщательно проработанными вопросами питания схем.

ПВСЧ в значительно меньшей мере подвержены воздействию магнитных бурь, поскольку постоянная времени системы АНР у них на два порядка меньше. В этих условиях АНР успевает скомпенсировать ложные сигналы ошибки. Но у ПВСЧ добавляется зависимость частоты Н-мазера от мощности сигнала возбуждения [1], что накладывает жесткие требования на стабильность амплитудных характеристик используемых сигналов. Дополнительной причиной нестабильности может быть зависимость частоты ПВСЧ от напряжения питания сети 220 В.

Зависимости частоты от атмосферного давления и влажности у современных моделей ВСЧ не наблюдаются, их значения меньше погрешности измерений. Этому способствует вакуумирование области СВЧ-резонатора и применение механической развязки в конструкции мазера.

Выводы. Приближение к предельной долговременной нестабильности частоты ВСЧ связано со стабилизацией систем Н-мазера в условиях изменения окружающих условий, наиболее важными из которых являются температурные и геомагнитные возмущения. Среди ранее неисследованных причин температурной чувствительности ВСЧ – неточная настройка СВЧ-резонатора на частоту спектральной линии Н-мазера, а также термотоки, являющиеся причиной образования изменяющихся во времени паразитных магнитных полей. Геомагнитные и геоэлектрические возмущения вызывают ложные сигналы ошибки в системе автоматической настройки резонатора ВСЧ. Учёт данных механизмов влияния и повышение помехозащищённости позволит снизить СКДО

частоты до уровня $1 \cdot 10^{-16}$ в интервале времени измерения несколько суток.

Литература

1. **Audoin C., Vanier J.** The quantum physics of atomic frequency standards. IOP Publishing, Bristol and Philadelphia. 1989. V. 2.
2. **Горохов А. В., Михайлов В. А.** Релаксация двухуровневой системы, взаимодействующей с внешним стохастическим полем // Теоретическая физика. 2000. № 1. С. 54–62.
3. **Васильев В. И., Гаврилов В. В., Козлов С. А.** Водородные стандарты частоты и времени // Радиоэлектронные технологии России. 2012. С. 97–109.
4. **Васильев В. И.** Исследование предельной кратковременной нестабильности частоты выходного сигнала пассивного водородного стандарта частоты // Измерительная техника. 2016. № 9. С. 25–29.
5. **Vessot R. F.** The atomic hydrogen maser oscillator // Metrologia. 2005. V. 42. P. S80–S89.
6. **Васильев В. И.** Физическая модель систематического изменения частоты выходного сигнала водородных стандартов частоты и времени // Измерительная техника. 2014. № 2. С. 31–34.
7. **Васильев В. И., Гаврилов В. В., Горелов А. Г., Логачёв В. А.** Компенсация дрейфа частоты выходного сигнала водородного стандарта частоты Ч1-75Б // Метрология времени и пространства: Материалы VII Международного симпозиума. Менделеево: ВНИИФТРИ. 2014. С. 242–246.
8. **Васильев В. И.** Температурная чувствительность пассивного водородного стандарта частоты и времени, обусловленная влиянием водородного дискриминатора // Радиоизмерения и электроника. 2009. Вып. 15. С. 51–55.
9. **Humphrey M. A., Phillips D. F., Walsworth R. L.** Double-resonance frequency shift in a hydrogen maser // Phys. Rev. A. 2000. V. 62. P. 063405.
10. **Дженкинс Г., Ваттс Д.** Спектральный анализ и его приложения. Вып. 2. М: Мир, 1972.
11. **Любушин А. А.** Анализ данных систем геофизического и экологического мониторинга. М.: Наука, 2007.
12. **Вахнина В. В., Кувшинов А. А., Кузнецов В. А.** Снижение рисков развития аварий в системах электроснабжения при геомагнитных бурях // Гелиогеофизические исследования. 2013. Вып. 5. С. 115–123.

Дата принятия: 20.12.2017.