Эталон нового столетия

УДК 006.92;521:9

II. ЭТАЛОН НОВОГО СТОЛЕТИЯ ГЭВЧ – ДЕСЯТЬ ЛЕТ РАЗВИТИЯ

И.Ю. Блинов, С.И. Донченко, Н.Б. Кошеляевский, А.Н. Щипунов

ФГУП «ВНИИФТРИ»; Менделеево, Московская обл.
nkoshelyevsky@vniiftri.ru

Анализируется десятилетний период (2005 – 2015 гг.) работ на Государственном первичном эталоне единиц времени и частоты и национальной шкалы времени Российской Федерации. Описывается полномасштабная модернизация ГЭВЧ.

Показана динамика изменения основных характеристик ГЭВЧ.

The paper analyses results of ten years (2005-2015) activities on the State primary time and frequency standard (SPTFS) of Russian Federation and describes various aspects of its full-scale updates. Summary reflects SPTFS performances dynamics.

Ключевые слова: государственный эталон, характеристики, погрешность, сличение

Введение

В этом сообщении мы проанализируем работы на Государственном первичном эталоне единиц времени и частоты и национальной шкалы времени (ГЭВЧ) Российской Федерации на протяжении 2005 – 2015 годов. Хронологически этот интервал будет разделен на несколько этапов, для каждого из которых будет показана динамика изменения основных характеристик ГЭВЧ и описаны основные направления его модернизации.

Первый этап - это период 2002-2005 г.г., на основании которого будут приведены оценки основных метрологических характеристик ГЭВЧ, с которыми он вошел в 2005 г.

Второй этап 2005-2007 г.г., непосредственно предшествующий третьему периоду 2007-2011 гг., когда были развернуты работы по фундаментальной модернизации ГЭВЧ и системы вторичных эталонов. В это время в преддверии фундаментальной модернизации были проведены скромные подготовительные работы за счет внутренних резервов ГСВЧ, в первую очередь начаты экспериментальные работы по разработке цезиевых реперов частоты фонтанного типа.

Третий этап 2007-2011 гг. - период полномасштабных работ по модернизации ГЭВЧ и системы вторичных эталонов в целом. В это время были созданы два образца цезиевых реперов частоты фонтанного типа. Был радикально модернизирован ансамбль квантовых часов ГЭВЧ на основе Н-мазеров с существенно более высокими характеристиками стабильности и надежности, впервые с автономной системой настройки резонатора, что позволило качественно поднять его метрологические характеристики. Были модернизированы системы внутренних сличений и их характеристики были

подняты до уровня требований, обусловленных возросшими характеристиками Н-мазеров. Модернизация системы внешних сличений, помимо оснащения ансамблем специализированной временнóй мультисистемной, многоканальной приемной ГНСС аппаратуры, включала в себя и установку дуплексной системы сличений через геостационарный спутник, что, в свою очередь, позволило заметно снизить погрешность сличений. Была радикально модернизирована инфраструктура эталонного комплекса. Это коснулось системы электропитания и систем поддержания температурно-влажностного режима в наиболее ответственных аппаратных помещениях ГЭВЧ. Помимо этого, опираясь на модернизированные комплексы хранителей времени ГЭВЧ и системы вторичных эталонов, а также модернизированные каналы сличений, был создан групповой эталон ГСВЧ, что существенно снизило латентность доступа к UTC(SU). С целью закрепления позиций ГЭВЧ в оптическом диапазоне на основе оптической гребенки была создана аппаратура измерений частот в оптике до частот $5\cdot10^{14}$.

Была создана система формирования физической реализации национальной шкалы времени UTC(SU), что обеспечило потребителям доступ наносекундного уровня к UTC(SU) в масштабе реального времени.

Последний, четвертый, этап 2011-2015 гг. Это период аттестации и опытной эксплуатации ГЭВЧ. В это время продолжались работы по дальнейшему совершенствованию первичных цезиевых реперов частоты фонтанного типа, разработке и реализации методических и программных продуктов формирования национальных шкал времени TA(SU) и UTC(SU), калибровки каналов сличений. Еще одним важным событием этого периода является абсолютная калибровка специализированной временнóй мультисистемной, многоканальной приемной ГНСС аппаратуры, что повлекло за собой радикальное улучшение передачи национальной шкалы времени UTC(SU) системой ГЛОНАСС.

Состояние ГЭВЧ в 2005

ГЭТ 1-98 обеспечивал в соответствии с паспортом следующие метрологические характеристики:

Диапазон измерений по времени по частоте	с Гц	$1\cdot10^{-9}$ - 10^{8} 1 - $1\cdot10^{14}$
Неисключенная систематическая относительная погрешность воспроизведения размера единицы времени		$5\cdot10^{-14}$
Относительная нестабильность размера единицы времени	σy(τ)	$\leq 5\cdot10^{-15}$ $10 \leq \tau \leq 30$ суток
Среднее квадратическое (RMS) значение разности шкал времени UTC – UTC(SU)	нс	≤ 1000

Основу аппаратурного комплекса эталона, определяющего независимое воспроизведение единицы времени секунды СИ [1], составлял метрологический цезиевый репер частоты на пучке тепловых атомов и с магнитной сортировкой [2, 3], рис.1. Это прибор классической конструкции, созданный в

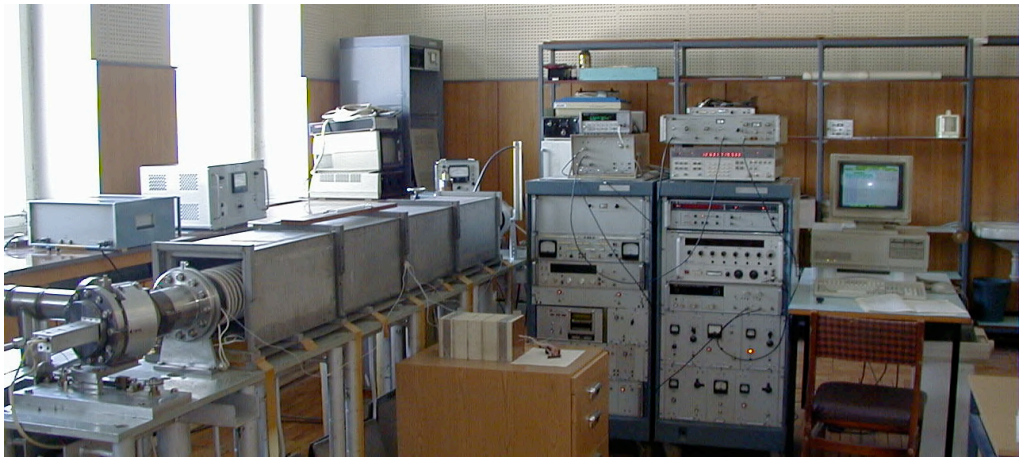


Рис.1. Метрологический цезиевый репер частоты МЦР 2

первой половине 80-х годов и на то время обладавший вполне конкурентными характеристиками. На протяжении ряда лет он давал вклад в МБМВ для формирования секунды СИ. Основная метрологическая характеристика цезиевого репера − неисключенная систематическая относительная погрешность воспроизведения размера единицы времени составляла $5 \cdot 10^{-14}$. К этому времени на Западе уже были реперы фонтанного типа, которые более чем на порядок превосходили МЦР 2 по этому параметру. Вместе с тем, несмотря на очевидное отставание, МЦР 2 обеспечивал возможность независимого воспроизведения размера единицы времени – секунды СИ в полном соответствии с его международным определением.

Хранение размера единицы времени и частоты, а также формирование системы национальных шкал времени TA(SU) и UTC(SU) обеспечивалось ансамблем из 10 водородных мазеров. Это были разновозрастные приборы, часть типа Ч1-80 выпуска 1988 г., рис. 2, и вторая часть несколько моложе - типа Ч1-80М, рис. 3, квантовая и вакуумная часть которых основана на модернизированных физических частях Ч1-80, а электроника претерпела существенные изменения, в первую очередь это касается возможностей настройки резонаторов под управлением внешнего компьютера. Все они в той или иной степени подвергались ранее ремонтно-восстановительным работам. Наиболее серьезным недостатком ансамбля часов являлась их невысокая надежность: так, при наличии 10 часов статистический вклад в формирование шкалы времени одновременно давали не более 5 часов, большую часть времени 3 часов, и иногда даже 2.

Рис. 2. Н-мазеры типа Ч1-80

Рис. 3. Н-мазеры типа Ч1-80М

Сличения ансамбля часов между собой обеспечивались автоматизированной измерительной системой, рис.4, на которой осуществлялись сличения как импульсных сигналов 1 Гц – «часовых» сигналов, так и ВЧ сигналы 5/100 МГц, между которыми измерялись приращения разности фаз. При этом неопределенности типа uA и uB для импульсных сигналов 1 Гц составляли соответственно 200-300 пс и 1.5 – 2 нс, а для ВЧ сигналов uA $\leq 1 \cdot 10^{-15}$ на временах выборки сутки и более.

Рис. 4. Автоматизированная измерительная система

Комплекс аппаратуры внешних сличений, обеспечивающий сличения удаленных лабораторий как внутри страны, так и за рубежом, состоял из специализированной временной автоматизированной приемной аппаратуры сигналов ГНСС. При этом прием сигналов системы GPS осуществлялся приемником АОА TTR6, подаренным нам МБМВ, рис. 5, а сигналов ГЛОНАСС двухсистемным (GLO/GPS) приемником типа К 161 разработки РИРВ, рис. 6.

Рис. 5 Приёмник TTR6 Департамента Времени МБМВ

Рис. 6 Двухсистемный (GLO/GPS) приемник типа К 161

В наиболее ответственных аппаратных помещениях ГЭВЧ поддерживались стабильные температурные условия. Суточные вариации температуры не превосходили 1К.

Все наиболее ответственные источники сигналов, в первую очередь непрерывно работающие хранители времени, были запитаны от резервированных источников переменного тока. Непрерывно работающие хранители времени помимо этого резервировались по постоянному току. Вся система электроснабжения лабораторного корпуса ГЭВЧ в целом резервировалась автономной дизель электростанцией.

Потоки измерительной информации ГЭВЧ обусловлены спецификой его непрерывного функционирования и требованиями потребителей.

Наиболее требовательный потребитель с точки зрения точности – Департамент времени МБМВ. Но его, во-первых, интересуют окончательные «часовые» данные в виде месячных блоков данных на 00h:00m:00s UTC стандартных дат MJD, заканчивающихся на 4 или 9 в пределах отчетного месяца. Во-вторых, данные приемов сигналов ГНСС на местную реализацию шкалы Всемирного координированного времени UTC - UTC(SU) в виде 16 минутных отсчетов по всем видимым спутникам и всем передаваемым сигналам.

Наиболее требовательными потребителями внутри страны являются вторичные эталоны времени и частоты ГСВЧ, которых, в первую очередь, интересуют данные приемов сигналов ГНСС на UTC(SU), пусть даже в виде предварительных данных.

И, наконец, потребители в подразделениях ГЭВЧ, которые используют сигналы эталона для мониторинга эфира и управления системами передачи эталонных сигналов времени и частоты по различным каналам связи. Этих потребителей в большей степени интересует оперативность представления измерительной информации, поскольку метрологические характеристики систем передачи заметно уступают эталону.

Используя суточные блоки измерительной информации с системы внутренних сличений и определенные по итогам работы за нескольких предыдущих месяцев, прогнозы поведения хранителей времени ежесуточно с помощью алгоритма времени ГЭВЧ формировались предварительные версии национальных шкал времени TA(SU) и UTC(SU) в виде поправок по времени к 1 Гц – «часовым» сигналам хранителей времени. Эти версии поправок к физическим сигналам хранителей времени использовались для обработки данных аппаратуры внешних сличений. После последней стандартной даты месяца по результатам сравнительного анализа систем сличений 1 Гц и ВЧ сигналов формировались окончательные данные для МБМВ и системы вторичных эталонов. На следующих рис.7 и рис.8 представлены результаты оценок разности локальных реализаций UTC(k) и шкалы Всемирного координированного времени UTC для ряда ведущих лабораторий времени мира и оценки нестабильности локальных шкал атомного времени TA(k) этих лабораторий относительно шкалы Международного атомного времени TAI на интервале 2002-2005 гг.

