



УДК 621.371

ЭВОЛЮЦИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СЕКУНДЫ – ИСТОРИЧЕСКИЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

П.И. Нежмаков, кандидат технических наук, первый заместитель генерального директора ННЦ “Институт метрологии” по научной работе, г. Харьков

В.Н. Романько, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, директор научного центра ННЦ “Институт метрологии”, г. Харьков



П.И. Нежмаков



В.Н. Романько

Проведен обзор некоторых исторических аспектов определения секунды, рассмотрены вопросы развития времячастотных измерений в Украине. Показано, что Украина вносит достаточно существенный вклад в формирование международных шкал времени TAI и UTC.

The review of several historical aspects of definition of a second was conducted and the questions on development of time frequency measurements in Ukraine were considered. It was shown that Ukraine contributes significantly in the formation of the international time scale of TAI and UTC.

Введение

На современном уровне развития науки время измеряют путем наблюдения за периодически повторяющимися процессами. Началом счета времени нашей Вселенной считается событие, произошедшее почти 15 млрд. лет назад, после которого Вселенная начала расширяться [1]. При этом термин “время” определяется как координата строго необратимого континуума упорядоченных событий, а “шкала времени” – как система однозначно упорядоченных событий, на которой время является мерой интервала между двумя событиями или же мерой длительности события. Определение момента и промежутка времени, введение понятия шкалы времени включают необходимость выбора некоторого периодического астрономического или физического процесса, построение теории этого процесса и задание единицы времени. В качестве общепринятой единицы измерения времени при-

нята секунда. В Международной системе единиц SI за единицу времени в 1967 г. принята атомная секунда, которая связана с частотой сверхтонкого расщепления атома цезия-133 в основном состоянии [2].

Таким образом, в 2012 г. атомное хронометрирование праздновало своё сорокапятилетие. За это время метрологические характеристики цезиевых стандартов частоты были улучшены на пять порядков, и относительная нестабильность цезиевых фонтанов определяется величиной менее $1 \cdot 10^{-16}$ за сутки [3, 4].

Казалось бы, что позиция определения секунды, связанная с колебаниями излучения атома цезия-133, непоколебима. Однако в начале этого века произошли события, связанные с “великим синтезом лазерных технологий” [5], когда с помощью фемтосекундных лазеров и оптической частотной гребенки стало возможным исследовать оптические стандарты частоты, основанные на переходах в ионах различных химических элементов на частотах, на несколько порядков более высоких, чем рабочая частота цезиевых стандартов. Было доказано, что стабильность различных оптических стандартов частоты может поддерживаться на уровне от $1 \cdot 10^{-17}$ до $1 \cdot 10^{-18}$ [6–8]. В экспериментальном образце стронциевых оптических часов, разработанном в Токийском университете, ионы стронция находятся в оптической ловушке на перекрестке шести лазерных лучей, под влиянием которых они удерживаются в “энергетических ямах”, почти не взаимодействуя и излучая колебания электромагнитных волн с нестабильностью частоты $1 \cdot 10^{-17}$ [9]. В начале марта 2012 г. группа ученых из Университета Нового Южного Уэльса, Технологического института Джорджии и Университета Невады установила, что ядерные часы на основе тория-229 в теории на несколько порядков точнее всех существующих аналогов [10]. Можно ожидать, что в ближайшем будущем будут созданы оптические стандарты частоты с относительной нестабильностью на уровне $1 \cdot 10^{-18}$, что не исключает введения нового определения секунды, связанного с изменением ее абсолютного значения [11–13].

24-я Генеральная конференция по мерам и весам (CGPM) приняла специальную Резолюцию 8 “О пересмотре внедрения в практику (*mise en pratique*) метра и о разработке новых оптических стандартов частоты”. В Резолюции отмечаются: быстрые темпы улучшения характеристик оптических эталонов частоты; работа национальных метрологических институтов (НМИ) над методиками сличения для оптических стандартов частоты на коротких расстояниях и необходимость разработки на международном уровне методик сличения на удаленном расстоянии эталонов частоты в оптическом диапазоне; работа совместной Рабочей группы Консультативного комитета по времени и частоте (CCTF) и Консультативного комитета по длине (CCL) по пересмотру частот, составляющих оптическую основу секунды, а также создание Рабочей группы CCTF по координации разработки методик передачи времени и частоты. НМИ рекомендуется выделить ресурсы на разработку оптических стандартов частоты и их сличения, а Международному бюро мер и весов (BIPM) – оказывать содействие в координации международного проекта с участием НМИ, направленного на изучение методик сличений для оптических стандартов частоты.

В статье, наряду с обзором некоторых исторических аспектов определения секунды, рассматриваются практические вопросы развития времячастотных измерений в Украине. Показано, что Украина вносит достаточно существенный вклад в формирование международных шкал времени. Намечены направления дальнейших исследований.

