

Существующие эталоны-переносчики единиц времени и частоты

Анализ зарубежных публикаций последних лет [2, 3, 19] по методам сравнения шкал времени показывает, что на сегодняшний день ЭП не имеют широкого распространения, что обусловлено отсутствием за рубежом производства серийных водородных транспортируемых стандартов частоты и времени. В то же время в России были разработаны и введены в эксплуатацию несколько аналогичных изделий. В настоящее время разработаны и применяются ЭП единиц времени и частоты, сконструированные на базе водородных стандартов с характеристиками в соответствии с данными, представленными в таблице 1.

Таблица 1

Характеристики перевозимых квантовых часов

Технические характеристики	Ч1-1007 ЗАО «Время-Ч»	«Сапфир» ФГУП «ВНИИФТРИ»	Ч1-76А ФГУП «ННИПИ» «Кварц»
Относительная погрешность по частоте	$\leq \pm 3 \cdot 10^{-13}$	$\leq \pm 1 \cdot 10^{-12}$	$\leq \pm 1,5 \cdot 10^{-12}$
Нестабильность частоты (СКДО) при τ_n :			
1 с	$5,0 \cdot 10^{-13}$	$7,0 \cdot 10^{-13}$	$1,5 \cdot 10^{-12}$
10 с	$2,0 \cdot 10^{-13}$	$1,0 \cdot 10^{-13}$	$5,0 \cdot 10^{-13}$
100 с	$7,0 \cdot 10^{-14}$	$3,0 \cdot 10^{-14}$	$2,0 \cdot 10^{-13}$
1 ч	$9,0 \cdot 10^{-15}$	$5,0 \cdot 10^{-15}$	$2,0 \cdot 10^{-14}$
1 сут	$\leq 4,0 \cdot 10^{-15}$	$4,0 \cdot 10^{-15}$	$\leq 1,0 \cdot 10^{-14}$
Погрешность хранения ШВ при транспортировании	не нормирована	2 нс за 24 ч	10 нс за 24 ч
ТКЧ, 1/°С	$\leq 1,0 \cdot 10^{-14}$	$\leq 0,5 \cdot 10^{-14}$	$\leq 2,0 \cdot 10^{-14}$

Предприятием ФГУП «ННИПИ КВАРЦ» были разработаны часы водородные транспортируемые РЧ7-01-Э на базе водородного стандарта частоты и времени Ч1-76А. РЧ7-01-Э предназначены для сравнений шкал времени территориально разнесённых эталонов времени и частоты с погрешностью не более 10 нс при времени транспортирования не более 12 ч [20].

ЗАО «Время-Ч» в 2008 году представило эталон-переносчик единиц частоты и времени ЭП-31, предназначенный для обеспечения поверки рабочих эталонов времени и частоты на местах их эксплуатации [21]. В состав ЭП-31

входит стандарт частоты и времени водородный, подстраиваемый по сигналам космических навигационных систем ГЛОНАСС/GPS типа Ч1-1007.

В 2011 году ФГУП «ВНИИФТРИ» были модернизированы перевозимые квантовые часы водородные ПКЧВ «Сапфир», предназначенные для решения задач сравнения ШВ удалённых эталонов. Применение лейкосапфировой колбы позволило получить компактный по размерам водородный стандарт, обладающий высокими метрологическими характеристиками. В состав разработанных ПКЧВ, кроме водородного стандарта частоты активного типа, включена амортизационная платформа.

Анализ приведённых выше технических характеристик СЧВ Ч1-1007 и ПКЧ, РЧ7-01-Э и ПКЧВ-М показывает, что по своим основным техническим характеристикам они не удовлетворяют современным требованиям по точности. Так, погрешности хранения шкалы времени часов водородных транспортируемых РЧ7-01-Э составляют не более 10 нс при времени транспортирования не более 12 часов. Для стандарта частоты и времени водородного типа Ч1-1007 из состава эталона-переносчика ЭП-31 такая характеристика не нормирована, но указаны пределы допустимой погрешности хранения шкалы времени относительно UTC (SU) в режиме слежения за НКА ГЛОНАСС/GPS — не более 50 нс.

Перспективы развития эталона-переносчика нового поколения

В настоящее время производится ряд работ по разработке перспективных стандартов времени и частоты для целей метрологического обеспечения средств измерения времени и частоты системы ГЛОНАСС. Назначение создаваемых стандартов заключается в том числе в использовании в составе ЭП. Особый интерес вызывает транспортируемый активный водородный стандарт времени и частоты нового поколения, разработанный ЗАО «Время-Ч» (рис. 4). По результатам его предварительных испытаний нестабильность частоты (СКДО) в стационарном состоянии при интервале времени измерения 1 сутки не превысила $3 \cdot 10^{-16}$. Создаваемый на его базе ЭП нового поколения должен обеспечивать хранение шкалы времени с погрешностью не более ± 1 нс при времени транспортирования 24 ч. Предполагая условие линейной зависимости погрешности от времени транспортирования, с помощью данного ЭП возможно сравнение ШВ с погрешностью порядка $\pm 0,1$ нс за общее время транспортирования 1 час, что в настоящий момент соответствует самому передовому уровню, достижимому в лабораторных исследованиях.

