

Повышение оперативности контроля и надёжности формирования шкалы времени группы водородных стандартов времени и частоты

Сергей Юрьевич Антропов^{1✉}, Евгений Юрьевич Глазов², Андрей Владимирович Наумов³, Юрий Федорович Смирнов⁴

^{1, 2, 3, 4} Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, г. п. Менделеево, Московская обл., Россия

¹antropov@vniiftri.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-2603-5186>

²glazov@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2620-4442>

³naumov@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9085-0353>

⁴yfsmirnov@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1377-5545>

Аннотация. Рассмотрены вопросы формирования и хранения шкал времени. Периодичность внутригруппового контроля хода водородных стандартов является одним из факторов, влияющих на надёжность формирования шкалы времени. Предложен алгоритм формирования аналитической и физической шкал времени группы водородных стандартов времени и частоты, основанный на повышении оперативности внутригруппового контроля хода водородных стандартов. При использовании этого алгоритма время, необходимое для выявления и последующей компенсации вариаций хода отдельных водородных стандартов, сокращается с одних суток до нескольких минут. Сформированная в соответствии с предложенным алгоритмом аналитическая групповая шкала времени даёт детальное представление о вариациях хода отдельных водородных стандартов в течение суток. Показано, что в нестабильность физической шкалы времени вносят основной вклад как вариации хода отдельных водородных стандартов, так и погрешности средств измерений интервалов времени. На Государственном первичном эталоне единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1-2022 экспериментально подтверждено, что в результате изменения периодичности группового контроля в соответствии с разработанным алгоритмом уменьшается нестабильность формируемой шкалы времени в интервалах времени измерения более 1 ч.

Ключевые слова: шкала времени, единицы времени и частоты, водородные стандарты времени и частоты, нестабильность частоты, аналитическая шкала времени, физическая шкала времени

Для цитирования: Антропов С. Ю., Глазов Е. Ю., Наумов А. В., Смирнов Ю. Ф. Повышение оперативности контроля и надёжности формирования шкалы времени группы водородных стандартов времени и частоты // Измерительная техника. 2022. № 11. С. 44–50. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-11-44-50>

Improving the efficiency and reliability of time scale generation for a group of hydrogen masers

Sergey Yu. Antropov^{1✉}, Evgeniy Yu. Glazov², Andrey V. Naumov³, Yuri F. Smirnov⁴

^{1, 2, 3, 4} Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering, Mendeleev, Moscow region, Russia

¹antropov@vniiftri.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-2603-5186>

²glazov@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2620-4442>

³naumov@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9085-0353>

⁴yfsmirnov@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1377-5545>

Abstract. The issues of time scales keeping and generation are considered. The frequency of performing intragroup monitoring of the rate of hydrogen masers is singled out as one of the factors affecting the reliability of the generation of the time scale. A new algorithm for the generation of a paper clock and physical time scale for a group of hydrogen masers is proposed, based on increasing the frequency of intragroup monitoring of the rate of hydrogen masers. As a result of using this algorithm, the time required to identify and subsequently compensate the variations in the rate of individual clocks was reduced from one day to several minutes. The paper clock formed in accordance with the new algorithm gives detailed information of the variations of the rate of individual hydrogen masers during the day. It is shown that both variations of the hydrogen masers rates and the error of the time interval counter, is contributing to the physical time scale instability. On the National time and frequency standard of Russia, it was experimentally confirmed that by increasing the frequency of intragroup monitoring in accordance with the new algorithm, the instability of the physical time scale for a time interval of observation more than 1 hour is reduced.

Keywords: time scale, metrology of time and frequency, frequency instability, hydrogen masers, paper clock, physical time scale

Введение. Основа измерений времени – шкала времени, которая представляет собой упорядоченную последовательность значений времени. Шкалы времени можно реализовать в виде числовых значений поправок к сигналам 1 Гц наблюдаемых часов (аналитические шкалы времени), а также в виде сигналов 1 Гц, совпадающих по моменту с числовыми значениями аналитической шкалы времени (физические шкалы времени). Характеристикой случайных и систематических изменений меры частоты во времени является нестабильность частоты шкалы времени (далее – нестабильность шкалы времени), которую принято представлять в виде девиации Аллана [1].

Алгоритм формирования шкалы времени Государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1-2022 (далее – эталон) основан на ежесуточных расчётах аналитической шкалы времени эталона UTC(SU), представляемой в виде поправок к сигналам отдельных водородных стандартов времени и частоты (далее – водородных стандартов)¹ [2, 3]. В пределах суток ход аналитической шкалы времени определяется линейной интерполяцией поправок, определённых на границах суток.

