

Характеристики долговременной нестабильности водородных стандартов частоты и времени нового поколения

С. И. Донченко¹, И. Ю. Блинов¹, И. Б. Норец¹, Ю. Ф. Смирнов¹, А. А. Беляев², Н. А. Демидов²,
Б. А. Сахаров², В. Г. Воронцов²

¹Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений,
г. п. Менделеево, Московская обл., Российская Федерация, e-mail: director@vniiftri.ru,
blinov@vniiftri.ru, norets_igor@vniiftri.ru, yfsmirnov@vniiftri.ru

²ЗАО «ВРЕМЯ-Ч», Нижний Новгород, Российская Федерация, e-mail: beliaev@vremya-ch.com,
demidov@vremya-ch.com, sakharov@vremya-ch.com, vorontsov@vremya-ch.com

Описаны изменения в алгоритме формирования международной шкалы атомного времени TAI в части оценки весовых коэффициентов часов, участвующих в формировании TAI. Проведены исследования характеристик долговременной нестабильности водородных стандартов частоты и времени нового поколения из состава Государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1-2018 на основе обработки результатов отклонений частот стандартов относительно TAI. Подтверждено, что в настоящее время водородные стандарты частоты и времени нового поколения показывают существенно меньшую долговременную нестабильность по сравнению с квантовыми стандартами частоты аналогичных и других типов.

Ключевые слова: квантовые стандарты частоты, стандарт частоты и времени водородный, нестабильность частоты, алгоритм взвешивания, международная шкала атомного времени.

Введение. Водородные стандарты частоты по сравнению с другими квантовыми стандартами частоты (КСЧ) имеют наилучшие характеристики хранения шкалы времени несмотря на присущие им систематические изменения (линейный дрейф) частоты [1]. За последние пять лет заметно вырос интерес к водородным стандартам частоты в связи с изменениями, которые ввело Международное бюро мер и весов (BIPM) в алгоритм формирования международной шкалы атомного времени TAI. Эти изменения оказали существенное влияние на соотношение весовых коэффициентов (далее – весов) цезиевых и водородных стандартов частоты, участвующих в формировании TAI.

Среднемесячные значения разности частот КСЧ относительно TAI ежемесячно публикуются BIPM (<ftp://ftp2.bipm.org/pub/tai/other-products/rates/>). Для объективной оценки характеристик нестабильности КСЧ были использованы опубликованные BIPM значения разности частот. Проведённые исследования показали, что на сегодняшний день стандарты частоты и времени водородные (СЧВВ) нового поколения по характеристикам долговременной нестабильности заметно превосходят аналогичные показатели различных КСЧ, участвующих в формировании TAI.

Изменения в алгоритме формирования международной шкалы атомного времени TAI. В соответствии с принятым в конце прошлого столетия алгоритмом оценки весовых коэффициентов КСЧ, участвующих в формировании TAI, в качестве относительного веса часов использовалась величина, обратно пропорциональная дисперсии отклонения частоты часов от TAI в течение одного года.

При этом долговременные характеристики нестабильности частоты ансамбля часов гарантировались за счёт снижения веса атомных часов с частотным дрейфом. Последствием такой процедуры был относительно низкий вклад водородных стандартов в формирование шкалы времени ансамбля часов. Например, типовые значения их относительных весов были в 10 раз меньше, чем для промышленных цезиевых стандартов частоты HP5071A [2].

Современная версия алгоритма взвешивания, реализованная в BIPM с января 2014 г., основана на концепции взвешивания часов в соответствии с их прогнозируемостью [3]. Основная идея заключается в том, что часы, характеризующиеся значительным дрейфом частоты или старением, тем не менее, могут быть эффективно использованы в шкале времени ансамбля часов, если их поведение предсказуемо. В новом алгоритме взвешивания оценивается разница между прогнозируемой и реальной частотой атомных часов. Эти данные на годовом интервале времени наблюдения используются для оценки весов с целью обеспечения характеристик долговременной нестабильности частоты ансамбля часов. При этом достигнуто лучшее распределение весов часов и уменьшение нестабильности частоты ансамбля часов как на коротких, так и на длительных интервалах времени измерений, что позволило повысить роль водородных стандартов частоты при формировании шкалы TAI. С 2014 г. индивидуальные значения относительных весов водородных стандартов увеличились на порядок, достигнув заданного в алгоритме предела, а для промышленных цезиевых стандартов типа HP5071A – соответственно уменьшились почти на порядок. На рис. 1 приведена