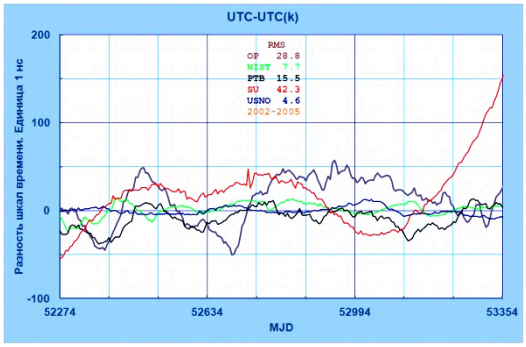


Рис. 7. Разность шкал времени ведущих лабораторий относительно UTC

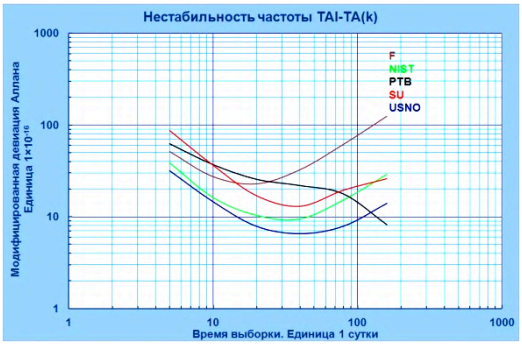


Рис. 8. Нестабильность частоты атомных шкал времени ведущих лабораторий относительно TAI

Здесь следует отметить еще одну особенность формирования национальных шкал времени TA(SU) и UTC(SU) – размеры единицы времени в них совпадали, а их единственным отличием была разность по моменту времени на целое число секунд. Более того, поскольку характеристики нестабильности метрологического цезиевого репера частоты МЦР 2 составляли ~ $1 \cdot 10^{-14}$ на временах выборки 100 суток, то его участие в формировании атомной шкалы времени было чисто представительским. Представленные на рис. 7, 8 на эпоху 2002 – 2005 зависимости наглядно демонстрируют, что, хотя уровень характеристик ГЭВЧ сопоставим с аналогичными характеристиками ведущих лабораторий, он заметно уступает USNO в части согласования шкалы с UTC. Это крайне важный параметр для шкал времени стран, поддерживающих национальные ГНСС.

Следует заметить, что в это время наши европейские коллеги еще не были озабочены временным обеспечением ГНСС GALILEO. С другой стороны, положение с нестабильностью шкалы времени более благополучно – и это в первую очередь благодаря использованию в ГЭВЧ хранителей времени на основе Н-мазеров.

Отсюда следует, что в части нестабильности ГЭВЧ на правильном пути и ансамбль мазеров следует усиливать количественно и повышать индивидуальные характеристики мазеров. Вторым направлением модернизации должно быть создание первичных средств, которые позволят путем регулярной калибровки хранителей времени исключить дрейф частоты в атомной шкале времени и тем самым радикально повысить ее долговременную стабильность. И, наконец, третьим направлением модернизации должно быть совершенствование каналов сличения – на представленных на рис.8 характеристиках ГЭВЧ уступает USNO боле трех раз.

Состояние и работы ГЭВЧ в 2005-2007

Аппаратурный комплекс ГЭВЧ в этот период не претерпел сколь-нибудь существенных изменений. Более того, на протяжении 2005-2007 гг. продолжалось его ветшание, в первую очередь, за счет снижения уровня надежности хранителей времени. Это находило отражение в годовых отчетах ГЭВЧ того периода. Так, среднее число часов в ансамбле продолжало падать: в 2007 г. - 3.38±0.55 против 4.61±0.76 в 2006 г. Среднее время, в течение которого статистический ансамбль работал в неизменном составе, составляло 8.9 суток в 2007 г. против 12 в 2006 г., то есть практически состав ансамбля изменялся каждую неделю. В течение более полугода (202 суток) ансамбль работал в незащищенном режиме – трое часов и 11 суток в режиме статистической неопределенности – 2 часов [4]. Ослабление статистического состава ансамбля и его надежностных характеристик неизбежно отражалось на характеристиках нестабильности частоты.

Учитывая сложившиеся тенденции снижения уровня надежности хранителей времени и во исполнение Рекомендации ККВЧ [5] было принято решение об изменении реализации шкалы времени UTC(SU) [6]. Это позволило разорвать жесткую связь между TA(SU) и UTC(SU) и осуществлять более гибкое слежение за UTC, сохраняя независимость и автономность TA(SU). Основной целью слежения было формирование UTC(SU) как можно более близкой к UTC. Это было очень продуктивное решение, которое, на самом деле, стало заделом будущего алгоритма времени. Результат не заставил себя ждать (рис. 9, 10.).

Рис. 9. Разность шкал времени ведущих шкал лабораторий относительно UTC

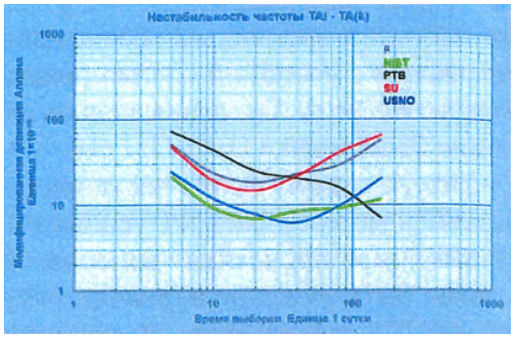


Рис. 10. Нестабильность частоты атомных времени ведущих лабораторий относительно TAI

Если до 2005 г. мы уступали USNO по степени согласования UTC(SU) с UTC ~10 раз, то теперь, вследствие использования нового алгоритма слежения, этот разрыв сократился вдвое – с 42 нс до 23 нс. Вместе тем, как уже упоминалось, характеристики нестабильности TA(SU) из-за старения хранителей времени и снижения их надежностных характеристик стали несколько ниже, особенно долговременная стабильность.

С точки зрения дальнейшей модернизации эталона наиболее существенным результатом были работы по созданию прототипа первичного цезиевого стандарта частоты фонтанного типа. В частности, был создан прототип установки, рис.11, на котором проводились исследования методов и разработка программного обеспечения для измерения точности настройки на вершину атомного резонанса. Была разработана программа и создан интерфейс для приведения в действие различных узлов схемы детектирования. В результате совершенствования системы детектирования и программных методов измерения была достигнута точность $3 \cdot 10^{-14}$.

Рис. 11 Первый макет цезиевого стандарта частоты фонтанного типа

После утверждения Правительством Российской Федерации летом 2006 г. Федеральной целевой программы "Глобальная навигационная система" был запущен механизм формирования работ по глубокой и всесторонней модернизации ГЭВЧ с целью согласования метрологических характеристик с уровнем требований ФЦП. Эти работы носили двоякий характер: постановка работ и разработка ТЗ на отдельные специальные работы по модернизации эталона, с одной стороны, а, с другой, разработка номенклатуры приборов и оборудования аппаратурного комплекса и монтажных работ по модернизации инфраструктуры ГЭВЧ и системы вторичных эталонов времени и частоты Ростехрегулирования в соответствии с новым уровнем требований к метрологическим характеристикам.

Так, в рамках работ по модернизации эталонной базы координатно-временного и навигационного обеспечения с целью достижения заданных тактико-технических характеристик системы ГЛОНАСС предусматривалось создание образцов метрологических цезиевых реперов частоты типа "Фонтан" и разработка группового эталона Государственной службы времени и частоты. Позднее, в рамках корректировки ФЦП ГЛОНАСС, было предусмотрено создание комплекса формирования в режиме реального времени физического сигнала, приближенного с заданной точностью к национальной шкале UTC(SU).

В части переоснащения аппаратурного комплекса и модернизация инфраструктуры ГЭВЧ и системы вторичных эталонов времени и частоты для обеспечения непрерывного функционирования государственного эталона времени и частоты для метрологического обеспечения системы ГЛОНАСС и доведения ее характеристик до требуемого уровня были предусмотрены закупки оборудования для модернизации метрологической базы системы ГЛОНАСС.

Состояние и работы ГЭВЧ в 2007-2011

В части разработки образцов метрологических цезиевых реперов частоты типа "Фонтан" было отдельное сообщение, поэтому здесь мы ограничимся лишь констатацией, что в результате выполнения этих работ было создано два первичных цезиевых репера CSF01(SU), рис. 12, и CSF02(SU), рис. 13, [7]. Основная метрологическая характеристика подобных приборов – неисключенная систематическая погрешность воспроизведения частоты невозмущенного перехода атома ^{133}Cs составляла $3\cdot10^{-15}$ и $5\cdot10^{-16}$ соответственно. Разработка реперов со столь высокими точностными характеристиками позволила реализовывать национальный размер единицы времени - секунду SI(SU) - автономно и независимо в строгом соответствии с ее определением в системе SI с точностными характеристиками, сопоставимыми с достигаемыми МБМВ при формировании интервала вре-

мени для TAI. Это выдвинуло ГЭВЧ в число лучших эталонов времени в мире и создало предпосылки для качественного улучшения характеристик национальной шкалы времени.

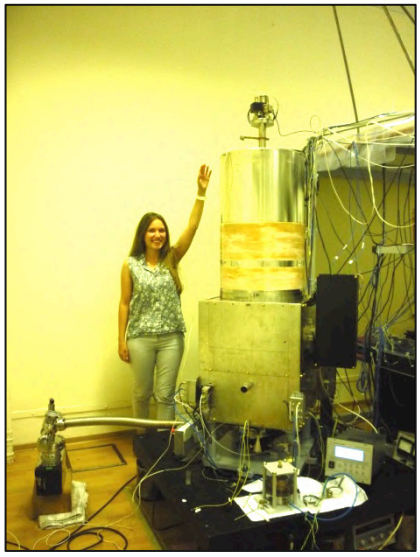


Рис. 12. Первичный цезиевый репер частоты фонтанного типа CSF01(SU)

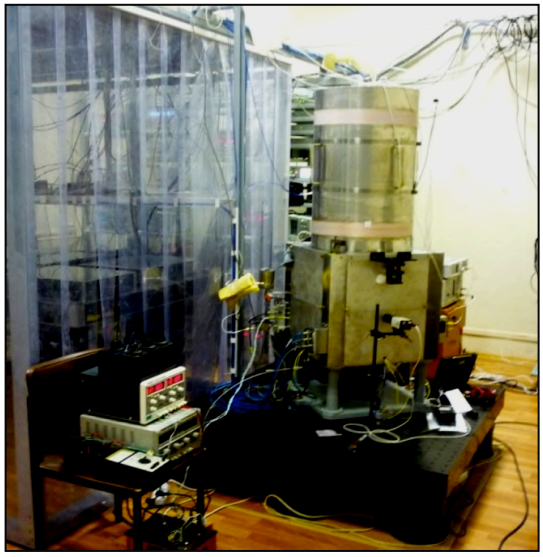


Рис. 13. Первичный цезиевый репер частоты фонтанного типа CSF02(SU)

Несколько слов о разработке группового эталона Государственной службы времени и частоты. Необходимость этой работы была вызвана пожеланиями структур ПКУ ГЛОНАСС резко сократить латентный период доступа к окончательным данным о национальной шкале времени UTC(SU). Опираясь на аппаратурные возможности (хранители времени и каналы сличений) модернизируемого ГЭВЧ и системы вторичных эталонов, а также соответствующие информационные потоки, в рамках ГЭВЧ был создан центр обработки измерительной информации и формирования свободной атомной шкалы FAT группового эталона. В алгоритмическом и программном отношении она напоминала алгоритм времени ALGOS[8], используемый в настоящее время МБМВ. В результате эталоны-вкладчики получили быстрый доступ к UTC(SU) и шкалам времени друг друга с латентным периодом 5 суток. В качестве примера, рис. 14, приведем образец официального издания ГМЦ ГСВЧ-БЮЛЛЕТЕНЬ Т 335 за 3 декабря 2014 г.