Поправки рассчитывают на основе результатов внутренних сличений частот водородных стандартов фазовыми компараторами [4]. На эталоне также формируется физическая реализация аналитической шкалы эталона – рабочая шкала времени эталона (далее – рабочая шкала), алгоритм формирования которой предполагает коррекцию хода одного из водородных стандартов и формирование сигнала 1 Гц с помощью генератора сдвига фазы и частоты [5, 6].

Существующая периодичность группового контроля (раз в сутки) наряду с использованием для формирования физического сигнала только одного из водородных стандартов не позволяют достичь меньшей нестабильности шкалы времени, чем у отдельного водородного стандарта, если время измерения менее суток.

С целью уменьшения нестабильности шкалы времени авторами предложен алгоритм расчёта групповой аналитической шкалы (далее – оперативная групповая шкала времени (ОГШ)) на основе данных фазовых (шкальных) измерений. Периодичность группового контроля хода водородных стандартов и расчёта поправок водородных стандартов изменена до одного раза в три минуты в соответствии с длительностью цикла внутренних сличений. Наряду с рабочей шкалой реализована в виде сигналов 1 Гц оперативная физическая шкала времени (ОФШ), ход которой определяется по совокупности хода всех водородных стандартов группы в режиме реального времени.

Формирование оперативной групповой шкалы времени. Характерная особенность водородного стандарта – систематическое изменение частоты (дрейф частоты). Параметры модели дрейфа частоты, представляемой в виде линейной функции времени, определяют по результатам долговременных (два и более месяцев) наблюдений за группой водородных стандартов и одним или несколькими реперами частоты [3, 7]. В качестве репера частоты

используют цезиевый или оптический стандарты частоты [8]. Параметры модели хода водородного стандарта i на начало каждого суток d задаются в виде трёх коэффициентов: $\Delta T_i^m(d)$ – прогнозного значения поправки к фазе сигнала 1 Гц водородного стандарта i ; $\delta f_i(d)$ – смещения частоты стандарта i относительно номинального значения; $v_i(d)$ – суточного дрейфа частоты.

Для прогнозирования хода водородных стандартов принята линейная модель дрейфа частоты [9], согласно которой прогнозируемое значение поправки к фазе сигнала 1 Гц водородного стандарта i в любой момент времени t в течение суток d определяется как

$$\Delta T_i^m(t) = \Delta T_i^m(d) + \delta f_i(d)(t-d) + \frac{1}{2}v_i(d)(t-d)^2. \quad (1)$$

В действительности поправка часов $\Delta T_i(t)$ отличается от прогнозного значения поправки на некоторую величину

$$\varepsilon_i(t) = \Delta T_i(t) - \Delta T_i^m(t). \quad (2)$$

В группе из N водородных стандартов наилучшим приближением реального хода времени является средний ход часов группы, т. е. сумма отклонений поправок часов от прогноза по всем часам группы должна быть равна нулю:

$$\sum_{i=1}^N \varepsilon_i(t) = 0. \quad (3)$$

Дополнив уравнение (3) соотношениями, записанными для каждой пары сравниваемых в ходе сличений водородных стандартов $i-j$, получим систему уравнений, из которой определим отклонения поправок часов от модели (1):

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_i(t) - \varepsilon_j(t) &= \Delta T_{i-j}(t) - \Delta T_i^m(t) + \Delta T_j^m(t); \\ \sum_{i=1}^N \varepsilon_i(t) &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где $\Delta T_{i-j}(t)$ – результат измерения парной разности фаз сигналов 1 Гц водородных стандартов i, j .

Оценки парных разностей $\Delta T_{i-j}(t)$ выполняются автоматизированной измерительной системой (АИС). Сигналы 1 Гц двух опорных водородных стандартов Rf1, Rf2 (рис. 1) поочередно сличаются с остальными водородными стандартами. В цикле опроса (измерений) длительностью 3 мин два измерителя интервалов времени переключаются между водородными стандартами с помощью коммутаторов. В результате для 16 водородных стандартов регистрируются $K=30$ результатов измерений парных разностей фаз сигналов 1 Гц.

Система уравнений (4) решается методом наименьших квадратов по окончании каждого цикла измерений с помощью программного обеспечения. Если полученные значения $\varepsilon_i(t)$ для всех водородных стандартов группы по модулю не превышают удвоенного среднего квадратического

¹ Водородный стандарт представляет собой физическое устройство, являющееся одновременно мерами частоты и времени (часами).

