

Характеристики долговременной нестабильности водородных стандартов частоты и шкал времени ГЭВЧ

© С. Ю. Антропов, Е. Ю. Глазов, А. А. Карауш, А. В. Наумов, И. Б. Норец, Ю. Ф. Смирнов

ФГУП «ВНИИФТРИ», пос. Менделеево, Моск. обл., Россия

Реферат

Хранение и воспроизведение единиц времени на эталонах государственной службы времени и частоты производятся на основе наблюдений за группой квантовых стандартов частоты. В результате формируются аналитическая и физическая шкалы времени. Аналитическая шкала времени представляет собой ряд поправок к сигналам 1 Гц квантовых стандартов частоты, а физическая — формируемые при помощи оборудования сигналы 1 Гц, приближенные по моменту к числовым значениям аналитической шкалы времени. Погрешность хранения шкал времени в основном определяется нестабильностью квантовых стандартов частоты.

С целью уменьшения нестабильности частоты в состав Государственного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени (ГЭВЧ) включены водородные стандарты частоты и времени с улучшенными характеристиками. Предложены изменения в алгоритм формирования физической шкалы времени, в частности, изменена периодичность выполнения группового анализа данных внутренних сличений и расчетов аналитической шкалы времени с 1 раза в сутки до 1 раза в 3 мин.

В результате обработки данных внутренних сличений частот водородных стандартов выполнены оценки индивидуальной нестабильности частоты отдельных водородных стандартов для значений интервала времени измерения не более 1 суток. Оценка нестабильности частоты водородных стандартов для значений интервала времени измерения более 1 суток проводилась относительно международной шкалы времени TAI по данным внешних сличений, публикуемых BIPM. Использование данных BIPM позволило также провести оценки нестабильности частоты водородных стандартов зарубежных лабораторий.

Включение новых водородных стандартов в состав ГЭВЧ позволило добиться лучших, по сравнению с зарубежными квантовыми стандартами частоты, показателей нестабильности частоты. Как следствие, улучшилась прогнозируемость хода водородных стандартов, в результате чего удельный вес отечественных водородных стандартов частоты и времени в формирование международной шкалы времени TAI превысил веса квантовых стандартов частоты других ведущих лабораторий мира.

Ключевые слова: шкала времени, единицы времени и частоты, нестабильность частоты, девиация Аллана, водородный стандарт времени и частоты.

Контакты для связи: Антропов Сергей Юрьевич (santro@mail.ru).

Для цитирования: Антропов С. Ю., Глазов Е. Ю., Карауш А. А., Наумов А. В., Норец И. Б., Смирнов Ю. Ф. Характеристики долговременной нестабильности водородных стандартов частоты и шкал времени ГЭВЧ // Труды ИПА РАН. 2023. Вып. 65. С. 3–6.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.65.3-6>

Long-Term Instability of Hydrogen Masers and Time Scales of National Standard of Time and Frequency

S. Yu. Antropov, E. Yu. Glazov, A. A. Karaush, A. V. Naumov, I. B. Norets, Yu. F. Smirnov

Federal State Unitary Enterprise “Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering”
Mendeleevo, Moscow region, Russia

Abstract

Keeping and generation of time units at the State Service of Time and Frequency of Russia is based on observations of an atomic clocks ensemble. As a result, paper and physical time scales are being generated. The paper time scale represents a series of corrections for 1 pps signals of hydrogen masers and the physical one is a 1 pps signal generated by the equipment, approximate in moment to the numerical values of the paper time scale. The accuracy of time scale generation, among other factors, is determined by the instability of atomic clocks frequency.

In order to reduce time standard frequency instability, hydrogen masers with improved characteristics were included to the Russian National State Standard of Time and Frequency and National Time Scale UTC(SU), and changes to the algorithm for physical time scale generation were proposed. Changes to the algorithm for the generation of the physical time scale are proposed, in particular, the frequency of performing group analysis of internal comparison data and calculations of the analytical time scale has been changed from 1 time per day to 1 time per 3 minutes.