Комплекс формирования физического сигнала, приближенного с заданной точностью к национальной шкале UTC(SU) в режиме реального времени MC02(SU), рис.15, предназначен для обеспечения устройств, работающих в режиме реального времени, например, таких как NTP сервера, дифференциальные сличения с использованием сигналов ГНСС, мониторинг и управление передачами эталонных сигналов частоты и времени.

БЮЛЛЕТЕНЬ Т 335 ISSN 0135-2415
2014 ДЕКАБРЬ 03

ГЛАВНЫЙ МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ ЦЕНТР ГСВЧ

Шкала координированного времени ГЭВЧ Российской Федерации - UTC(SU), её локальные реализации - UTC(k),
и шкала времени ГЭ ГСВЧ - FAT
Вычисленные величины и их неопределенности на время издания Бюллетеня

Дата	НОЯ 03	НОЯ 08	НОЯ 13	НОЯ 18	НОЯ 23	НОЯ 28	ДЕК 03	Неопределённость/нс		
MJD	56964	56969	56974	56979	56984	56989	56994	uA	uB	u
	[UTC(SU)-FAT]/нс									
SU (Менделеево)	10891.3	10944.7	10998.3	11052.1	11105.6	11159.7	11213.9	0.02	0.5	0.5
Лаборатория k	[UTC(SU)-UTC(k)]/нс									
Im (Иркутск)	0.0	-0.7	-1.1	-1.7	-2.5	-1.1	-3.1	1.0	5.0	5.1
Nm (Новосибирск)	-2.4	-1.4	0.0	2.7	4.7	6.6	3.2	1.0	5.0	5.1
Km (Хабаровск)	-1.0	-0.9	-0.5	0.7	2.1	-	3.9	1.0	5.0	5.1

Рис. 14. Бюллетень Т 335 ГМЦ ГСВЧ

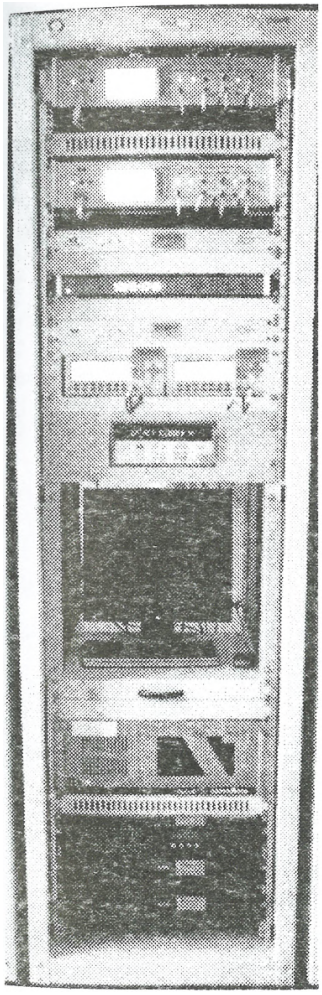


Рис. 15 Комплекс аппаратуры MC02(SU)

MC02(SU) представляет из себя двухканальное устройство на основе микростепперов (цифровых фазовращателей) HROG-5RM, запитанных от двух различных часов ГЭВЧ и управляемых с помощью специализированной компьютерной программы. При этом минимальный фазовый сдвиг, вносимый HROG-5RM, составляет $3\cdot10^{-16}$ с, а минимальная отстройка по частоте $5\cdot10^{-19}$. На основе измерительной информации, получаемой в результате формирования национальной шкалы времени России UTC(SU), компьютерная программа управляет HROG-5RM таким образом, чтобы на их выходе ВЧ сигнал 5 МГц соответствовал по частоте UTC(SU), а выходной импульсный сигнал 1 Гц − по моменту UTC(SU). Два канала MC01(SU) страхуют выходной сигнал от возможных сбоев входных сигналов. В целом MC01(SU) реализует прогноз UTC(SU) с суммарной неопределенностью типа $u \leq 2$ нс.

Работы по модернизации ансамбля хранителей времени были крайне затруднены, поскольку эталон времени − принципиально непрерывно работающее устройство. Мы не могли, выключив и убрав старые хранители, поставить на их место новые. Эта модернизация затрагивала слишком многие аспекты: собственно

хранители, буферные усилители, систему сличений и фидеры, алгоритмические и аппаратно-программные средства формирования национальных шкал времени TA(SU) и UTC(SU). Кроме того, было необходимо подготовить специальные климатизированные помещения для размещения новых часов – уровень стабильности температуры старых помещений не соответствовал требованиям для новых часов и новую систему резервированного энергоснабжения. Хотелось бы подчеркнуть, что в новом комплексе ГЭВЧ основным потребителем резервированной электроэнергии является система климатизации, которая в пересчете на стандартный лабораторный модуль требует несколько кВт энергии – для сравнения часы потребляют ~ 100 Вт.

В результате была создана двухконтурная система поддержания температурно-влажностного режима. Первый контур, рис. 16, обеспечивал хладагентом все конкретные кондиционеры, в частности в трёх специализированных камерах для часов, рис. 17. Прецизионные кондиционеры обеспечивали в них постоянство температуры в пределах 0.1 К и влажности в пределах 5% RH.

Рис. 16. Оборудование первого контура системы поддержания температурно-влажностного режима

Рис. 17. Прецизионный кондиционер в специализированной камере для часов

Новая система резервированного энергоснабжения ГЭВЧ представлена, в основном, источниками бесперебойного питания, рис. 18, и современным дизельным агрегатом большой мощности, рис.19. Более детально новый ин-

фраструктурный комплекс описан в отдельном сообщении.

Рис. 18. Источники бесперебойного питания хранителей времени и систем сличений ГЭВЧ

Рис. 19. Контейнер с дизель-электрическим агрегатом DVA 275 EME

Рис. 20. Установка первых новых часов № 403809 ГЭВЧ 14 апреля 2008 г.

Создав инфраструктурные заделы и поочередно переместив непрерывно работающие старые хранители времени, мы приступили в 2008 г. к установке новых часов ГЭВЧ, рис. 20. Шаг за шагом в течение 2008 - 2009 годов в состав ГЭВЧ было введено 8 новых часов на основе Н-мазеров типа Ч1-75А. Они, а также системы буферизации ВЧ и импульсных сигналов и фрагменты системы внутренних сличений были установлены в двух специализированных климатических камерах и подключены к системе резервированного энергоснабжения ГЭВЧ.

Итак, к концу 2009 года мы имели в составе ГЭВЧ 8 новых водородных стандартов частоты, размещенных в двух различных климатических камерах, рис. 21, 22. Это качественно новые стандарты частоты по сравнению с предыдущими. Их основное качественное отличие заключается в том, что система автоматической настройки СВЧ резонатора не требует внешнего вспомогательного высокостабильного сигнала. Таким образом, каждые часы это полностью автономный прибор, что существенно снижает риски влияния часов друг на друга.

Рис. 21. Новые часы № 403810 и № 403811 климатической камере 102

Рис. 22. Новые часы № 403816 и № 403815 климатической камере 203

Для защиты от просачивания сигналов часов друг в друга использовались высококачественные ВЧ и импульсные буферные усилители.

ВЧ буферные усилители типа HPDA-15RM от Spectra Dynamics, Inc. на частоты 5/10 МГц с межканальной развязкой ≤ 125 dB, обратным затуханием ≤ 135 dB и термическим коэффициентом задержки в диапазоне температур 298-308 К ≤ 1.5 пс/К. ВЧ буферные усилители типа HPDA-100RM от Spectra Dynamics, Inc. на частоты 100 МГц с межканальной развязкой ≤ 100 dB и обратным затуханием ≤ 110 dB.

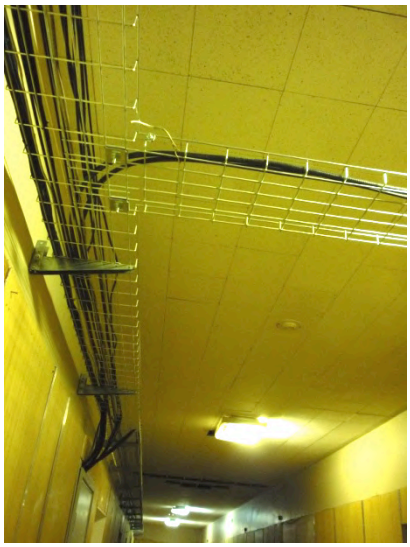


Рис. 23. Кабельные лотки с фидерами в сигналов ГЭВЧ

Усилители импульсных сигналов 1 Гц типа PD-5/10 RM от Spectra Dynamics, Inc. со временем нарастания/падения фронта 3 нс и термическим коэффициентом задержки в диапазоне температур 298-308 К ≤ 3.0 пс/К.

В качестве фидеров ВЧ и импульсных сигналов использовались термокомпенсированные фазостабильные кабели типа FSJ и LDF от ANDREW различной номенклатуры в зависимости от частоты сигнала и требуемой длины кабеля и специальные высокочастотные разъемы от этого производителя с малой величиной КСВН. Предпочтение отдавалось разъемам типа N, TNC и SMA. Все фидеры сигналов укладывались на отдельных кабельных лотках, рис.23. Силовые кабели размещались раздельно от фидеров в подпольных кабельных каналах.

Новый комплекс внутренних сличений ГЭВЧ состоит из двух систем: системы сличений по времени – измерение интервала времени между выходными импульсными сигналами 1 Гц хранителей времени и устройств формирования физических шкал времени – «часовые сигналы» и системы измерения приращений разности фаз выходных ВЧ сигналов хранителей времени.

Дублированная, из соображений надежности, система сличений по времени, рис. 24, состоит из единственного измерительного прибора – измерителя интервалов времени типа SR 620 от Stanford Research Systems и пары мультиплексоров, осуществляющих поочередную коммутацию измеряемых сигналов. Система сличений в целом работает под управлением программы, которая циклически, длительность цикла 3 минуты, поочередно коммутирует пары сигналов на измерительные входы SR 620 и записывает результаты измерений в выходной суточный файл – 480 циклов измерений. Информация, содержащаяся в файле, служит одним из источников для фор-

мирования шкал времени ГЭВЧ за истекшие сутки. Неопределённости системы сличений по времени были подтверждены непосредственными исследованиями [9] и составляют uA ≤ 33 пс и uB ≤ 500 пс. Это весьма неплохой результат, принимая во внимание, что предыдущая система сличений была почти на порядок хуже по величине неопределенности типа uA.

Рис. 24. Система сличений по времени

Система измерения приращений разности фаз выходных ВЧ сигналов хранителей времени, рис.25, использует для своей работы фазовые компараторы типа 10265 от TimeTech GmbH. К сожалению, в его документации не содержится исчерпывающих сведений о неопределенности типа u_B, и нам пришлось провести самостоятельные исследования [9] для получения состоятельных оценок u_B и u_A.

Рис. 25. Фазовые компараторы 10265 от TimeTech GmbH

Выбирая источники сигналов – часы ГЭВЧ и конкретные каналы компараторов, нам удалось получить несколько треугольных замыканий типа:

$$\left[\left(Cl_i - Cl_j\right)_\alpha + \left(Cl_j - Cl_k\right)_\beta + \left(Cl_k - Cl_i\right)_\gamma\right] \equiv 0.$$

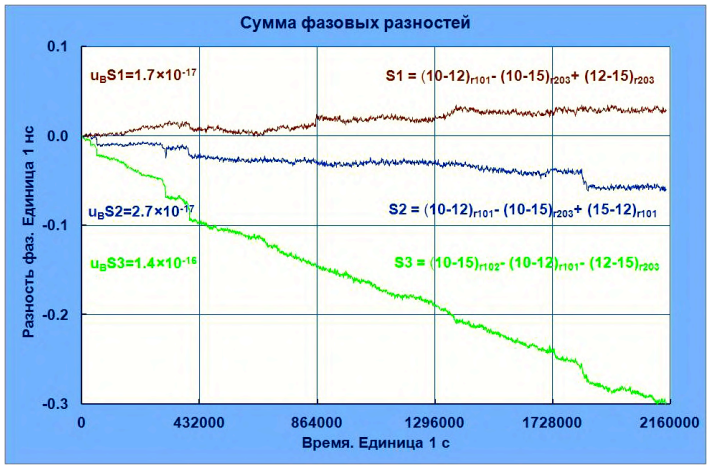


Рис. 26. Результаты измерений неопределенности типа u_B фазовых компараторов ГЭВЧ 10265 от TimeTech GmbH

Результаты для некоторых пар сигналов и каналов компараторов представлены на рис.26. Очевидно, что выше приведенное выражение не выполняется, а степень его отклонения от 0 и характеризует неопределенность типа uB. Наибольшая величина неопределенности типа uB составила ~ $1.4 \cdot 10^{-16}$, что для реальных Н-мазеров не представляет препятствий для корректного определения разностей их частот. Остатки от линейной регрессии измеренных зависимостей характеризуют неопределенность типа uA, которая на интервалах сутки и более составила менее $7 \cdot 10^{-17}$.