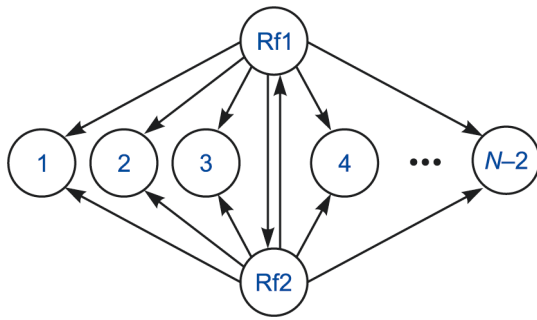


Рис. 1. Схема внутренних сличений АИС:
Rf1, Rf2 – опорные водородные стандарты; 1, ..., N-2 – водородные стандарты

Fig. 1. Scheme of AIS internal comparisons:
Rf1, Rf2 – reference hydrogen masers; 1, ..., N-2 – hydrogen masers

отклонения значений $\varepsilon_i(t)$, то принимается гипотеза, что ход всех водородных стандартов соответствует прогнозу. В противном случае водородный стандарт с максимальным по модулю значением $\varepsilon_i(t)$ исключается из группы (в нормирующем уравнении (3) исключается из-под знака суммирования) и повторно решается система (4). Решение системы (4) с последующим исключением наименее согласующегося с прогнозом водородного стандарта повторяется итерационно до тех пор, пока в группе не останутся только водородные стандарты, ход которых согласуется с прогнозом в установленных пределах.

Полученные в результате значения $\varepsilon_i(t)$ совместно с параметрами модели (1) хода водородного стандарта i определяют ОГШ в виде значений поправок к фазе сигнала 1 Гц:

$$\Delta T_i(t) = \varepsilon_i(t) + \Delta T_i^m(d) + \delta f_i(d)(t-d) + \frac{1}{2}v_i(d)(t-d)^2. \quad (5)$$