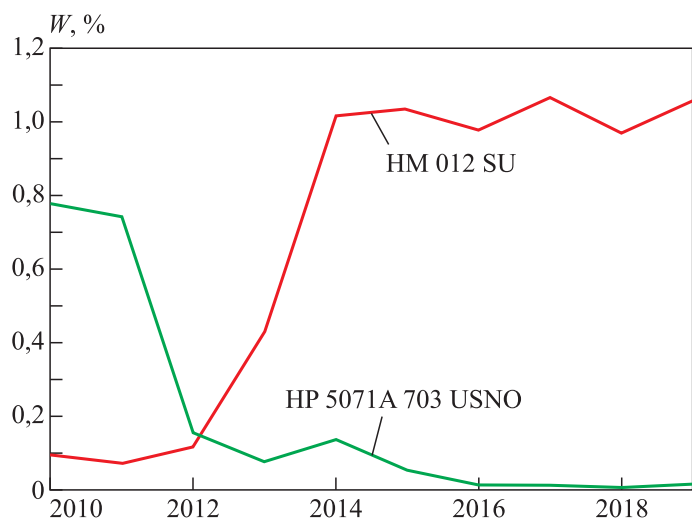


Рис. 1. Динамика изменения относительных весов W цезиевых и водородных стандартов частоты при формировании TAI за последние 10 лет

Fig.1. Changes of the weights cesium clocks and hydrogen masers over the past 10 years

динамика изменения относительных весов цезиевых и водородных стандартов частоты при формировании TAI за последние 10 лет (<ftp://ftp2.bipm.org/pub/tai/other-products/weights/w10.01-w19.09>). Таким образом, с принятием нового алгоритма взвешивания суммарный вклад отдельной лаборатории времени в формирование шкалы TAI стал прямо пропорционален количеству водородных стандартов в лаборатории. В состав Государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени (ГЭВЧ) ГЭТ 1-2018 входят 16 водородных стандартов различных типов, а также два цезиевых и четыре рубидиевых стандарта частоты фонтанного типа. В настоящее время ГЭВЧ занимает второе место по относительному вкладу в формирование шкалы TAI, уступая лишь аналогичному вкладу Военно-морской лаборатории США (USNO), которая имеет в своём составе 103 КСЧ, из них 35 являются водородными стандартами частоты [3].

Изменения в алгоритме формирования шкалы TAI оказали существенное влияние на соотношение количества цезиевых стандартов частоты и водородных стандартов, участвующих в формировании TAI. За последние пять лет в лабораториях времени общее количество водородных стандартов увеличилось на 50 %, а цезиевых стандартов уменьшилось на 20 % [3].

Водородные стандарты частоты и времени нового поколения. Стандарт частоты и времени водородный нового поколения был разработан ЗАО «Время-Ч» для обеспечения высокоточного хранения единиц времени и частоты в составе базового комплекса времени и частоты, предназначенного для оснащения эталонной базы Государственной службы времени, частоты

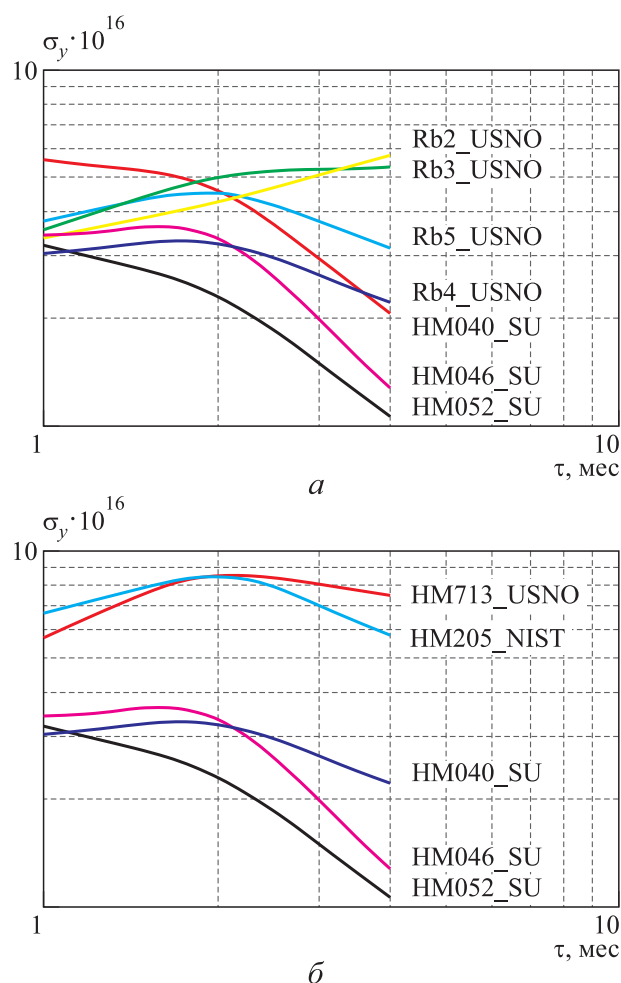


Рис. 2. Нестабильность частоты $\sigma_y(\tau)$ СЧВВ нового поколения (HM040_SU, HM046_SU, HM052_SU) и рубидиевых стандартов фонтанного типа (USNO Rb2, Rb3, Rb4 и Rb5) (а), а также типовых водородных стандартов (HM713_USNO и HM205_NIST) (б) в системе TAI; τ – интервал времени измерения в месяцах