Система измерения приращений разности фаз выходных ВЧ сигналов хранителей времени используется в ГЭВЧ для прецизионной оценки разности размеров единиц времени часов. На основе её данных рассчитываются ходы часов относительно аналитических шкал времени ГЭВЧ – TA(SU) и UTC(SU).

Используя описанную измерительную систему, нами были получены оценки нестабильности часов ГЭВЧ, рис. 27, 28, на основе которых может быть оценена нестабильность национальной шкалы времени.

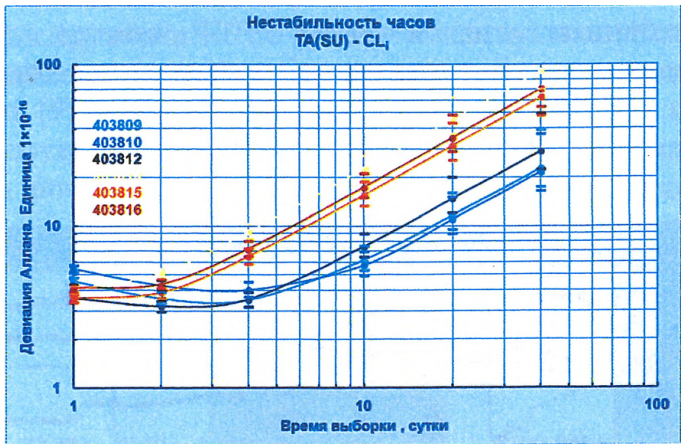


Рис. 27. Нестабильность некоторых часов ГЭВЧ относительно TA(SU)

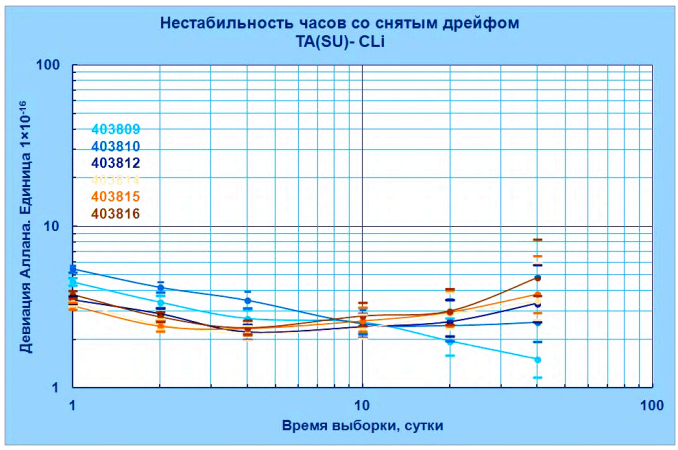


Рис. 28. Недетерминированная компонента нестабильности некоторых часов ГЭВЧ относительно TA(SU)

Представленные на рис. 27, 28 зависимости подтверждают, что ГЭВЧ располагает ансамблем высокостабильных часов с суточной нестабильностью ~3-4·10^{-16}, что является лучшим результатом в мире для промышленных стандартов частоты на основе Н-мазеров и позволяет рассчитывать на достижение нестабильности частоты национальной атомной шкалы времени TA(SU) на уровне ~ 2·10^{-16} на временах выборки от 1 до 10 суток. Зависимости рис. 26 демонстрируют, что большинство часов за исключением, пожалуй, № 403816, обладает на интервалах до месяца хорошо прогнозируемым линейным дрейфом частоты на уровне от < 1·10^{-16} до ~ 2·10^{-16}.

Ещё одной важной компонентой ГЭВЧ является система внешних сличений. Она обеспечивает две фундаментальные функции. С одной стороны, она позволяет оценивать разность шкал времени и размеров единиц времени удаленных лабораторий по отношению к ГЭВЧ, реализуя

тем самым принцип прослеживаемости единиц времени и шкал по отношению к вторичным эталонам и другим подчиненным средствам измерений в рамках поверочной схемы ГЭВЧ [10].

Кроме того, система внешних сличений является средством, обеспечивающим участие ГЭВЧ в Метрической конвенции в части измерений времени путем представления измерительной информации об ансамбле часов ГЭВЧ, его первичных цезиевых реперах и национальных шкалах времени TA(SU) и UTC(SU). Реализуя вклад Российской Федерации в формирование TAI и UTC и тем самым участвуя в ключевых сличениях CCTF-K001.UTC, ГЭВЧ, в свою очередь, получает доступ к мировой временной опорной системе UTC, что обеспечивает прослеживаемость национальной шкалы времени UTC(SU) по отношению к UTC и через официальные публикации МБМВ получает оценки степени эквивалентности в рамках Договоренности о взаимном признании [11].

Поскольку измеряемой величиной в системе внутренних сличений является разность шкал времени/приращений фазы часов, она принципиально не может обнаружить коррелированные изменения в ансамбле часов, и единственным средством является возможность сличений с часами вне ансамбля. Наличие первичных цезиевых реперов радикально изменяет эту ситуацию. Но поскольку сами цезиевые реперы не являются постоянно работающими приборами, то даже для объективной оценки их неопределенности типа uB требуется стабильная независимая временная опорная система, которую может предоставить лишь система внешних сличений.

Традиционно система внешних сличений ГЭВЧ включала в себя средства дифференциальных сличений с использованием радиосигналов и перевозимые квантовые часы.

Средства дифференциальных сличений с конца 80-х годов прошлого века включали в себя сличения как с использованием сигналов наземного телевидения в зоне прямой видимости антенны излучающей станции (ТЦ «Останкино» - Московский регион), так и сигналов ГНСС.

Модернизация системы внешних сличений ГЭВЧ осуществлялась в двух направлениях: совершенствование и резервирование аппаратуры дифференциальных сличений на основе сигналов ГНСС и развертывание аппаратуры дуплексного канала сличений с использованием геостационарного телекоммуникационного спутника.

По первому направлению в 2008 г. было приобретено и установлено на ГЭВЧ 4 мультисистемных (GLO/GPS) многоканальных специализированных временных двухчастотных приемника типа TTS 3, рис. 29. Приемники были размещены в термостатированном помещении непосредственно под крышей здания, на которой на специальных основаниях были установлены приемные антенны, рис.30. Выбор такого размещения был обусловлен требованием минимизации длины антенных кабелей для снижения суточных и годовых

вариаций задержки в кабелях из-за изменения температуры. На протяжении 2009 и 2010 гг. эта аппаратура была прокалиброваа по возимому приемнику TTS 3, что было официально оформлено изданием соответствующего отчета [12]. Введение в эксплуатацию подобного комплекса приемной ГНСС аппаратуры и её калибровка существенно улучшили оперативный канал внешних сличений ГЭВЧ, доведя неопределенности канала uA≤ 1.0 нс и uB ≤ 5 нс.

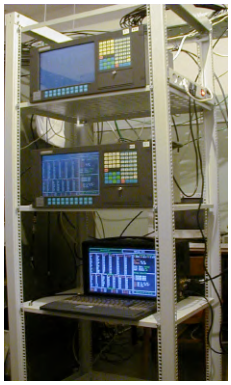


Рис. 29. ГНСС приемная аппаратура типа TTS 3

Рис. 30. Антенны ГНСС приемной аппаратуры

По второму направлению в состав ГЭВЧ был введен комплекс аппаратуры дуплексного канала сличений с использованием геостационарного телекоммуникационного спутника. Было приобретено и развернуто два комплекта аппаратуры: стационарный, рис. 30, 31 и транспортируемый, рис.32, 33. Такая конфигурация аппаратуры позволяет ГЭВЧ проводить с помощью транспортируемого комплекта независимую калибровку как собственного стационарного, так и будущих стационарных комплектов на вторичных эталонах Российской Федерации.

Рис. 31. Антенна и приемно-передающее устройство дуплексной станции

Рис. 32. SATRE модем и вспомогательное оборудование дуплексной станции

Рис. 33. Минивэн с антенной дуплексной станции

Рис. 34. SATRE модем и вспомогательное оборудование дуплексной станции в салоне минивэна

Основу стационарного комплекса составляет SATRE модем производства TimeTech GmbH, который, с одной стороны, формирует выходной псевдошумовой сигнал с кодовым разделением, а с другой, выделяет на корреляторе принятый сигнал. Принципы обработки сигнала аналогичны принципам обработки сигналов ГНСС. Остальные фрагменты стационарного комплекса – это коммерческая спутниковая связная аппаратура.

Техническая структура транспортируемого комплекса аналогична стационарному. Всё оборудование размещается в минивэне. Кроме собственно дуплексной аппаратуры, предусмотрена возможность транспортирования перевозимых квантовых часов (в левом нижнем углу рис.34) и специализированного временного приемника ГНСС.

С вводом в состав ГЭВЧ комплекса аппаратуры дуплексного канала сличений было ликвидировано многолетнее отставание ГЭВЧ в области передовой технологии сличений удаленных часов. В ходе опытной эксплуатации дуплексного канала сличений шкал времени ВНИИФТРИ и PTB с использованием спутника AM 2 было подтверждено заметное преимущество дуплексного канала сличений по сравнению с ГНСС, рис. 35, особенно в части неопределенности канала uA.

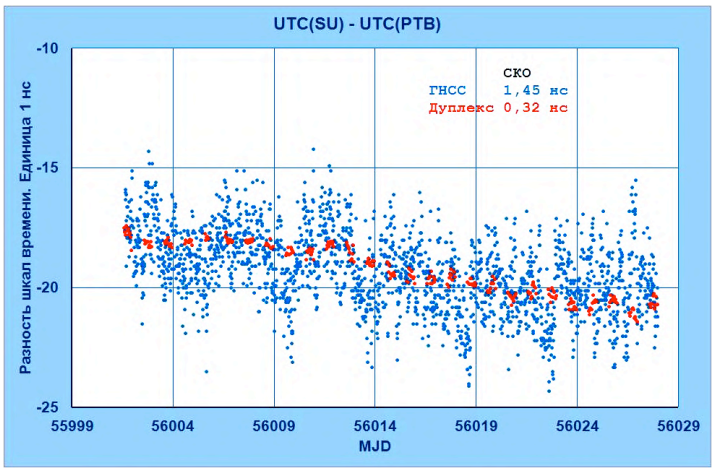


Рис. 35. Результаты сличений шкал времени ВНИИФТРИ и PTB с помощью ГНСС и дуплекса

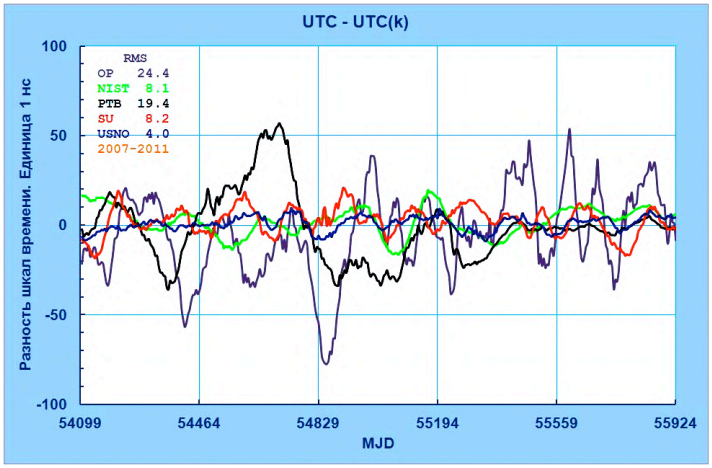


Рис. 36. Разности шкал времени UTC – UTC(k)

Подводя итоги работам по модернизации ГЭВЧ в части интегральных метрологических характеристик периода 2007-2011 гг., сравним их с предыдущим периодом. На рис. 36 на основании официальных данных МБМВ представлены разности шкал времени ведущих лабораторий мира UTC(k) относительно UTC и вычисленные нами оценки их среднеквадратической разности. Обращаясь к исходному периоду 2002 – 2005 гг., налицо прогресс UTC(SU). Согласование с UTC улучшено более чем в 5 раз и составляет 8.2 нс против 42.3 нс. Отставание от USNO, обладающей сотней часов, из которых одних Н-мазеров около 30, сокращено до 2 раз, 8.2 нс против 4.0 нс. Это достигнуто, в первую очередь, за счет ввода в состав ГЭВЧ новых, надежных и хорошо прогнозируемых часов.