As a result of processing internal comparisons of the hydrogen masers frequencies data, estimates of the individual instability of the hydrogen masers frequency were made for the values of the measurement time interval of no more than 1 day. The estimation of the hydrogen masers frequency instability for the values of the measurement time interval of more than 1 day were carried out relative to the international time scale TAI according to the data of external comparisons published by BIPM. The use of BIPM data also made it possible to estimate the instability of the hydrogen masers frequency of foreign laboratories.

The use of new hydrogen masers made it possible to achieve better indicators of frequency instability, in comparison with foreign hydrogen masers. As a result, the predictability of the hydrogen masers improved, and contribution of domestic hydrogen masers used for the generation of TAI exceeded the weight of standards time and frequency from other leading laboratories of the world.

Keywords: time scale, time and frequency metrology, frequency instability, Allan deviation, hydrogen maser.

Contacts: Sergey Yu. Antropov (santro@mail.ru).

For citation: Antropov S. Yu., Glazov E. Yu., Karaush A. A., Naumov A. V., Norets I. B., Smirnov Yu. F. Long-term instability of hydrogen masers and time scales of National standard of time and frequency // Transactions of IAA RAS. 2023. Vol. 65. P. 3–6.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.65.3-6>

Водородные стандарты частоты и времени (ВСЧВ) широко применяются в области метрологического обеспечения измерений времени и частоты (Домнин и др., 2017). Применение ВСЧВ позволяет добиться меньшей погрешности хранения шкалы времени по сравнению с другими квантовыми стандартами частоты.

С целью повышения точностных характеристик формирования национальной шкалы времени UTC(SU) в 2020 г. эталоны Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли (ГСВЧ) были оснащены ВСЧВ нового поколения, разработанными в ЗАО «Время-Ч» (Воронцов и др., 2016). В состав Государственного эталона времени и частоты ГЭТ-1 включены 6 ВСЧВ нового поколения. Еще 12 таких же ВСЧВ работают в составе вторичных эталонов.

Характеристикой нестабильности частоты ВСЧВ является средне квадратическое относительное двухвыборочное отклонение (СКДО), или девиация Аллана (Recommendation ITU-R, 2001). Девиация Аллана рассчитывается на основании ряда последовательных результатов измерений относительной парной разности частот $\delta f_{i-j}(\tau)$ двух водородных стандартов i и j :

$$ADev_{i-j}(\tau) = \sqrt{\frac{1}{2 \cdot N} \sum_{k=1}^N (\delta f_{i-j}(\tau_{k+1}) - \delta f_{i-j}(\tau_k))^2}, \quad (1)$$

где $\delta f_{i-j}(\tau_k)$ — результат измерения относительной парной разности частот стандартов i и j , полученный в течение интервала времени измерения (усреднения) τ_k . $ADev_{i-j}(\tau)$ является характеристикой нестабильности пары стандартов. Значения нестабильности частоты отдельных водородных стандартов связаны с нестабильностью парной разности частот соотношением

$$ADev_{i-j}(\tau)^2 = ADev_i(\tau)^2 + ADev_j(\tau)^2. \quad (2)$$

Записав уравнение (2) для всех пар ВСЧВ, участвующих во внутренних сличениях частот, получим систему уравнений для расчета нестабильности частоты отдельных ВСЧВ. Полученные в результате решения этой системы значения нестабильности частоты ВСЧВ нового поколения в зависимости от длительности интервала времени измерения τ приведены на рис. 1.

Нестабильность частоты ВСЧВ не превышает $3 \cdot 10^{-16}$ для значения интервала времени измерения $\tau = 1$ сутки.

Оценки среднемесячных значений относительных разностей частот КСЧ, участвующих в формировании TAI, а также соответствующие относительные веса ежемесячно публикуются BIPM, что позволяет провести сравнительную оценку характеристик нестабильности КСЧ в системе TAI. Долговременная ($\tau = 1-4$ месяца) нестабильность частоты отечественных водородных стандартов нового поколения в системе TAI находится на уровне $1e-16$, что в несколько раз меньше аналогичной характеристики лучших зарубежных водородных и рубидиевых реперов частоты (Донченко и др., 2020) (рис. 2).