Fig. 2. Frequency instability of new generation hydrogen masers and rubidium frequency standards of fountain type (a) and typical hydrogen masers (b) in TAI

и определения параметров вращения Земли (ГСВЧ). При этом модернизации подверглась конструкция водородного генератора в части улучшения магнитного экранирования путём введения в работу мазера неполяризованного атомного пучка, улучшения системы термостатирования резонатора и оптимизации шумов системы автоматической настройки резонатора [4, 5]. В результате относительное изменение частоты СЧВВ при изменении температуры окружающей среды составило менее $\pm 1 \cdot 10^{-15}/^\circ\text{C}$, а при изменении внешнего магнитного поля менее $\pm 5 \cdot 10^{-15}/\text{Эрстед}$. Применение новых умножителей частоты 5–100 МГц и буферных усилителей позволило достичь низкой фазовой температурной чувствительности не более 2 пс/°C.

Особенностью функционирования СЧВВ является его установка в прецизионную термостатированную камеру с пределами изменения температуры $\pm 0,1$ °C в сутки, что стало одним из важнейших факторов достижения наименьшей на сегодняшний день суточной нестабильности частоты СЧВВ, составляющей не более $3 \cdot 10^{-16}$.

Четыре СЧВВ нового поколения №№ 40, 41, 46, 52 введены в состав усовершенствованного ГЭВЧ. По результатам внутренних сличений за истекший период эксплуатации установлено, что нестабильность частоты всех СЧВВ нового поколения в интервалах времени измерения 1–10 сут не превышает $3 \cdot 10^{-16}$, при этом относительный дрейф частоты менее $1 \cdot 10^{-16}$ в сутки. В настоящее время продолжается оснащение эталонов единиц времени и частоты ГСВЧ аналогичными СЧВВ нового поколения.

Анализ характеристик долговременной нестабильности стандартов частоты и времени в системе ТАИ. В соответствии с установленным BIPM регламентом эталоны времени и частоты национального уровня участвуют в международных ключевых сличениях, поэтому для объективной оценки характеристик нестабильности стандартов частоты целесообразно использование полученных результатов этих ключевых сличений.

Начиная с момента ввода СЧВВ нового поколения №№ 40, 41, 46 и 52 в состав ГЭВЧ данные по отклонению их частот относительно ТАИ ежемесячно публикуются в BIPM. На основании этих данных были рассчитаны показатели нестабильности частоты (девиация Аллана) для различных стандартов частоты в одном и том же интервале времени наблюдения с MJD 57869 по MJD 58569. При этом были исключены линейные дрейфы частоты для всех исследуемых временных рядов.

Полученные результаты позволяют провести сравнение характеристик долговременной нестабильности СЧВВ нового поколения из состава ГЭВЧ и рубидиевых стандартов частоты фонтанного типа из состава USNO Rb2, Rb3, Rb4 и Rb5 в системе ТАИ. На рис. 2, а показано, что на наблюдаемых интервалах времени измерения ($\tau=4$ мес) нестабильность частоты СЧВВ нового поколения (NM040_SU, NM046_SU, NM052_SU) существенно меньше, чем для рубидиевых стандартов частоты фонтанного типа из состава USNO (Rb2, Rb3, Rb4 и Rb5). В рассмотренном случае график прерывается, так как нет статистических данных по интервалам измерений более четырёх месяцев из-за конечного интервала времени наблюдений.

Также проведено сравнение характеристик долговременной нестабильности СЧВВ нового поколения и водородных стандартов из состава ведущих лабораторий времени USNO и NIST в системе ТАИ. Следует отметить, что указанные лаборатории времени оснащены серийными водородными стандартами типа NHM2010. На рис. 2, б показано, что нестабильность частоты СЧВВ нового поколения в несколько раз меньше, чем для водородных стандартов типа NHM2010.

Закключение. В результате внесения изменений в алгоритм формирования ТАИ с 2014 г. относительные веса

промышленных цезиевых и водородных стандартов частоты полярно изменились, что подтверждает адекватность модели погрешности хранения шкалы времени водородных стандартов, предложенной авторами в 2007 г. [1]. Проведённый анализ характеристик стандартов частоты и времени в системе ТАИ показал, что на сегодняшний день СЧВВ нового поколения по характеристикам долговременной нестабильности заметно превосходят аналогичные показатели всех типов КСЧ, участвующих в формировании ТАИ.