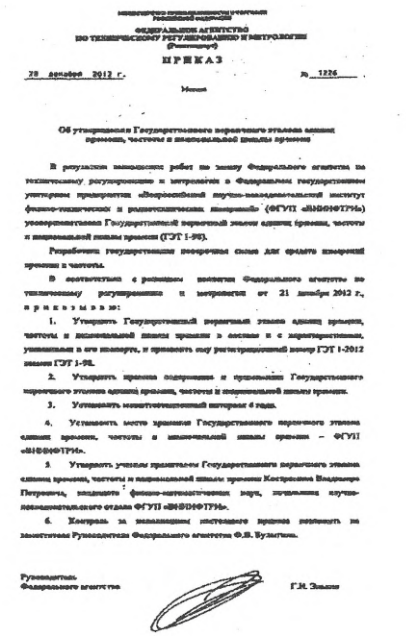
Что касается поведения TA(SU), то она демонстрирует устойчивый остаточный дрейф частоты $< 2 \cdot 10^{-16}$/сутки. Это неизбежно для свободного ансамбля Н-мазеров. То, что его величина держится стабильной, только подтверждает хорошую прогнозируемость хранителей времени. Регулярная калибровка часов по первичному цезиевому реперу устранит этот дрейф.

Состояние и работы ГЭВЧ в 2011-2015

Основные работы в начальный период были направлены на метрологическую аттестацию модернизированного аппаратурного комплекса ГЭВЧ. Сюда теснейшим образом примыкали работы по новой алгоритмике формирования национальных шкал времени TA(SU) и UTC(SU). Она опиралась на регулярные калибровки хранителей времени и частоты по первичным цезиевым реперам фонтанного типа CsF01(SU) и CsF02(SU) и использование новых каналов сличений, как на основе дуплексных технологий, так и новой ГНСС приемной аппаратуры. Внедрение нового алгоритма времени привело к корректировке размера единицы времени в

национальной атомной шкале времени TA(SU).

Были продолжены работы по совершенствованию метрологических характеристик первичных цезиевых реперов фонтанного типа CsF01(SU) и CsF02(SU). Физическая часть CsF01(SU) была радикально модернизирована с целью повышения его характеристик.



ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО
ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

П Р И К А З

28 декабря 2012 г. № 1226

Москва

Об утверждении Государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени

В результате выполнения работ по заказу Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в Федеральном государственном унитарном предприятии «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений» (ФГУП «ВНИИФТРИ») усовершенствован Государственный первичный эталон единиц времени, частоты и национальной шкалы времени (ГЭТ 1-98).

Разработчик государственных поверочных схем для средств измерений времени и частоты.

В соответствии с решением коллегии Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 21 декабря 2012 г., п р и к а з ы в а ю:

1. Утвердить Государственный первичный эталон единиц времени, частоты и национальной шкалы времени в составе и с характеристиками, указанными в его паспорте, и присвоить ему регистрационный номер ГЭТ 1-2012 вместо ГЭТ 1-98.

2. Установить периоды подтверждения и применения Государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени.

3. Установить межповерочный интервал 4 года.

4. Установить место хранения Государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени – ФГУП «ВНИИФТРИ».

5. Утвердить ученым хранителем Государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени Костромина Владимира Петровича, кандидата физико-математических наук, начальника научно-исследовательского отдела ФГУП «ВНИИФТРИ».

6. Контроль за исполнением настоящего приказа возложить на заместителя Руководителя Федерального агентства Ф.В. Булыгина.

Руководитель
Федерального агентства Г.Н. Элькин

Рис. 37. Копия приказа 1226 от 28 декабря 2012 г.

Были предприняты усилия по международной легитимации реперов фонтанного типа ВНИИФТРИ, которые завершились успехом. Позднее на основе углубленных физических исследований и модернизации методических подходов была заметно снижена основополагающая характеристика CsF02(SU) - неопределённость типа u_B.

Успешное проведение работ по абсолютной калибровке новой специализированной временной ГНСС приемной аппаратуры привело к радикальному улучшению передачи ГЛОНАСС национальной шкалы времени UTC(SU).

Приказом № 1226 от 28 декабря 2012 г. по Федеральному агентству по техническому регулированию и метрологии «Об утверждении Государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени» [13], рис. 37, был утвержден Государственный первичный эталон единиц времени, частоты и национальной шкалы времени в составе и с характеристиками, указанными в его паспорте, и ему был присвоен регистрационный номер ГЭТ 1-2012

взамен ГЭТ 1-98. Утверждение эталона подвело итог пятилетней работе большого коллектива техников, инженеров, научных работников и подняло метрологические характеристики эталона на новый уровень [14]. Краткий перечень основных характеристик ГЭТ 1-2012 представлен на рис. 38.

Диапазон измерений по времени	**с**	**1×10^{-9} - 10^{8}**
по частоте	**Гц**	**1 - 5×10^{-14}**
Неисключенная систематическая относительная погрешность воспроизведения размера единицы времени		**5×10^{-16}**
Относительная нестабильность размера единицы времени	**$\sigma_y(\tau)$**	**$\leq 1\times10^{-15}$ $10 \leq \tau \leq 30$ суток**
|UTC – UTC(SU)|	**нс**	**≤ 10**

Рис. 38. Основные характеристики ГЭТ1-2012

Сопоставление их с характеристиками ГЭТ 1-98 2005 г. показывает заметный рост точностных характеристик. Самое главное достижение заключается в том, что после длительного периода отставания удалось войти в ряд передовых лабораторий, обладающих первичными цезиевыми стандартами частоты уровня в несколько единиц 10^{-16} и дающими заметный вклад в формирование МБМВ секунды СИ, улучшение в 100 раз. Это позволяет нам независимым образом воспроизводить размер единицы времени - секунду СИ – в полном соответствии с её определением на уровне, сопоставимом с МБМВ.

Был расширен в 5 раз диапазон измерений частоты, вплоть до видимого диапазона спектра, что позволяет Российской Федерации независимо высокоточно реализовывать размер единицы длины - метр СИ, также с его определением в системе СИ.

Повышение в 5 раз стабильности размера единицы обеспечивается надежным и корректным его хранением ансамблем непрерывно функционирующих часов, поскольку цезиевые реперы частоты не являются непрерывно работающими приборами.

И, наконец, еще одно прорывное достижение – 100-кратное повышение согласования национальной шкалы времени UTC(SU) относительно мировой опорной временной системы UTC. Это результат, имеющий фундаментальное прикладное значение, в первую очередь для отечественной ГНСС ГЛОНАСС. Его достижение стало возможным благодаря таким приборным решениям, как: первичный цезиевый репер, ансамбль новых надежных и хорошо прогнозируемых часов, новые системы и каналы сличений, а также алгоритмически - программные продукты [15, 16].

Алгоритм времени определяет как (на основе ансамбля независимых часов с принципиально различными частотами и моментами времени), формируются национальная шкала атомного времени TA(SU) с размером единицы времени СИ(SU), независимо задаваемым первичными цезиевыми реперами CsF01(SU) и CsF02(SU) в соответствии с его определением в сис-

теме СИ, и опирающаяся на нее следящая за UTC национальная шкала UTC(SU).

Характерными чертами алгоритма времени являются [16]:

- хранение размера единицы времени, воспроизводимого первичными цезиевыми реперами частоты ВНИИФТРИ фонтанного типа, обеспечивается ансамблем непрерывно работающих Н-мазеров;
- размер единицы времени в шкале TA(SU) соответствует СИ(SU), воспроизводимым первичными цезиевыми реперами частоты фонтанного типа CsF01(SU) и CsF02(SU);
- шкала TA(SU) является автономной и независимой;
- интервал прогнозирования хода часов для формирования TA(SU) составляет 1 месяц. Прогноз базируется на отсчетах CsF01/02(SU) – Cl 4038jj на интервале в несколько месяцев (обычно 8-10). Модель прогнозирования первого порядка по частоте;
- во избежание скачков по частоте в случае замены или отсутствия данных CsF01/02(SU) – Cl 4038jj, а также при переходе через окончание месяца в алгоритме предусмотрены специальные меры.

Специализированное программное обеспечение, реализующее алгоритм времени, было предварительно тестировано на основе эмулированных данных. При этом задавались «часовые данные» и данные по первичному стандарту частоты относительно внешней идеальной опорной системы REF на суточном базисе. Статистические характеристики часовых данных относительно REF соответствовали реальному поведению часов с точки зрения спектрального состава шумов, но были намеренно ухудшены по сравнению с фактическими характеристиками. Что касается модели Cs-REF, то она предполагала белый частотный шум уровня $\sigma_y(\tau) = 2\cdot10^{-15}/\sqrt{\tau}$ (τ сутки), который затем выходил на фликкерную полку уровня $\sigma_y(\tau) = 3\cdot10^{-16}$.

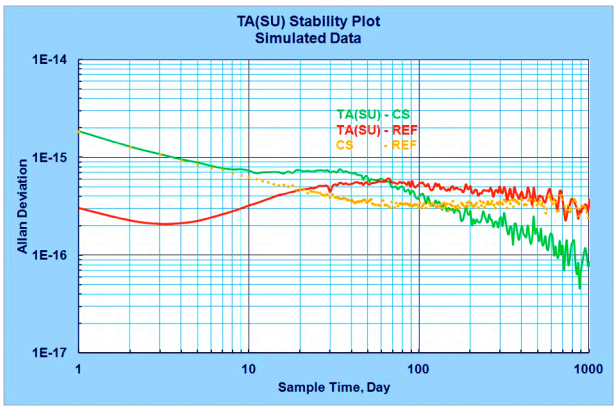


Рис. 39. Характеристики нестабильности сформированной атомной шкалы времени TA(SU) на основе эмулированных данных часов и цезиевого репера частоты

Современные реальные характеристики, по крайней мере в части белого частотного шума, заметно лучше - $\sigma_y(\tau) = 1\cdot10^{-15}/\sqrt{\tau}$. Оценки характеристик нестабильности размера единицы времени в системе TA(SU), сформированной с помощью этих эмулированных данных и программных

средств, реализующих описанный алгоритм, относительно REF, а также относительно Cs, приведены на рис. 39.

Поведение нестабильности частоты TA(SU) – REF (красная кривая) полностью укладывается в качественное и количественное ожидание – на интервалах первых суток улучшение нестабильности TA(SU) связано с элементарным статистическим усреднением по ансамблю из 6 часов. Реальное влияние Cs проявляется, как и следовало ожидать, на больших интервалах, когда обнажается подавление дрейфа частоты часов. Характерный подъём в районе 30 суток связан с постоянной времени алгоритма 1 месяц и является простым следствием теории регулирования. На больших интервалах времени оценки нестабильности TA(SU) относительно REF сливаются с аналогичными для Cs – REF. Ещё более поучительным выглядит поведение зависимости нестабильности частоты разности TA(SU) – Cs (зеленая кривая). На ней четко видно слежение TA(SU) за Cs, что выражается в устойчивом снижении нестабильности разности TA(SU) – Cs на больших интервалах времени до уровня ниже $1 \cdot 10^{-16}$!