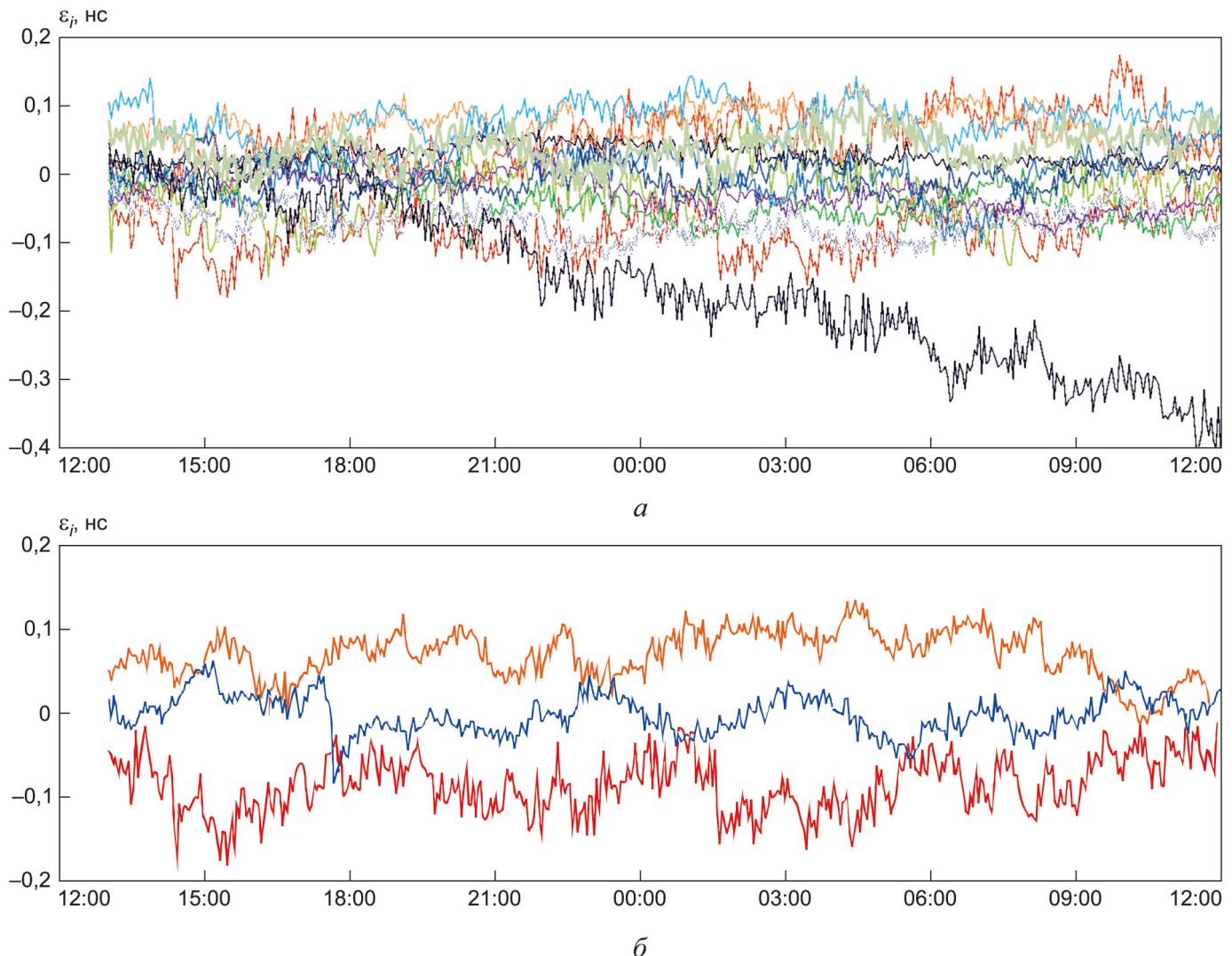


Рис. 2. Отклонения $\varepsilon_i(t)$ хода водородных стандартов группы от модели, полученные в результате решения системы уравнений (4):
а – все водородные стандарты группы; б – выборка трёх типичных водородных стандартов

Fig. 2. Deviations of clocks of the group from the model, obtained as a result of solving the system of equations (4):
а – all clocks of the group; б – three typical clocks

На рис. 2, а представлены временные зависимости отклонений поправок отдельных водородных стандартов от модели в течение суток $\varepsilon_i(t)$. Поправки всех водородных стандартов (за исключением одного) согласуются с прогнозом в пределах $\pm 0,1$ нс. Отклонение хода одного водородного стандарта от модели обусловлено изменением его частоты в результате неисправности (для иллюстрации выбран период времени, в который произошло такое событие). Отображение хода часов в виде отклонений от прогнозного хода, обновляющееся на экране в режиме, близком к реальному времени (после каждого трёхминутного цикла измерений), является удобным инструментом контроля работоспособности водородных стандартов и измерительного оборудования.

На рис. 2, б из всей совокупности водородных стандартов выделены три характерных водородных стандарта. Для каждого из них на фоне случайных изменений фазы ± 20 пс заметны систематические колебания поправки $\varepsilon_i(t)$ в пределах ± 50 пс с периодом порядка нескольких часов. Причиной таких колебаний могут быть как непосредственно вариации хода водородного стандарта, так и погрешность средства измерений интервалов времени. Если систематическая погрешность периодически изменяется в зависимости от результата измерений, то с течением времени из-за дрейфа разности фаз водородных стандартов должны наблюдаться и колебания результатов расчётов $\varepsilon_i(t)$. Реальные колебания погрешности измерителя интервалов времени SR620, используемого в измерительной системе, оценивали с помощью сигналов двух водородных стандартов Rf1, Rf2 (см. рис. 1). В каждом цикле опроса с помощью одного и того же измерителя интервалов времени измеряли разности фаз сигналов $\Delta T_{Rf1-Rf2}(t)$ и $\Delta T_{Rf2-Rf1}(t)$. Погрешность измерений оценивали как

$$Err(t) = [\Delta T_{Rf1-Rf2}(t) + \Delta T_{Rf2-Rf1}(t)] / 2. \quad (6)$$

Зависимость $Err(t)$ приведена на рис. 3. Период изменений $Err(t)$ согласуется с характеристиками измерителя интервалов времени. Согласно технической документации на прибор SR620 дифференциальная нелинейность коэффициента преобразования имеет характерный период 11,11 нс. Разница частот участвующих в эксперименте водородных стандартов такова, что фазы сигналов смещаются на 11 нс за 7 ч.

Разброс погрешности измерений сравним с наблюдаемыми на рис. 2, б вариациями $\varepsilon_i(t)$. Следовательно, погрешность средства измерений интервалов времени является значимой, а возможно и определяющей причиной наблюдаемых колебаний $\varepsilon_i(t)$ в пределах ± 50 пс.