Стандарт частоты и времени водородный (СЧВВ) пассивного типа Ч1-1008 разработки ЗАО «Время-Ч» находится на стадии освоения промышленного производства (рис. 5). По предварительным данным исследований, не-

стабильность частоты (СКДО) опытного образца Ч1-1008 на интервале времени измерения 1 сутки не превышает $2 \cdot 10^{-15}$.



Рис. 4. Транспортируемый активный СЧВВ нового поколения

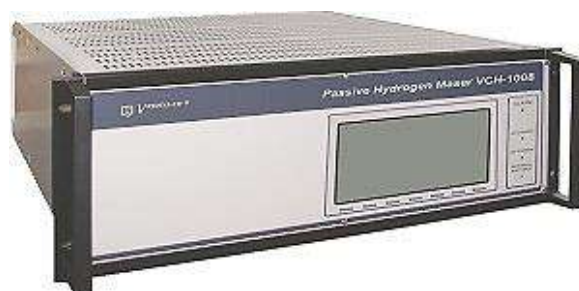


Рис. 5. Стандарт частоты и времени водородный Ч1-1008

В области разработок квантовых стандартов времени и частоты наблюдается тенденция уменьшения темпов роста метрологических характеристик по классическим направлениям в связи с достижением потенциальных возможностей и, с другой стороны, бурный рост показателей точности по альтернативным направлениям, таким как оптические стандарты частоты (ОСЧ). Для транспортируемых оптических стандартов частоты уже получены результаты, перекрывающие возможности СЧВВ по сравнению частот. Например, транспортируемый ОСЧ на атомах ^{87}Sr (РТВ, Германия), представленный на рисунке 6, имеет бюджет неопределённости измерений частоты $7 \cdot 10^{-17}$ [22]. Аналогичные работы проводятся в России.

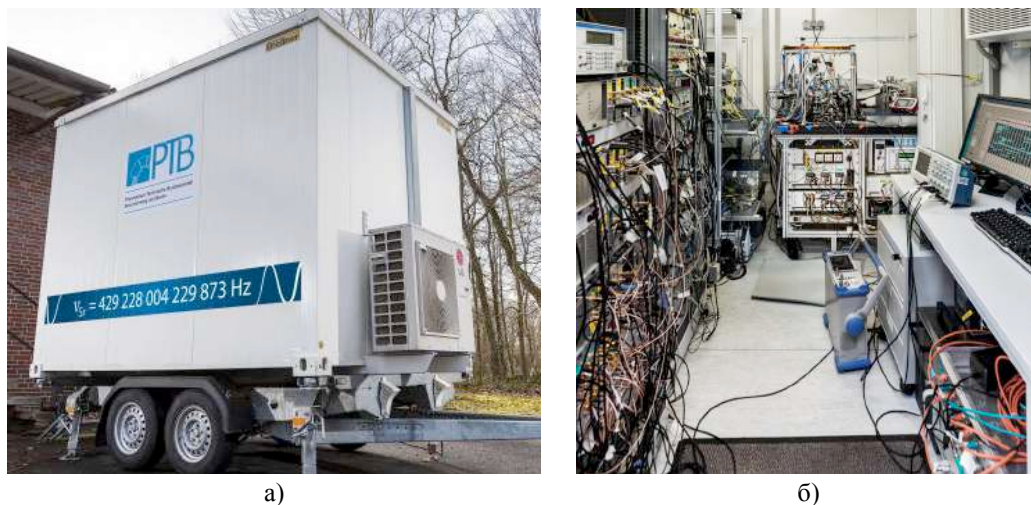


Рис. 6. Транспортируемый оптический стандарт частоты РТВ:
а — внешний вид; б — интерьер

Очевидно, что при конструировании ЭП нового поколения необходимо принимать меры по снижению влияния воздействующих факторов, а также учёту этого влияния. Таким образом, в ближайшей перспективе для целей метрологического обеспечения средств измерений времени и частоты на местах эксплуатации предполагается создание ЭП на основе новых квантовых стандартов времени и частоты. Перспективные ЭП будут иметь полностью автономную конструкцию с системами надёжного электропитания, поддержания температурно-влажностного режима, определения параметров движения и физических полей, а также с аппаратно-программными средствами обработки результатов измерений.