Представленные на рис.40 зависимости нестабильности частоты получены фактически на основе внутренних данных ГЭВЧ. При этом хотелось бы напомнить, что в эмулированные часовые данные помимо шумовых компонент, описывающих статистические свойства часов, включены не только приближенные к реальным частоты и дрейфы частоты часов, но и долгопериодические вариации дрейфа. Измеренные разности между прогнозируемой вперед на интервал 1 месяц частотой часов относительно TA(SU) и её реальным апостериорным значением, представленные на рис.40 и характеризуемые средним квадратом разности (RMS), подтверждают обоснованность выбора в алгоритме времени интервала прогнозирования.

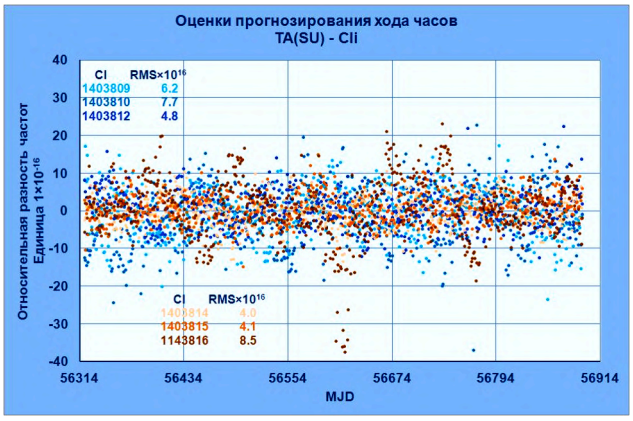


Рис. 40. Разности по частоте между прогнозируемыми на интервал 1 месяц и фактическими разностями часов ГЭВЧ относительно TA(SU)

Полученная на основе величин RMS оценка прогнозируемости ансамбля часов $\leq 3 \cdot 10^{-16}$, в свою очередь, характеризует реальную способность ансамбля часов хранить воспроизведённый цезиевым репером размер СИ(SU). Это довольно высокая величина, но вместе тем, она менее чем в 2 раза отличается от заявленной неопределённости типа u_B для цезиевых реперов частоты ВНИИФТРИ и в случае их дальнейшего совершенствования будет служить препятствием для объективной оценки их метрологических характеристик.

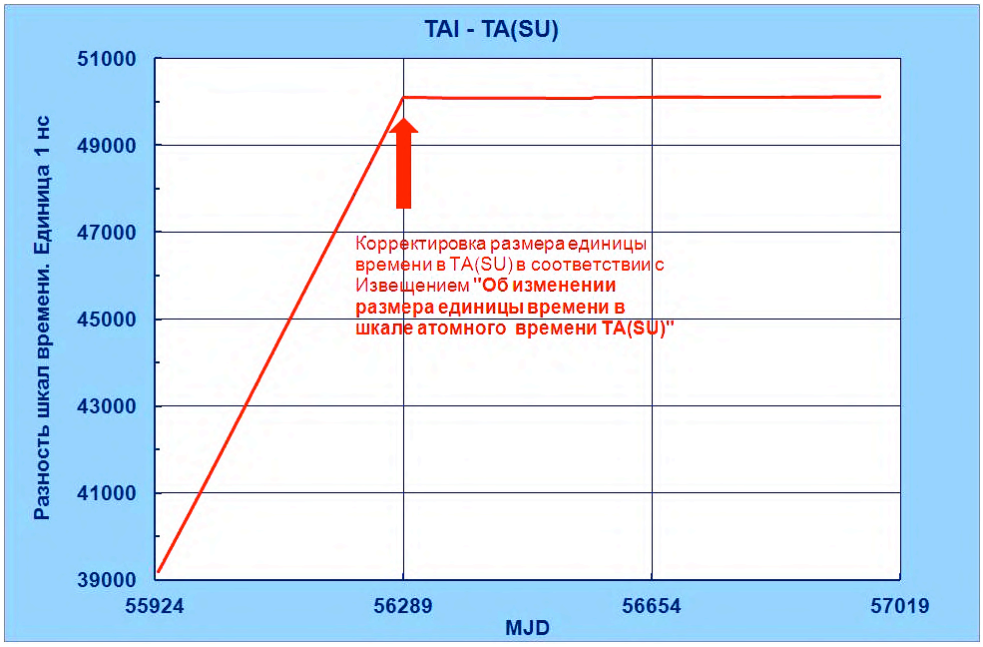
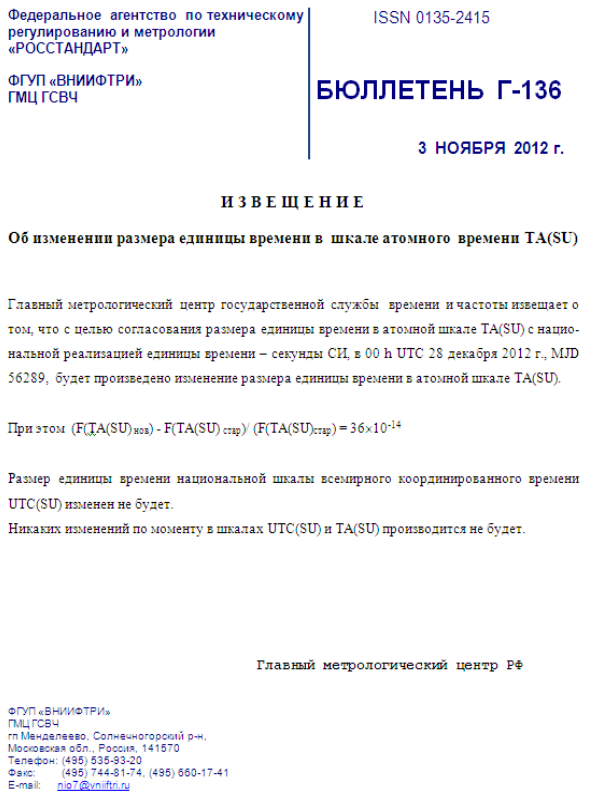


Рис.41. Изменение размера единицы времени в TA(SU) в соответствии с Бюллетенем Г-136

Успешно завершенные испытания алгоритма и его программной реализации [15] позволили перейти к его практическому внедрению, которое потребовало изменения размера единицы времени в национальной атомной шкале времени TA(SU), рис. 41, для согласования его с размером единицы времени, воспроизводимым первичными цезиевыми реперами ВНИИФТРИ фонтанного типа.

Изменение размера единицы времени в TA(SU) было выполнено в 00h00m MJD 56289, 28 декабря 2012 г. на основании заранее выпущенного Извещения «Об изменении размера единицы времени в шкале атомного времени TA(SU)» [17], рис. 42.



Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии «РОССТАНДАРТ»

ФГУП «ВНИИФТРИ»
ГМЦ ГСВЧ

ISSN 0135-2415

БЮЛЛЕТЕНЬ Г-136

3 НОЯБРЯ 2012 г.

ИЗВЕЩЕНИЕ

Об изменении размера единицы времени в шкале атомного времени TA(SU)

Главный метрологический центр государственной службы времени и частоты извещает о том, что с целью согласования размера единицы времени в атомной шкале TA(SU) с национальной реализацией единицы времени – секунды СИ, в 00 h UTC 28 декабря 2012 г., MJD 56289, будет произведено изменение размера единицы времени в атомной шкале TA(SU).

При этом $(F(TA(SU)_{нов}) - F(TA(SU)_{стар}) / (F(TA(SU)_{стар}) = 36\times10^{-14}$

Размер единицы времени национальной шкалы всемирного координированного времени UTC(SU) изменен не будет.
Никаких изменений по моменту в шкалах UTC(SU) и TA(SU) производится не будет.

Главный метрологический центр РФ

ФГУП «ВНИИФТРИ»
ГМЦ ГСВЧ
гп Менделеево, Солнечногорский р-н,
Московская обл., Россия, 141570
Телефон: (495) 535-93-20
Факс: (495) 744-81-74, (495) 660-17-41
E-mail: nio7@vniiftri.ru

Рис. 42. Бюллетень Г-236 от 3 ноября 2012

Анализ нестабильности TA(SU) по отношению к TAI является лучшим доказательством работоспособности предложенного алгоритма. При этом, конечно, необходимо принять во внимание, с одной стороны, шумовые характеристики канала сличений, а с другой, конечную нестабильность TAI, определяемую нестабильностью свободной атомной шкалы EAL [18]. ALGOS (алгоритм формирования EAL и TAI) оптимизирован на достижение наиболее высоких результатов по стабильности EAL на интервалах ~ месяца [18], при этом $\sigma y(1) = 5.6\cdot10^{-16}$ и $\sigma y(2) = 5.3\cdot10^{-16}$ (τ = месяц).

На рис.43 приведены оценки нестабильности атомных шкал ведущих лабораторий относительно TAI на интервале MJD 56289–57019 (2013-2014), после проведения изменения размера единицы времени [17]. Они подтверждают, что работы по аппаратной и алгоритмической модернизации ГЭВЧ [19] восстановили позиции ГЭТ 1-2012 в ряду лучших эталонов мира, характеристики нестабильности атомных шкал которых сопоставимы с самой опорной системой.

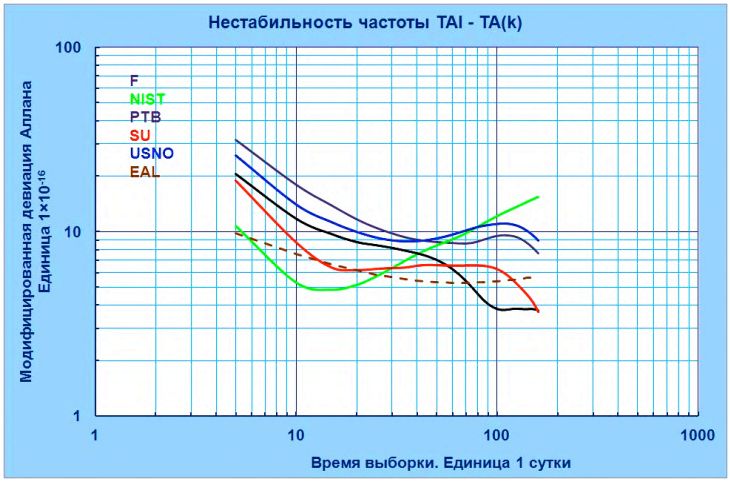


Рис.43. Нестабильности атомных шкал ведущих лабораторий относительно TAI. Пунктиром показана оценка нестабильности EAL [17]

При сравнивании приведенных на рис. 43 оценка нестабильности с аналогичными на рис.8 очевиден достигнутый прогресс как в каналах сличений (4-5 раз) – нестабильности на интервале 5 суток, так и собственно в нестабильности TA(SU) на интервалах месяц – два (3-4 раза).

Строго говоря, мы сталкиваемся с достаточно неприятной ситуацией, когда становится трудно сделать состоятельные статистические оценки – очевидно, что на интервалах несколько месяцев и более практически все приведенные шкалы не являются статистически независимыми.

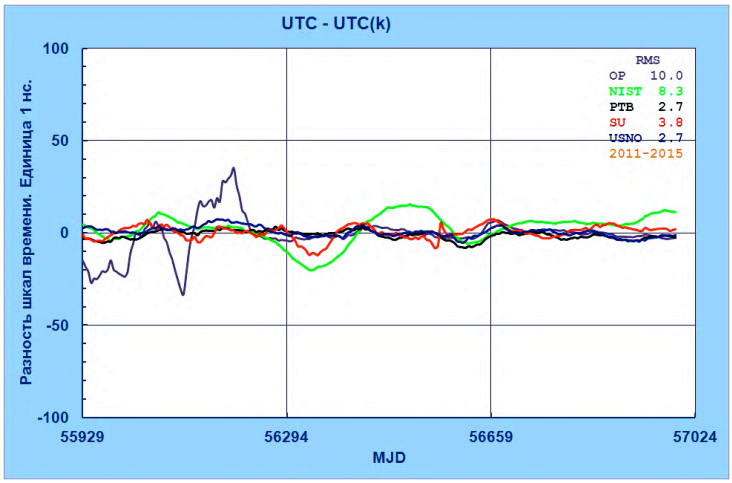


Рис.44. Разности шкал ведущих лабораторий UTC(k) относительно UTC

В завершение обзора интегральных характеристик ГЭТ 1-2012 на рис. 44 приведены разности локальных версий шкалы Всемирного координирован-

ного времени лучших эталонов мира UTC(k) относительно мировой опорной системы UTC на основании официальных публикаций МБМВ [20] за период MJD 55924–57019 (2012-2014), а также вычисленные оценки среднего квадрата разности этих величин – RMS. Они, еще с одной стороны, подчеркивают радикальный прогресс в формировании национальной шкалы времени Российской Федерации UTC(SU), достигнутый в результате глубокой модернизации ГЭВЧ. Так, по сравнению с 2005 г. степень согласования UTC(SU) с UTC повышена более 11 раз – 42.3/3.8. UTC(SU) по степени согласования с UTC практически приблизилась к UTC(USNO) – отставание 40 % в 2012-2014 по сравнению с 920% в 2002-2005.