Измерения отклонения других сигналов 1 Гц от оперативной групповой шкалы времени. ОГШ является аналитической шкалой и задаётся в виде определяемых при каждом цикле опроса поправок к физическим сигналам отдельных водородных стандартов $\Delta T_i(t)$ (5). Для измерений разности фаз любого стороннего сигнала S и ОГШ $\Delta T_{S-ОГШ}$ в цикл измерений АИС включены измерения разности фаз

сигнала S и одного из опорных сигналов Rf1 или Rf2. Система уравнений (4) дополнена ещё одним уравнением, устанавливающим связь сигнала S и ОГШ:

$$\varepsilon_{Rf1}(t) - \Delta T_{S-ОГШ}(t) = \Delta T_{Rf1-S}(t) - \Delta T_{Rf1}^m(t). \quad (7)$$

Результирующее отклонение фазы сигнала S от ОГШ $\Delta T_{S-ОГШ}$ определяется одновременно с поправками $\varepsilon_i(t)$ в результате решения системы (4), дополненной уравнением (7).

Такой подход позволил организовать сравнение аналитической шкалы ОГШ с двумя физическими шкалами – рабочей шкалой времени эталона и шкалой ОФШ, представляющей собой физическую реализацию ОГШ, алгоритм формирования которой описан ниже.

Формирование физической реализации оперативной групповой шкалы времени. Общепринятым методом формирования физических сигналов, приближенных к аналитическим шкалам, является использование генератора сдвига фазы и частоты HROG² [10] – устройства, формирующего на выходе сигнал, отличающийся от входного сигнала на заданные смещения по частоте и фазе. На эталоне таким образом формируются сигналы рабочей шкалы (рис. 4, а). Изначально сигнал рабочей шкалы на выходе HROG синхронизируется с аналитической шкалой за счёт установки смещения по фазе. Смещение по частоте устанавливается равным значению поправки по частоте для водородного стандарта, подключённого к входу HROG $\delta f(d)$. В течение суток каждые 5 мин проводится сравнение сформированной рабочей шкалы с сигналом на входе HROG. Если измеренное значение разности фаз входного и выходного сигналов отличается от регламентируемого аналитической шкалой (1) значения более чем на 0,1 нс, то к текущему смещению частоты добавляется компенсирующая поправка.

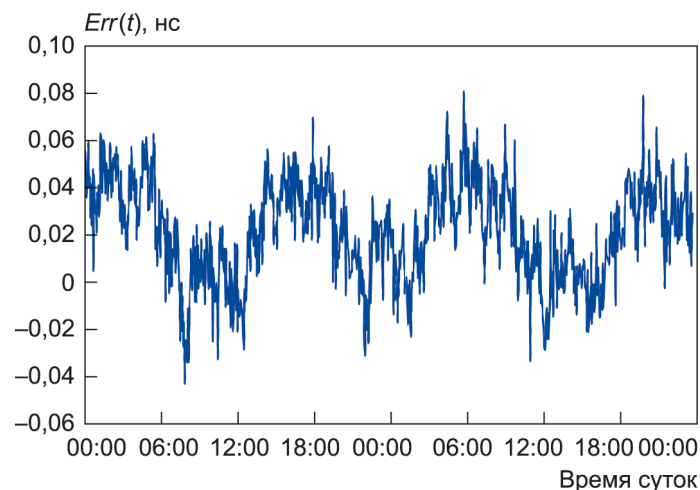


Рис. 3. Погрешность $Err(t)$ измерения разности сигналов средствами измерений АИС

Fig. 3. Measurement error $Err(t)$ of signal difference by AIS measuring instruments

² HROG – High Resolution Offset Generator. В работе использована модель SpectraDynamics HROG-5.

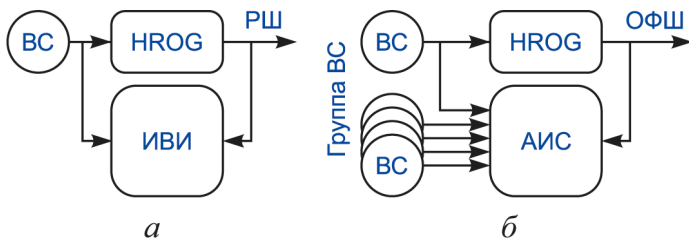


Рис. 4. Схема формирования физической шкалы эталона (а) и ОФШ (б): ВС – водородный стандарт; HROG – генератор сдвига фазы и частоты; ИВИ – измеритель интервалов времени SR620; РШ – рабочая шкала; АИС – автоматизированная измерительная система; ОФШ – оперативная физическая шкала

Fig. 4. Scheme for the generation of a physical signal close to the paper clock once a day according to the analytical scale (а) and every three minutes on a group of hydrogen standards (б):

HM – hydrogen maser; HROG – high resolution offset generator; TIC – time interval counter SR620; WS – working scale of the etalon; AMS – automated measuring system; OPS – operative physical scale

Расчёт аналитической шкалы и, соответственно, контроль вариаций хода водородных стандартов посредством сличений с другими водородными стандартами группы проводится раз в сутки. В течение суток, в интервале между моментами расчёта аналитической шкалы, рабочая шкала повторяет вариации частоты поданного на вход HROG сигнала водородного стандарта.