Заключение

Анализ состояния и перспектив развития ЭП позволяет выделить следующие основные направления их совершенствования с целью повышения точности измерений:

- разработка новых квантовых стандартов времени и частоты с метрологическими характеристиками, обеспечивающими требуемый уровень погрешности хранения шкалы времени на интервале времени транспортирования;
- обеспечение необходимого температурно-влажностного режима при размещении средств измерений на передвижной платформе, снижение уровня вибраций при транспортировке за счёт использования эффективной амортизационной платформы;

- обеспечение измерения параметров движения и физических полей для последующего учёта соответствующих поправок к ШВ в режиме реального времени.

Литература

1. Перов А.И. Харисов В.Н. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования. — 4-е издание. — М.: Радиотехника, 2010.
2. Риле Ф. Стандарты частоты. Принципы и приложения. — М.: Физматлит, 2009. — 512 с.
3. Recent Developments in Time Transfer Peter Whibberley, NPL Time & Frequency User Club. — 2009. — 3 June.
4. Osseiran A. (2014-05-01). Scenarios for 5G mobile and wireless communications: the vision of the METIS project // IEEE Communications Magazine. — 52 (5). — 26–35. — DOI:10.1109/MCOM.2014.6815890.
5. «МегаФон» и Huawei поставили в Питере рекорд скорости 5G [Электронный ресурс]. — URL: <https://hi-tech.mail.ru/news/megafon-huawei-5g-record/>
6. CERN experiments observe particle consistent with long-sought Higgs boson [Пресс-релиз]. — Архивировано 29 октября 2012 года. — CERN, 2012. — 4 июля.
7. Ковалёв Ю.Ю. «РадиоАстрон» и сюрпризы Вселенной. «Трибуна учёного» в Московском планетарии. — 2014. — 26 февраля.
8. Левин А. Гравитационные волны: дорога к открытию // Троицкий вариант. — 2016 — № 3 (197). — 23 февраля.
9. Тайченачев А.В., Юдин В.И., Багаев С.Н. Сверхточные оптические часы на ультрахолодных атомах и ионах: состояние и перспективы. — Институт лазерной физики СО РАН Новосибирский государственный университет, 2016. — 193–205.
10. Актуальные проблемы метрологии в радиоэлектронике / под ред. В.К. Коробова. — М.: Изд-во стандартов, 1985. — 295 с.
11. Мангелл А.Дж. Национальные эталоны времени и частоты // ТИИЭР. — 1986. — Т. 74. — № 1.
12. Величко О.М., Макаренко Б.І., Камінський В.Ю. та ін. Державна служба єдиного часу і еталонних частот — необхідний елемент розвитку наземної космічної інфраструктури України // Космічна наука і технологія. — 1997. — Т. 3. — № 1/2. — С. 7–15.
13. Болотов И.М., Геворкян А.Г. Развитие научно-технических основ СЕВ // Радионавигация и время. — 1992. — № 1. — с. 50–52.
14. Палий Г.Н., Артемьева В.И. Синхронизация высокоточных мер времени и частоты. — М.: Изд-во стандартов, 1976. — 287 с.

15. Пушкин С.Б. Анализ результатов и пути повышения точности сличения эталонов времени и частоты // Измерительная техника. — 1979. — № 9. — С. 33–35.
16. Кашеев Б.Л., Коваль Ю.А., Кундюков С.Г. Высокоточные радиометеорные системы сравнения эталонов времени и частоты // Радиоэлектроника и информатика. — 1997. — № 1. — С. 9–18.
17. Гайгеров Б.А., Пушкин С.Б., Русин Ф.С. Водородный генератор. А.с. № 1238184 (СССР), О.И., № 22, 1986.
18. Ashby N., Allan D.W. Practical implications of relativity for a global coordinate time scale // Radio Science. — 1979. — July–August. — Vol. 14. — № 4. — P. 649–669.
19. Hartl P., Thiel K.-H., Reder H., Schmidt F. The Advanced Mitrex Modem with Small Satellite Earth Station. Proceedings of the 4th European Frequency and Time Forum (EFTF), 13–15 March 1990, Switzerland, Neuchâtel (Neuchâtel University). — P. 221–224.
20. Часы водородные транспортируемые РЧ7-01-Э. Руководство по эксплуатации ЕЭ2.817.042 РЭ.
21. Эталон-переносчик единиц частоты и времени ЭП-31. Руководство по эксплуатации ЯКУР.411141.017 РЭ.
22. Koller S.B. et al. Transportable optical lattice clock with $7 \cdot 10^{-17}$ uncertainty // Phys. Rev. — 2017. — Lett. 118. — 073601.