После завершения этапа 2007-2011 ФЦП «Глобальная навигационная система» работы по модернизации ГЭТ 1-2012 были продолжены. В период 26 октября – 07 ноября 2012 г. с использованием транспортируемого комплекта дуплексного оборудования ВНИИФТРИ была проведена дифференциальная калибровка стационарного комплекта дуплексного оборудования ВНИИФТРИ относительно PTB с неопределённостью типа uB ≤ 1 нс. На основании представленного в МБМВ совместного отчета ВНИИФТРИ-PTB в мае 2013 результаты калибровки были признаны с присвоением идентификационного номера калибровки - CI 281. PTB является ключевым пунктом международной системы сличений [21] под эгидой МБМВ, и поэтому калибровка носила принципиальный характер.

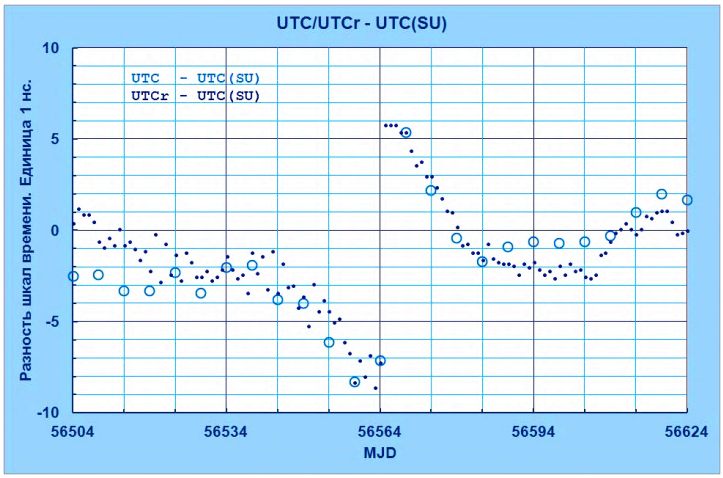


Рис.45. Разности шкал ведущих лабораторий UTC(k) относительно UTC

Эти результаты, а также дополнительная калибровка ГНСС канала UTC(SU) – UTC(OP), проведенная в августе 2013 с помощью перевозимого приемника ВНИИФТРИ TTS4, послужили основой для переключения МБМВ оперативного канала сличений с UTC(SU) с ГНСС на дуплекс в MJD 56564 (29 сентября 2013 г.), [22]. До даты MJD 56564 канал сличений ГНСС,

после неё – дуплекс. По рассеянию результатов UTCr-UTC(SU) наглядно видно снижение шумов в результатах сличений. Отражение снижения шумов в канале сличений отражено в Циркулярах Т №№ 309 – 310 [23], где показано изменение неопределенностей типа uA и uB с 1.0 нс и 5.2 нс до 0.5 нс и 1.9 нс соответственно.

На протяжении 2012 – 2014 г.г. продолжались работы по совершенствованию метрологических характеристик первичных цезиевых реперов фонтанного типа CsF01(SU) и CsF02(SU).

Физическая часть CsF01(SU) была радикально модернизирована с целью повышения его характеристик. Была заменена пролётная зона репера, установлен новый симметричный резонатор с симметричной СВЧ запиткой, новая зона охлаждения и в целом новая вакуумная система [24]. Первый экспериментальный запуск репера состоялся в конце августа 2014 г.

CIRCULAR T 315 ISSN 1143-1393
2014 April 08, 17h UTC

BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES
ORGANISATION INTERGOUVERNEMENTALE DE LA CONVENTION DU METRE
PAVILLON DE BRETEUIL F-92312 SEVRES CEDEX TEL. +33 1 45 07 70 70 FAX +33 1 45 34 20 21 tai@bipm.org

Standard	Period of Estimation	d	u_A	u_B	$u_{1/Lab}$	$u_{1/Tai}$	u	$u_r$rep	Ref(u_y)	Ref(u_B)	u_B(Ref)	Note
PTB-C51	56714 56744	-9.24	6.00	8.00	0.00	0.07	10.00	PFS/NA		T148	8.	(1)
PTB-C52	56714 56744	-0.83	3.00	12.00	0.00	0.07	12.37	PFS/NA		T148	12.	(1)
NPL-CsF2	56714 56744	-0.09	0.22	0.22	0.09	0.20	0.38	PFS/NA		T284	0.23	(2)
SYRTE-FO1	56714 56744	-0.84	0.25	0.40	0.11	0.20	0.52	PFS/NA		T301	0.37	(3)
SYRTE-FO2	56719 56744	-1.63	0.20	0.27	0.11	0.23	0.42	PFS/NA		T301	0.23	(3)
PTB-CSF1	56729 56739	-0.12	0.13	0.73	0.02	0.18	0.76	PFS/NA		T162	1.40	(4)
PTB-CSF2	56729 56739	0.02	0.16	0.35	0.02	0.18	0.42	PFS/NA		T287	0.41	(4)
NIST-F2	56489 56534	-1.22	0.44	0.15	0.16	0.14	0.51	PFS/NA		[1]	0.11	(5)
IT-CsF2	56079 56099	2.38	0.32	0.25	0.20	0.28	0.53	PFS/NA		[2]	0.18	(6)
IT-CsF2	56194 56214	-0.11	0.42	0.21	0.20	0.28	0.58	PFS/NA		[2]	0.18	(6)
IT-CsF2	56234 56249	-0.93	0.31	0.18	0.10	0.37	0.52	PFS/NA		[2]	0.18	(6)
IT-CsF2	56394 56424	-0.20	0.34	0.18	0.20	0.20	0.48	PFS/NA		[2]	0.18	(6)
IT-CsF2	56614 56634	-1.31	0.33	0.18	0.20	0.28	0.51	PFS/NA		[2]	0.18	(7)
IT-CsF2	56634 56649	-0.74	0.41	0.18	0.20	0.37	0.61	PFS/NA		[2]	0.18	(7)
SU-CsFO2	56379 56409	-0.06	0.36	0.50	0.11	0.65	0.90	PFS/NA		[3]	0.50	(8)
SU-CsFO2	56409 56439	0.49	0.28	0.50	0.10	0.65	0.87	PFS/NA		[3]	0.50	(8)
SU-CsFO2	56439 56469	0.79	0.26	0.50	0.10	0.65	0.87	PFS/NA		[3]	0.50	(8)
SU-CsFO2	56484 56504	0.41	0.33	0.50	0.11	0.94	1.12	PFS/NA		[3]	0.50	(9)
SU-CsFO2	56504 56534	-0.73	0.30	0.50	0.11	0.65	0.88	PFS/NA		[3]	0.50	(10)
SU-CsFO2	56684 56714	0.50	0.29	0.50	0.10	0.33	0.67	PFS/NA		[3]	0.50	(11)

Рис. 46. Публикации о размере единицы времени первичным цезиевым репером фонтанного типа CSF02(SU)

В 2012-2013 гг. были продолжены работы по разностороннему изучению метрологических характеристик первичного цезиевого репера фонтанного типа CsF02(SU). Первоначально основная направленность работ была на международную легитимацию репера. Материалы исследований направлялись международным экспертам из состава Рабочей группы Консультативного комитета по времени и частоте [25], анализировались и возвращались на доработку. После нескольких циклов анализа представленные данные сличений и бюджет неопределённостей были признаны состоятельными, и в Циркуляре Т МБМВ, начиная с № 315 (апрель 2014), рис. 46, были начаты публикации о размере единицы времени, воспроизводимой первичным цезиевым репером фонтанного типа CsF02(SU) [26]. Бюджет неопределённости типа u_B был признан на уровне

$5.0 \cdot 10^{-16}$. С этого момента ВНИИФТРИ дает вклад в формирование единицы времени системы СИ – секунды.

Рис.47. Группа разработчиков CsF01/02(SU)

Были продолжены усилия по дальнейшему снижению неопределённости типа uB как за счет углубленного изучения параметрических зависимостей частоты репера, так и за счет совершенствования методических аспектов формирования бюджета неопределённости типа u_B. В результате это привело снижению для CSF02(SU) неопределённости типа u_B до уровня $2.5 \cdot 10^{-16}$, Циркуляр Т № 321, [27].

Еще одним важным достижением 2014 г. является резкое улучшение передачи национальной шкалы времени системой ГЛОНАСС. В составе навигационного сообщения ГЛОНАСС содержится так называемая величина τc, поправка к шкале времени системы ГЛОНАСС относительно UTC(SU), использование которой в приемной аппаратуре ГНСС позволяет потребителю получить на выходе приемника импульсный сигнал 1 Гц, представляющий физическую реализацию национальной шкалы времени UTC(SU). Неопределённость типа u_B этого сигнала относительно UTC(SU) определяется многими параметрами, среди них ключевым является величина τc. На протяжении многих лет разница между передаваемой в составе навигационного сообщения ГЛОНАСС величиной τc и измеренным ВНИИФТРИ значением разности UTC(SU) и системным временем ГЛОНАСС (GLO ST), регулярно публикуемым в официальных бюллетенях ГВСЧ серии 3 [28], составляла ~ 200 нс.

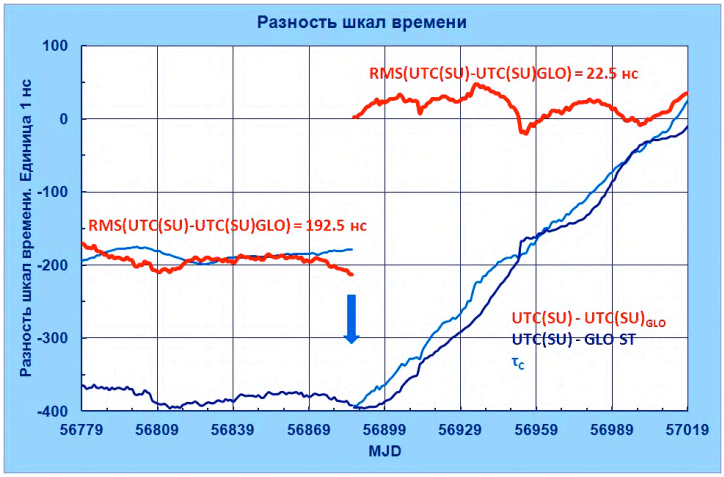


Рис.48. Изменение величины τ_c и корректировка шкалы системного времени ГЛОНАСС

После проведения во ВНИИФТРИ абсолютной калибровки задержки специализированных временных приёмников ГЛОНАСС [29] ПКУ ГЛОНАСС было принято решение о приведении значения величины τ_c в соответствие с ее действительным значением и корректировке шкалы системного времени ГЛОНАСС с целью её лучшего согласования с национальной шкалой времени UTC(SU). Эти действия были осуществлены в MJD 56887 (18 августа 2014 г.), рис. 48. Для извещения потребителей о планируемых мероприятиях ГМЦ ГСВЧ заблаговременно было выпущено соответствующее извещение в Бюллетене серии Г [30].