Ввод СЧВВ нового поколения, а также новых средств воспроизведения и хранения единиц времени и частоты в состав ГЭВЧ, обеспечил улучшение метрологических характеристик эталона. По состоянию на сегодняшний день национальная шкала времени UTC(SU) входит в число лучших реализаций UTC (<ftp://ftp2.bipm.org/pub/tai/Circular-T/cirt/>).

Список литературы

1. Смирнов Ю. Ф. Оценка погрешности хранения шкалы времени водородных стандартов с учётом систематических изменений частоты // Измерительная техника. 2007. № 3. С. 42–45.
2. Panfilo G., Harmegnies A., Tisserand L., *A new prediction algorithm for EAL*, Proc. Joint Meeting of the EFTF and IEEE FCS, 2011, 850–855. DOI: 10.1109/FCS.2011.5977808
3. BIPM Annual Report on Time Activities, 2018, vol. 13, Pavillon de Breteuil, F-92312 SÈVRES Cedex, France, 22 p.
4. Воронцов В. Г., Беляев А. А., Демидов Н. А., Поляков В. А., Сахаров Б. А., Гладильщиков М. Л. Разработка активного водородного стандарта частоты и времени нового поколения для базового комплекса времени и частоты // Метрология времени и пространства: материалы VIII Междунар. симпозиума, 14–16 сентября 2016 г., г. Санкт-Петербург. Менделеево: ВНИИФТРИ, 2016, С. 55–57.
5. Донченко С. И., Блинов И. Ю., Гончаров А. С., Смирнов Ю. Ф., Беляев А. А., Демидов Н. А., Сахаров Б. А., Гладильщиков М. Л. Эталонный комплекс времени и частоты // Метрология времени и пространства: материалы VIII Междунар. симпозиума, 14–16 сентября 2016 г., г. Санкт-Петербург. Менделеево: ВНИИФТРИ, 2016. С. 100–101.

References

1. Smirnov Yu. F., *Measurement Techniques*, 2007, vol. 50, no. 3, pp. 293–297. DOI: 10.1007/s11018-007-0064-9
2. Panfilo G., Harmegnies A., Tisserand L., *A new prediction algorithm for EAL*, Proc. Joint Meeting of the EFTF and IEEE FCS, 2011, 850–855. DOI: 10.1109/FCS.2011.5977808
3. BIPM Annual Report on Time Activities, 2018, vol. 13, Pavillon de Breteuil, F-92312 SÈVRES Cedex, France, 22 p.
4. Vorontsov V., Belyaev A., Demidov N., Polyakov V., Sakharov B., Gladilshchikov M., *Proceedings of the VIII International Symposium Metrology of Time and Space*,

September 14–16, 2016, St. Petersburg, Mendeleevo, VNIIFTRI Publ., pp. 55–57.

5. Donchenko S., Blinov I., Goncharov A., Smirnov Y., Belyaev A., Demidov N., Sakharov B., Gladilshnikov M., *Proceedings of the VIII International Symposium Metrology*

of Time and Space, September 14–16, 2016, St. Petersburg, Mendeleevo, VNIIFTRI Publ., pp. 100–101.

Дата поступления: 25.10.2019.

Дата принятия: 25.11.2019.

The long-term instability of the new generation hydrogen masers

Sergey I. Donchenko¹, Igor Y. Blinov¹, Igor B. Norets¹, Yury F. Smirnov¹, Alexey A. Belyaev², Nikolay A. Demidov², Boris A. Sakharov², Vladislav G. Vorontsov²

¹Russian metrological institute of technical physics and radio engineering (VNIIFTRI), Mendeleevo, Moscow Region, Russian Federation, e-mail: director@vniiftri.ru, blinov@vniiftri.ru, norets_igor@vniiftri.ru, yfsmirnov@vniiftri.ru

²JSC "Vremya-CH", Nizhniy Novgorod, Russian Federation, e-mail: beliaev@vremya-ch.com, demidov@vremya-ch.com, sakharov@vremya-ch.com, vorontsov@vremya-ch.com

The latest changes in the algorithm for the formation of the international atomic time scale TAI are reported in terms of estimating the weights of the clocks involved in the formation of TAI. Studies of the characteristics of the long-term instability of new-generation hydrogen masers based on processing the results of the clock frequency difference with respect to TAI are performed. It has been confirmed that at present, new-generation hydrogen masers show significantly less long-term instability in comparison with quantum frequency standards of similar and other types.

Key words: quantum frequency standards, hydrogen masers, frequency instability, weighting algorithm, temps atomique international (TAI).