Авторами применены другая схема и алгоритм формирования ОФШ, которые обеспечивают групповой контроль за случайными изменениями частоты водородного стандарта, поданного на вход HROG каждые 3 мин (рис. 4, б).

В качестве измерителя интервалов времени использовали не отдельное средство измерений, а ту же АИС, данные которой используются при расчёте ОГШ. В систему уравнений (4) включили уравнение (7), что позволило при решении сразу определять отклонение сигнала на выходе HROG от ОГШ $\Delta T_{\text{ОФШ-ОГШ}}$. Смещение частоты HROG устанавливалось равным $\delta f_i(d)$, а возникающие отклонения $\Delta T_{\text{ОФШ-ОГШ}}$ компенсировались посредством ввода в HROG поправки по фазе после каждого цикла измерений АИС, численно равной $-0,2\Delta T_{\text{ОФШ-ОГШ}}$.

Время реакции системы на вариации хода отдельных часов характеризует её надёжность. Для оценки этого времени фаза сигнала одного из водородных стандартов искусственно смещалась на 1 нс. Результаты показали, что в ОГШ такое событие компенсируется алгоритмом расчёта сразу по окончании цикла измерений АИС – в результате группового контроля водородный стандарт был исключён из группы, а рассчитанное для него значение поправки изменилось на 1 нс. Реакция ОФШ зависит от того, случается ли такое событие с водородным стандартом, сигнал которого подан на вход HROG, или с любым другим водородным стандартом. Если с любым другим, то отклонений ОФШ от ОГШ не наблюдается. В противном случае в момент отклонения фазы на входе HROG на его выходе также происходит

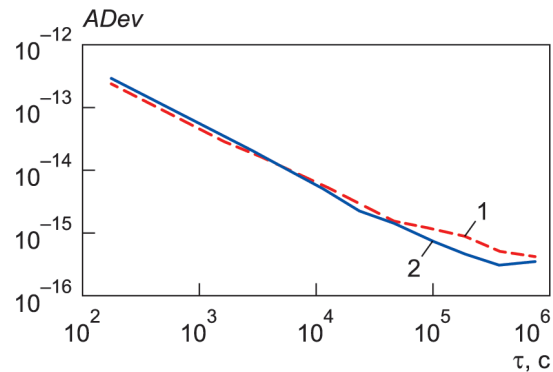


Рис. 5. Девиация Аллана $ADev(\tau)$ для ОФШ (1) и рабочей шкалы (2)

Fig. 5. Allan deviation $ADev(\tau)$ for operative physical scale (1) and working scale of the etalon (2)

скачок фазы на 1 нс, который впоследствии компенсируется до уровня шумов за 30 мин (по 20 % наблюдаемого отклонения при каждом цикле опроса).

Оценка нестабильности оперативной физической шкалы времени и рабочей шкалы времени. В качестве характеристики нестабильности частоты принята девиация Аллана $ADev(\tau)$ [1, 11]. Для перехода от нестабильности парных разностей $ADev(\tau)_{i-j}$ к нестабильности отдельных сигналов $ADev(\tau)_i$ применен метод треугольника. С помощью измерителей интервалов времени определяли временные зависимости парных разностей фаз трёх сигналов – ОФШ и двух водородных стандартов Rf1, Rf2. Предполагалось, что нестабильность каждой из трёх регистрируемых парных разностей $ADev(\tau)_{\text{ОФШ-Rf1}}$, $ADev(\tau)_{\text{ОФШ-Rf2}}$, $ADev(\tau)_{\text{Rf1-Rf2}}$ связана с нестабильностью отдельных сигналов соотношениями

$$\left. \begin{aligned} ADev(\tau)_{\text{ОФШ-Rf1}}^2 &= ADev(\tau)_{\text{ОФШ}}^2 + ADev(\tau)_{\text{Rf1}}^2; \\ ADev(\tau)_{\text{ОФШ-Rf2}}^2 &= ADev(\tau)_{\text{ОФШ}}^2 + ADev(\tau)_{\text{Rf2}}^2; \\ ADev(\tau)_{\text{Rf1-Rf2}}^2 &= ADev(\tau)_{\text{Rf1}}^2 + ADev(\tau)_{\text{Rf2}}^2, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где $ADev(\tau)_{\text{ОФШ}}$, $ADev(\tau)_{\text{Rf1}}$, $ADev(\tau)_{\text{Rf2}}$ – нестабильность ОФШ и сигналов Rf1 и Rf2.