История определения секунды

Секунда не сразу вошла в число основных единиц измерений физических величин. Несмотря на то что 8 мая 1790 г. Национальное собрание Франции приняло определение метра, связанное с размерностью секунды: как длина маятника с полупериодом качания на широте 45° , равным 1 с, – исторически первой системой единиц физических величин была принятая в 1791 г. Национальным собранием Франции метрическая система мер, в основу которой были положены две единицы: метр и килограмм. При этом метр уже определялся как одна сорок миллионная часть Парижского меридиана. И только в 1881 г. была установлена система единиц физических величин СГС, в которой основными единицами являются сантиметр как единица длины, грамм как единица массы и секунда как единица времени. При этом секунда определялась периодическим процессом вращения Земли вокруг собственной оси [14].

Для решения двух связанных задач – определения эталонной системы координат и стандартного времени – в 1884 г. в Вашингтоне собралась Международная меридиальная конференция. Для унификации времени было решено ввести 24 часовых сектора, выбрав в качестве точки отсчета

Гринвичский меридиан. Среднее время по Гринвичу (GMT – *Greenwich Mean Time*) было принято в качестве первой в мире Глобальной шкалы времени (мерой времени, которая довольно близко соответствует среднесуточному движению солнца, наблюдаемому на начальном меридиане, на данный момент является Всемирное время UT – *Universal Time*). При исчислении времени отталкивались от периодического процесса вращения Земли вокруг собственной оси, и секунда, таким образом, составляла $1/86400$ часть суток (см. рис. 1).

В 1930-х гг. достигнутая точность механических часов позволила астрономам выяснить, что Земля вращается вокруг своей оси неравномерно. Продолжительность суток оказалась подверженной разным вариациям и зависящей от положения Земли на орбите при ее движении вокруг Солнца. Изменения скорости вращения на протяжении года составляют около $1 \cdot 10^{-8}$ с. Скорость вращения постепенно замедляется из-за ряда факторов, например, под гравитационным воздействием Луны. Эти заключения привели к необходимости перепределения эталонной секунды, раз уж старое ($1/86400$ -я суток) оказалось неточным. Было сформулировано понятие эфемеридной секунды, которая равнялась $1/31556925,9747$ конкретного тропического года, начинавшегося 1 января 1900 г. (или 31 декабря 1899 г.), и таким образом не была привязана к изменяющейся скорости вращения Земли вокруг своей оси. В 1956 г. Международный комитет мер и весов (CIPM) это определение секунды рекомендовал к использованию. Через четыре года CGPM приняла эфемеридную секунду за базовую единицу времени в SI.

Секунда эфемеридной шкалы (ET – *ephemeris time*) более постоянна по величине, чем секунда, определяемая средними солнечными сутками. Однако имеют место трудности, связанные с её реализацией, а также с хранением эфемеридного времени с помощью тех или иных часов. Шкала ET использовалась для определения секунды в SI между 1960 и 1967 гг. и продолжала использоваться для астрономического применения вплоть до 1970 г. Основным недостатком шкалы ET является сложность в её практической реализации. Проблема заключалась в том, что невозможно заново воспроизвести и измерить тропический 1900 г.

Усилия ученых разных стран по повышению точности измерения времени привели к появлению в середине 1950-х гг. первых атомных часов на пучке атомов цезия. Нестабильность этих часов была на несколько порядков меньше, чем у кварцевых часов, частота которых, к тому же, изменялась со временем из-за старения кристалла кварца. В результате был создан атомный эталон времени, одна секунда которого равнялась секунде эфемеридного времени. Новую систему синхронизировали с универсальным временем, начиная с 00:00:00 1 января 1958 г.