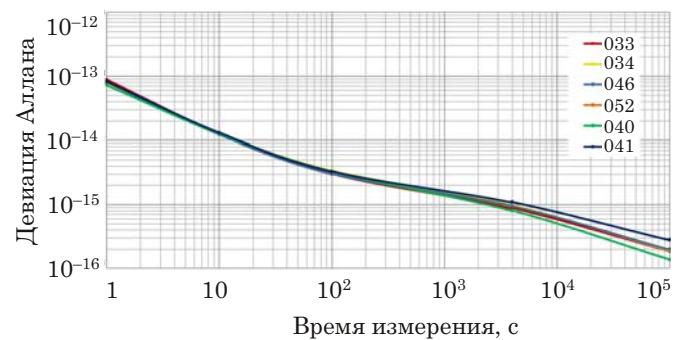


Рис. 1. Нестабильность частоты $ADev(\Delta F/F)$ для ВСЧВ нового поколения

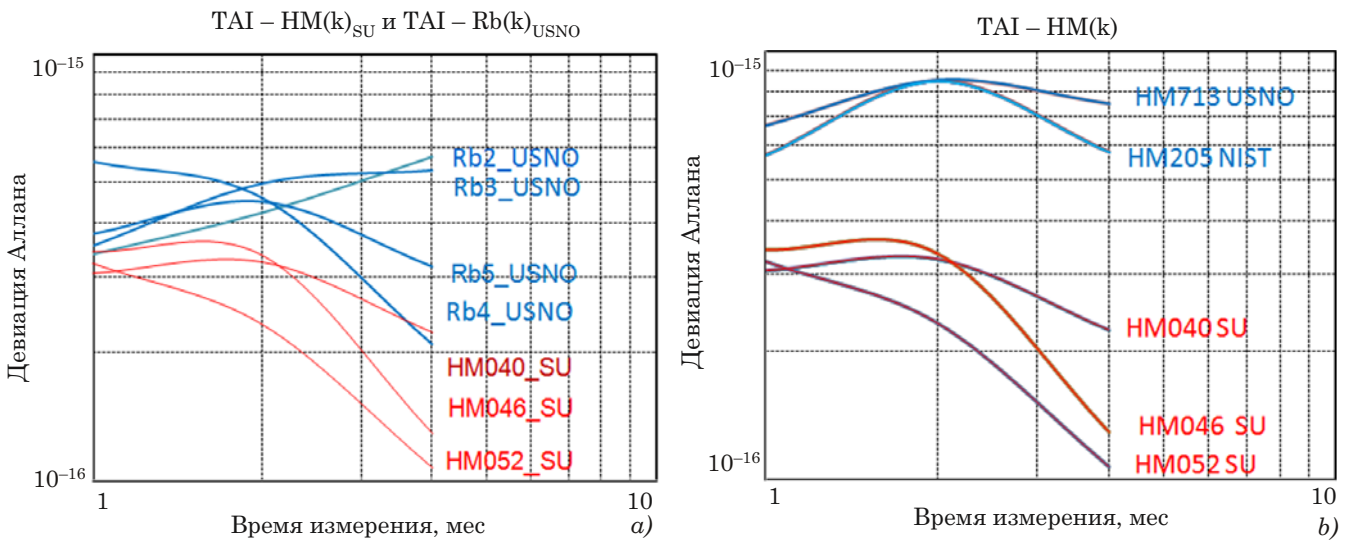


Рис. 2. Результаты сравнения нестабильности частоты отечественных ВСЧВ с рубидиевыми реперами частоты — а и ВСЧВ лаборатории USNO — б

Малая нестабильность и, как следствие, хорошая прогнозируемость водородных стандартов ГЭВЧ являются основной причиной наличия максимально возможного веса у отечественных стандартов при формировании международной шкалы TAI. Так, 12 стандартов ГЭВЧ за последние полгода вносят больший вклад в формирование TAI, чем 31 ВСЧВ лаборатории USNO ([BIPM Weights, 2022](#)).