Определённые из системы уравнений (8) зависимости девиации Аллана от времени усреднения τ для шкал ОФШ и рабочей шкалы приведены на рис. 5.

При времени измерения менее 1 ч ОФШ имеет большую нестабильность по сравнению с рабочей шкалой. Рабочая шкала на таких временах фактически повторяет входной сигнал водородного стандарта, а в вариации ОФШ добавляется вклад в результате компенсаций шумов предыдущего цикла измерений АИС.

При времени измерения более 1 ч ОФШ достаточно хорошо повторяет ОГШ, нестабильность которой меньше из-за усреднения хода водородных стандартов группы. Меньшая нестабильность ОФШ при времени измерения более 1 ч свидетельствует о том, что в наблюдаемые на рис. 2 вариации $\epsilon_i(t)$ помимо систематической погрешности средства

измерений интервалов времени значимый вклад вносят и вариации хода водородных стандартов. В рабочей шкале эти вариации практически повторяются на выходе HROG, а в ОФШ компенсируются алгоритмом расчёта ОГШ.

Выводы. Предложен и реализован в виде программного обеспечения алгоритм оперативного расчёта поправок часов группы водородных стандартов. В результате увеличения частоты выполнения группового контроля и изменений в алгоритме формирования физической шкалы, время реакции системы на отклонения хода отдельных часов сократилось с суток до получаса. Отображаемые в режиме реального времени в виде графиков временные зависимости отклонений поправки от прогнозного значения $\varepsilon_i(t)$ являются удобным инструментом, позволяющим оперативно выявлять и компенсировать отклонения хода отдельных часов, что повышает надёжность работы эталона в целом.

В нестабильность ОГШ вносят вклад, как вариации хода отдельных водородных стандартов, так и погрешность средства измерений интервалов времени. Данный факт должен учитываться при интерпретации получаемых зависимостей $\varepsilon_i(t)$ и назначении критериев определения аварийных ситуаций.

С помощью генератора сдвига фазы и частоты сформирован сигнал частотой 1 Гц, повторяющий ОГШ с постоянной времени 15 мин и характеризующийся меньшей нестабильностью по сравнению с рабочей шкалой времени эталона при времени измерения один час и более.

Список источников

1. David W. Allan, John H. Shoaf, Donald Halfordt, *Time and frequency: theory and fundamentals. Chapter 8. Statistics of Time and Frequency Data Analysis*, Nat. Bur. Stand. (U.S.), Monogr. 140, 1974, pp. 151–204. URL: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/MONO/nbsmonograph140.pdf> (дата обращения: 30.09.2022 г.).
2. Норец И. Б. Эталонная база ГСВЧ. Современное состояние и перспективы развития // Альманах современной метрологии. 2016. № 8. С. 53–74.
3. Кошеляевский Н. Б., Соколова О. Ю. Ансамбль часов на основе Н-мазеров как средство хранения национального размера единицы времени и формирования национальной шкалы времени // Метрология времени и пространства: доклады VII международного симпозиума. ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, 2015. С. 112–129.
4. Антропов С. Ю., Глазов Е. Ю., Карауш А. А. и др. Алгоритм формирования шкал времени эталонов ГСВЧ // Метрология времени и пространства: материалы X Международного симпозиума. Менделеево, 2021. С. 38–39.
5. Блинов И. Ю., Капитонов А. Л., Смирнов Ю. Ф. Реализация национальной шкалы времени UTC(SU) и ее передача в наземный комплекс управления ГЛОНАСС // Альманах современной метрологии. № 1. 2014. С. 65–74.
6. Каган С. Н., Смирнов Ю. Ф., Игнатенко И. Ю., Наумов А. В. Комплекс формирования и передачи национальной шкалы координированного времени UTC(SU) в НКУ ГЛОНАСС //

Метрологическое обеспечение обороны и безопасности в Российской Федерации: восьмая всероссийская научно-техническая конференция. Пос. Поведники, Московская обл. 2010. С. 96.

7. Смирнов Ю. Ф. Оценка погрешности хранения шкалы времени водородных стандартов с учетом систематических изменений частоты // Измерительная техника. 2007. № 3. С. 42–45.