Проведенные изменения радикально улучшили качество передачи ГЛОНАСС информации о национальной шкале времени UTC(SU). Если до MJD 56887 неопределённость типа u_B, характеризуемая как средний квадрат разности RMS(UTC(SU) – UTC(SU)GLO), составляла около 192.5 нс, то после этого она уменьшилась до 22.5 нс, улучшение почти в 10 раз. Для примера напомним, что аналогичный параметр для системного времени GPS ST RMS(UTC(USNO) – UTC(USNO)GPS) ≤ 1 нс [31].

Заключение

Прошедшее десятилетие для Государственного первичного эталона было разным, но в целом положительным. Оно началось с наследия 90 годов, когда эталон, несмотря на все трудности, поддерживал заданные метрологические характеристики. Модернизация системы ГЛОНАСС и её разворот к массовому гражданскому потребителю потребовали радикального повышения метрологических характеристик ГЭВЧ в качестве временной опорной системы и доведения их до потребителя.

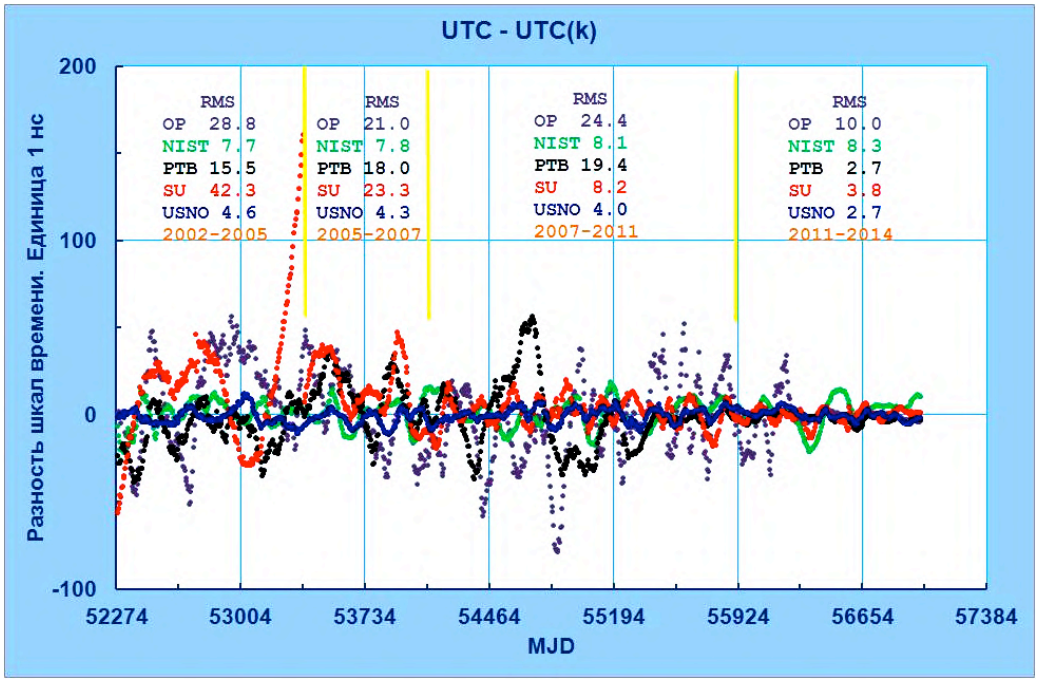


Рис.49. Динамика повышения степени эквивалентности национальной шкалы времени Российской Федерации UTC(SU) по отношению к мировой опорной временной системе UTC

В период 2007 – 2015 гг. был создан практически полностью новый аппаратурный комплекс эталона, была в десятки раз повышена надежность его отдельных комплексов, точностные характеристики эталона были улучшены по разным параметрам от десятков до сотен раз. Возможно, самым наглядным примером может служить динамика улучшения одной из основных, обращенных к потребителю, интегральных характеристик – согласование национальной шкалы времени Российской Федерации UTC(SU) с мировой опорной временной системой – шкалой времени UTC, рис. 49.

Это стало возможным только потому, что были созданы средства независимого воспроизведения размера единицы времени в полном соответствии с его определением в системе СИ – цезиевые реперы частоты фонтанного типа, была обеспечена возможность хранения размера единицы с помощью ансамбля лучших в мире квантовых часов отечественного производства – Н-мазеров, были радикально усовершенствованы системы сличений и разработана новая алгоритмика формирования национальных шкал времени TA(SU) и UTC(SU). В работах по модернизации многих комплексов эталона принимали активное участие молодые сотрудники подразделения, см. рис. 47, которые приобрели опыт работы в настоящем деле. И это − тоже одно из достижений последнего десятилетия.

Проведенная модернизация заслуженно возвратила ГЭВЧ в число лучших эталонов времени и частоты в мире.

Литература

1. SI unit of time (second), 13 CGPM, Le Système international d'unités, 8e edition 2006, p.113, Bureau international des poids et mesures, Organisation intergouvernementale de la Convention du Mètre.
2. Абашев Ю.Г., Барышев В.Н., Елкин Г.А., Елкина Л.П., Пуртов В.И., Пушкин С.Б. Исследование квантовых средств измерения времени и частоты.- (М.: Труды ВНИИФТРИ, 1987, с. 73).
3. Барышев В.Н., Елкин Г.А., Яковлев Ю.Н. Измерения в области времени и частоты.- Труды ВНИИФТРИ, 1990, с. 28-30.
4. Содержание государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения земли, Книга 1, (отчёт заключительный) «ГСВЧ-2006» 07.06. 17.01., Менделеево, 2007 г.
5. Need to improve worldwide time coordination to UTC, Recommendation S5 (1993), Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde, Rapport de la 12e session, 1993.
6. Бюллетень Г- 78, Извещение, «Об изменении реализации шкалы времени UTC(SU)», Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. Институт метрологии времени и пространства, ФГУП «ВНИИФТРИ» ISSN 0135-2415, 20 декабря 2004 г.
7. Domnin Yu. S, Baryshev V. N., Boyko A. I., Elkin G. A., Novoselov A. V., Kopylov. L. N. and Kupalov D. S. Measurement Techniques, vol. 55, No. 10, January, 2013.
8. Claudine Thomas, Peter Wolf and Patrizia Tavella, Time Scales, Monographie 94/1, BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES, Pavillon de Breteuil, F-92312 SEVRES Cedex, 2010.
9. Bolginova S., Koshelyaevsky N., Pesterev S., Pol'nikov N., Popkova E. Application of three-cornered-hat method for estimation uncertainties type u_A and u_B of time&frequency measurement instruments, 2013 IFCS-EFTF Proceedings, 21-25 July 2013, Prague, Czech Republic.
10. ГОСТ 8.129-2013 ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений времени и частоты.
11. Mutual recognition of national measurement standard and of calibration and measurement certificates issued by national metrology institutes, Paris, 14 October 1999.
12. Lewandowski W. and Tisserand L. Relative characterization of GNSS receiver delays for GPS and GLONASS C/A codes in the L1 frequency band at the OP, SU, PTB and AOS, Rapport BIPM-2010/04, BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES, Pavillon de Breteuil, F-92312 SEVRES Cedex, 2010.

13. Об утверждении Государственного первичного этаона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени, Приказ от 28 декабря 2012, № 1226, Министерство промышленности и торговли Российской Федерации, Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии.
14. Донченко С.И., Блинов И.Ю., Гончаров А.С., Домнин Ю.С., Костромин В.П., Норец И.Б. Состояние и перспективы развития Государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1-2012.- Труды 7-го Международного симпозиума «Метрология времени и пространства», 17-19 сентября 2014, Пушкарская слобода, Суздаль, Владимирская обл.- Россия, М.: ФГУП «ВНИИФТРИ» - 2017.
15. Koshelyaevskiy N., Sokolova O. and Maslennikova M. The new time algorithm for national time scales of Russian Federation, Proceeding of the 6th International Symposium “Metrology of Time and Space”, 17-19 September 2012, Morozovka Holiday Hotel, Mendeleevo, Moscow Region, Russia.- M.: ФГУП «ВНИИФТРИ»; 2017.
16. Koshelyaevsky N. B., Sokolova O. Yu., Clock ensemble based on H-masers as a keeping mean for the national time unit and the national time scale generation, Proceeding of the 7th International Symposium “Metrology of Time and Space”, 17-19 September 2014, Pushkarskaya Sloboda Hotel, Suzdal, Vladimir region, Russia, to be published.
17. И З В Е Щ Е Н И Е. Об изменении размера единицы времени в шкале атомного времени TA(SU), Бюллетень Г-136, Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии «РОССТАНДАРТ», ФГУП «ВНИИФТРИ», ГМЦ ГСВЧ, 3 ноября 2012 г.
18. Circular T, 4 - Duration of the TAI scale interval, Bureau International des Poids et Mesures, Organisation Intergouvernementale de la Convention du Metre, Pavillon de Breteuil.
19. Blinov I., Domnin Yu., Donchenko S., Koshelyaevsky N., Kostromin V. Progress at the State Time and Frequency Standard of Russia, Proceeding of the 26th European Frequency and Time Forum, 23 – 27 April 2012, Gothenburg, Sweden.
20. Circular T 289-324, 1 - Coordinated Universal Time UTC and its local realizations UTC(k). Computed values of [UTC-UTC(k)] and uncertainties valid for the period of this Circular, Bureau International des Poids et Mesures, Organisation Intergouvernementale de la Convention du Metre, Pavillon de Breteuil.
21. BIPM Annual Report on Time Activities, Vol. 3, Bureau International des Poids et Mesu-res, Pavillon de Breteuil, F-92312 SEVRES Cedex, 2010.

22. И З В Е Щ Е Н И Е. Об изменении Департаментом времени МБМВ канала сличений национальной шкалы времени UTC(SU) со шкалой всемирного координированного времени UTC, Бюллетень Г-142, Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии «РОССТАНДАРТ», ФГУП «ВНИИФТРИ», ГМЦ ГСВЧ, 26 сентября 2013 г.
23. Circular T 309-310, 1 - Coordinated Universal Time UTC and its local realizations UTC(k). Computed values of [UTC-UTC(k)] and uncertainties valid for the period of this Circular, Bureau International des Poids et Mesures, Organisation Intergouvernementale de la Convention du Metre, Pavillon de Breteuil.
24. Blinov I., Domnin Yu., Donchenko S., Goncharov A.,Koshelyaevsky N., Kostromin V., Noretz I., Smirnov Yu., Progress at the State Time and Frequency Standard of Russia, Proceedings of the 45th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Systems and Applications Meeting, December 3 - 5, 2013, Hyatt Regency Bellevue on Seattle's Eastside, Washington, USA.
25. CCTF Strategy Document 11 Feb 2013, Version 0.5 29/07/2013.
26. Circular T 315, 4 - Duration of the TAI scale interval, Bureau International des Poids et Mesures, Organisation Intergouvernementale de la Convention du Metre, Pavillon de Breteuil.
27. Circular T 321, 4 - Duration of the TAI scale interval, Bureau International des Poids et Mesures, Organisation Intergouvernementale de la Convention du Metre, Pavillon de Breteuil.
28. Время выхода сигналов времени с антенн радиостанций , Бюллетень З, Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии «РОССТАНДАРТ», ФГУП «ВНИИФТРИ», ГМЦ ГСВЧ.- М.: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2017.
29. Блинов И.Ю., Федотов В.Н., Смирнов Ю.Ф., Капитонов А.Л. Абсолютная калибровка приемников сигналов ГНСС в ФГУП «ВНИИФТРИ».– Доклады 7-го Международного симпозиума «Метрология времени и пространства», 17-19 сентября 2014, Пушкарская слобода, Суздаль, Владимирская обл., Россия,- М:- ФГУП «ВНИИФТРИ», 2017.
30. И З В Е Щ Е Н И Е, О проведении коррекций значений поправок к шкале времени системы ГЛОНАСС относительно UTC(SU), Бюллетень Г-145, Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии «РОССТАНДАРТ», ФГУП «ВНИИФТРИ», ГМЦ ГСВЧ, 11 августа 2014 г.
31. Demetrios Matsakis, Time and Frequency Activities at the U.S. Naval Observatory, Proceedings of the 45th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Systems and Applications Meeting, December 3 - 5, 2013, Hyatt Regency Bellevue on Seattle's Eastside, Washington, USA.