На основании наблюдений за ходом ВСЧВ и реперами частоты на ГЭВЧ формируются атомная и координированная шкалы времени TA(SU) и UTC(SU). Национальная координированная шкала времени входит в число лучших национальных реализаций UTC и хорошо согласуется со шкалами других лабораторий (рис. 3) ([Circular T, 2022–2023](#)).

Долговременная нестабильность частоты отечественной и зарубежных координированных шкал времени, оцененные в системе TAI, находятся на уровне единиц 16-го знака (рис. 4).

Шкалы TA(SU) и UTC(SU) являются аналитическими, т. е. представляют собой набор ретроспективно определяемых поправок к сигналам 1 Гц ВСЧВ. На основании аналитической шкалы UTC(SU) формируются физические сигналы 1 Гц рабочей шкалы (РШ) — значения поправок шкалы UTC(SU) экстраполируются в настоящий момент времени, а затем сигнал одного из ВСЧВ корректируется с учетом экстраполированного значения поправки при помощи фазовращателя. Периодичность расчета UTC(SU) и алгоритм формирования рабочей шкалы РШ не позволяют ожидать от сигналов 1 Гц рабочей шкалы меньшей, чем у отдельного ВСЧВ, нестабильности для значений интервала времени измерения менее суток. На практике нестабильность РШ оказывается выше нестабильности сигналов ВСЧВ, используемых для ее формирования за счет шумов фазовращателя и коммутаторов.

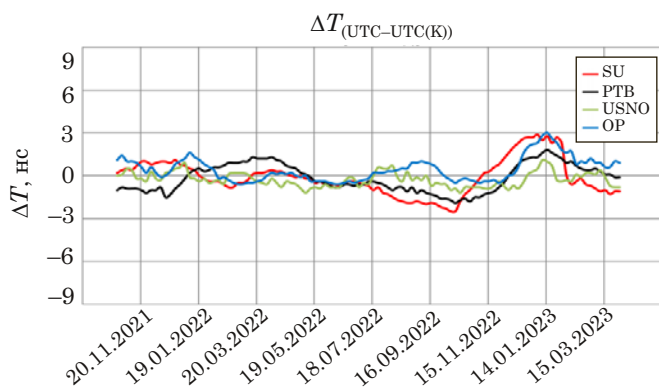


Рис. 3. Отклонения национальных реализаций шкалы UTC ведущих лабораторий от шкалы UTC

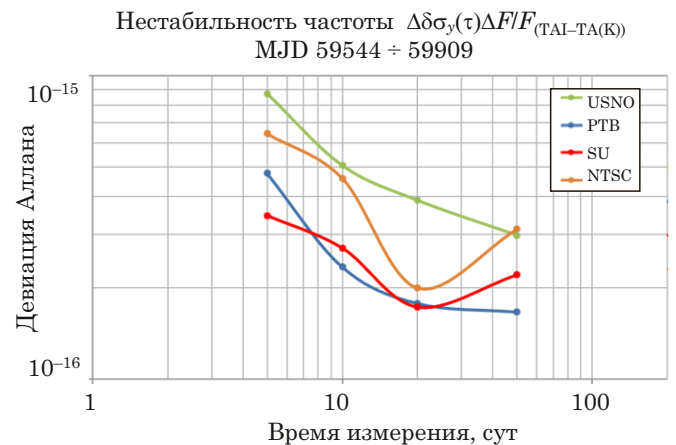


Рис. 4. Долговременная нестабильность частоты национальных реализаций координированной шкалы времени UTC(Lab)