8. Сутырин Д. В., Бердасов О. И., Антропов С. Ю., Грибов А. Ю., Балаев Р. И., Стельмашенко Е. Ф., Федорова Д. М., Малимон А. Н., Слюсарев С. Н. Оптический репер частоты для применения в национальной шкале времени // Квантовая электроника. 2019. Т. 49. № 2. С. 199–204.

9. Panfilo G., Harmegnies A., Tisserand L., *Metrologia*, 2012, vol. 49, no. 1, pp. 49–56.
<https://doi.org/10.1088/0026-1394/49/1/008>

10. Bauch A., Weyers S., Piester D., Staliuniene E., Yang W., *Metrologia*, 2012, vol. 49, pp. 180–188.
<https://doi.org/10.1088/0026-1394/49/3/180>

11. Riley W. J., *Handbook of Frequency Stability Analysis*, NIST Special Publication 1065 (July 2008), pp. 14–18, URL: https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=50505 (дата обращения: 30.09.2022 г.).

12. Рекомендация МСЭ-R TF.538-4 (07/2017). Меры случайных нестабильностей частоты и времени (фазы). URL: <https://www.itu.int/rec/R-REC-TF.538-4-201707-l/en> (дата обращения: 30.09.2022 г.).

References

1. David W. Allan, John H. Shoaf, Donald Halfordt, *Time and frequency: theory and fundamentals. Chapter 8. Statistics of Time and Frequency Data Analysis*, Nat. Bur. Stand. (U.S.), Monogr. 140, 1974, pp. 151–204, available at: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/MONO/nbsmonograph140.pdf> (accessed: 30.09.2022).
2. Norets I. B., Reference base of GSVCH. Current state and development prospects, *Almanac of Modern Metrology*, 2016, no. 8, pp 53–74. (In Russ.)
3. Koshelyaevsky N. B., Sokolova O. Yu., An ensemble of clocks based on H-masers as a means of storing the national size of a unit of time and forming a national time scale, *Reports of the VII International Symposium "Metrology of Time and Space"*, 2015, pp. 112–129. (In Russ.)
4. Antropov S. Yu., Glazov E. Yu., Karaush A. A., Maksimovich N. G., Migunov D. S., Naumov A. V., Norets I. B., Smirnov Yu. F., Sobolev V. Yu., Schmidt L. V., Algorithm for the formation of time scales for GSVCH standards. *Metrology of time and space. Proc. X International Symposium*, 2021, pp. 38–39. (In Russ.)
5. Blinov I. Yu., Kapitonov A. L., Smirnov Yu. F. Implementation of the national time scale UTC (SU) and its transfer to the GLONASS ground control complex, *Almanac of Modern Metrology*, 2014, no. 1, pp. 65–74. (In Russ.)
6. Kagan S. N., Smirnov Yu. F., Blinov I. Yu., Complex for the formation and transmission of the national coordinated time scale UTC(SU) to the GLONASS center, *Eighth All-Russian*

Scientific and Technical Conference “Metrological support of defense and security in the Russian Federation”, 2010, p. 96. (In Russ.)

7. Smirnov Y. F., *Measurement Techniques*, 2007, vol. 50, no. 3, pp. 293–297.

<https://doi.org/10.1007/s11018-007-0064-9>

8. Sutyurin D. V., Antropov S. Y., Balaev R. I., etc., *Quantum Electronics*, 2019, vol. 49, no. 2, pp. 199–204.

<https://doi.org/10.1070/QEL16885>

9. Panfilo G., Harmegnies A., Tisserand L., *Metrologia*, 2012, vol. 49, no. 1, pp. 49–56. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/49/1/008>

10. Bauch A., Weyers S., Staliuniene E., Piester D., Yang W., *Metrologia*, 2012, vol. 49, pp. 180–188.

<https://doi.org/10.1088/0026-1394/49/3/180>

11. Riley W. J., *Handbook of Frequency Stability Analysis*, NIST Special Publication 1065 (July 2008), pp. 14–18, available at: https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=50505 (accessed: 30.09.2022).

12. Measures for random instabilities in frequency and time (phase). Recommendation ITU-R TF.538-4 (07/2017), available at: <https://www.itu.int/rec/R-REC-TF.538-4-201707-I/en> (accessed: 30.09.2022).

Статья поступила в редакцию 25.07.2022; одобрена после рецензирования 22.09.2022; принята к публикации 29.09.2022. The article was submitted 25.07.2022; approved after reviewing 22.09.2022; accepted for publication 29.09.2022.