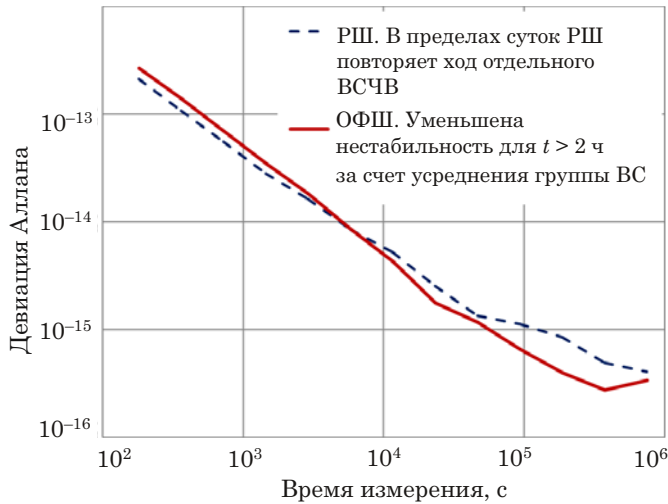


Рис. 5. Характеристики нестабильности сигналов 1 Гц $A_{Dev}(\Delta T/T)$ рабочей и оперативной физической шкалы

Для уменьшения нестабильности физической шкалы в интервалах времени измерения менее суток была изменена периодичность выполнения группового анализа данных внутренних сличений с 1 раза в сутки до 1 раза в 3 мин (Антропов и др., 2022), что соответствует периодичности повторения цикла опроса измерительного оборудования системой внутренних сличений. По результатам этого анализа формируется оперативная физическая шкала, нестабильность сигналов 1 Гц которой меньше нестабильности РШ (рис. 5) для интервала времени измерения более 2 ч.

Заключение

На интервалах времени измерения от 1 месяца до 4 месяцев нестабильность частоты ВСЧВ нового поколения меньше, чем для водородных стандартов типа NHM2010 и рубидиевых стандартов частоты фонтанного типа, используемых ведущими лабораториями мира.

Ввод ВСЧВ нового поколения и новых средств воспроизведения и хранения единиц времени и частоты в состав ГЭВЧ привел к существенному

улучшению метрологических характеристик эталона. С января 2014 по август 2022 г. ГЭВЧ занимал второе место по относительному вкладу в формирование ТАИ, уступая лишь Военно-морской лаборатории США (USNO). С сентября 2022 г. ГЭВЧ по относительному вкладу в формирование ТАИ занимает первое место в мире (BIPM Weights, 2022), а шкала времени UTC(SU) входит в число лучших национальных реализаций UTC.

Литература

Антропов С. Ю., Глазов Е. Ю., Наумов А. В., Смирнов Ю. Ф. Повышение оперативности контроля и надежности формирования шкалы времени группы водородных стандартов времени и частоты // Измерительная техника. 2022. № 11. С. 44–50.

Воронцов В. Г., Беляев А. А., Демидов Н. А. и др. Разработка активного водородного стандарта частоты и времени нового поколения для базового комплекса времени и частоты // Материалы VIII Международного симпозиума Метрология времени и пространства, 14–6 сентября 2016 г., г. Санкт-Петербург. 2016. С. 55–57.

Домнин Ю. С., Костромин В. П., Татаренков В. М., Кошеляевский Н. Б. История атомного времени во ВНИИФТРИ // Альманах современной метрологии. 2017. № 3 (11). С. 16–42.

Донченко С. И., Блинов И. Ю., Норец И. Б. и др. Характеристики долговременной нестабильности водородных стандартов частоты и времени нового поколения // Измерительная техника. 2020. № 1. С. 35–38.

Circular T // BIPM technical services. 2022–2023. URL: <https://webtai.bipm.org/ftp/pub/tai/Circular-T/cirhtml/cirt.422.html> (дата обращения 07.06.2023)

Rec. ITU-R TF.538-3. Recommendation ITU-R TF.538-3 Measures for random instabilities in frequency and time (phase). 2001. URL: <https://www.itu.int/rec/R-REC-TF.538-3-199403-S> (дата обращения 07.06.2023)

Weights of clocks participating in the computation of TAI // BIPM Technical Services. 2022. URL: <https://webtai.bipm.org/ftp/pub/tai/other-products/weights/w22.09> (дата обращения 07.06.2023)