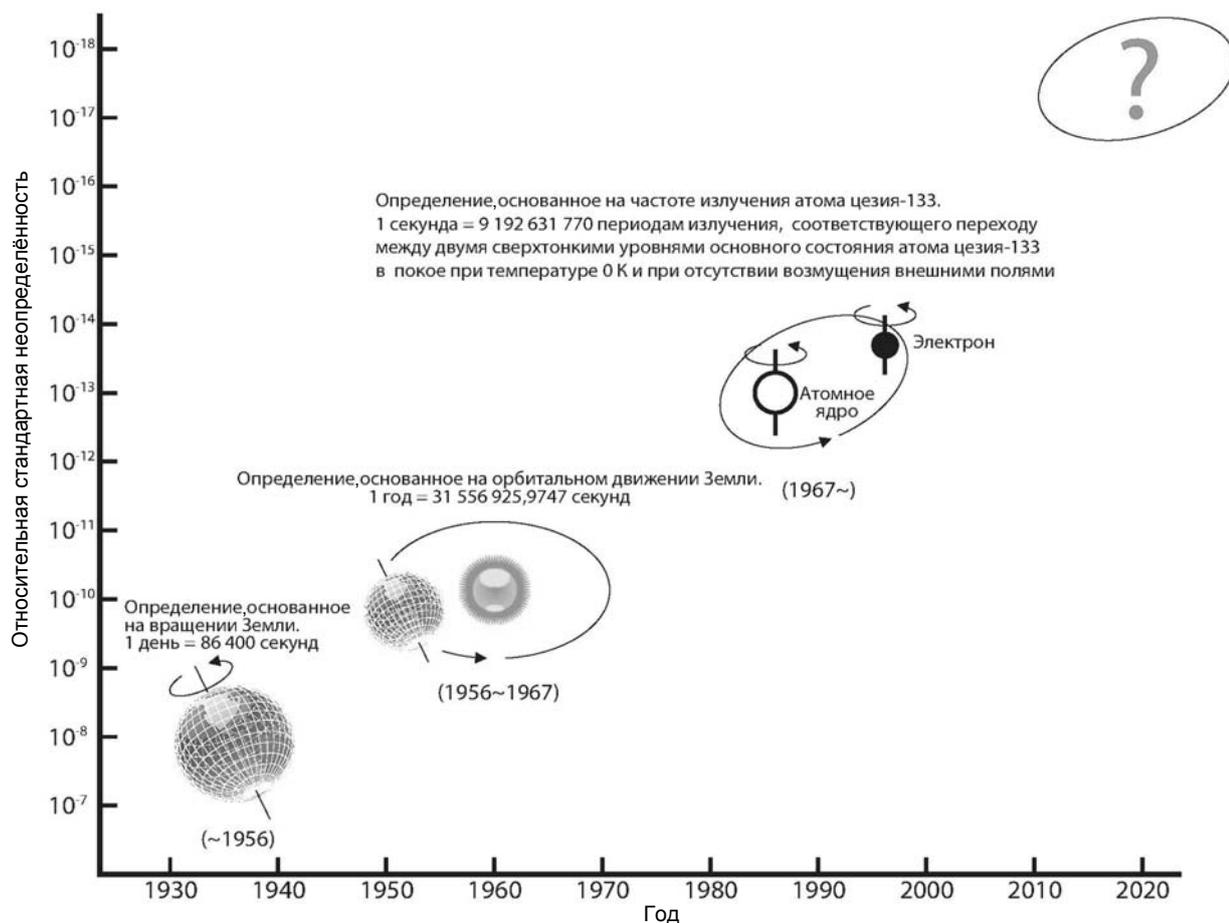


Рис. 1. Изменения в определении секунды

В 1967 г. CGPM приняла новое определение секунды, которое связано с колебаниями излучения атома цезия-133. В соответствии с этим определением, секунда равна длительности 9 192 631 770 колебаний, соответствующих частоте излучения при резонансном переходе между энергетическими уровнями сверхтонкой структуры основного состояния атома цезия-133 на уровне моря в условиях отсутствия внешних магнитных полей (см. рис. 1).

В 1970 г. была сформирована атомная шкала, которую предложили назвать Международным атомным временем (ТАИ), а в следующем году CGPM утвердила это решение.

ТАИ является равномерной шкалой на длительных промежутках времени и не зависит от вращения Земли. Эта шкала используется и в астрономии, и в повседневной жизни. ТАИ установлена и поддерживается ВРМ на основе данных наблюдения множества атомных часов, сведения о ходе которых поступают из разных стран мира. В формировании шкалы ТАИ принимают участие несколько десятков институтов и лабораторий разных стран, располагающих более чем 400-ми атомными стандартами частоты. Показания атомных часов сравниваются между собой с учетом релятивистских поправок и объединяются по специально разработанному алгоритму, позволяющему уменьшить ошибки при включении новых или удалении

из обработки старых часов. Темп хода времени в шкале ТАИ жестко связан с определением базовой единицы времени или временного интервала в системе СИ (секунда СИ).

С тех пор позиция секунды, как основной единицы Международной системы измерений, только укрепляется. В 1983 г. было введено современное определение метра в терминах времени и скорости света: метр – это длина пути, проходимого светом в вакууме за $1/299\,792\,458$ секунды. Таким образом, как и два столетия назад, определение метра было вновь привязано к секунде, но на этот раз с помощью универсальной мировой константы.

В 2011 г. 24-я CGPM в Резолюции 1 “О возможном в будущем пересмотре Международной системы единиц СИ” предложила по-другому сформулировать существующее определение секунды, поскольку оно привязано к точному значению хорошо определенного свойства атома цезия, который также является природным инвариантом: “секунда, обозначение с, есть единица времени; ее величина устанавливается посредством фиксированного численного значения частоты сверхтонкого расщепления основного состояния атома цезия-133, в состоянии покоя и при температуре 0 К, которая равна точно 9 192 631 770 и выражена единицей СИ s^{-1} , равной Гц”.

В 1996 г. для исключения неоднозначной трактовки термина “на уровне моря” Международной

службой вращения Земли (IERS) в качестве номинальной точки размещения атомных часов была установлена поверхность геоида с определённым значением геопотенциала $W_0 = 62636856 \text{ м}^2/\text{с}^2$ (в соответствии с Конвенцией IERS 2003 г.). В 1997 г. СИРМ уточнил, что определение секунды относится к атому цезия, находящемуся в покое при температуре 0 К. Это уточнение сделано, чтобы показать, что секунда в системе SI базируется на атоме цезия, не возмущенном тепловой радиацией (то есть при окружающей температуре 0 К). По этой причине ССТФ в 1999 г. установил необходимость корректировки первичных эталонов частоты в части сдвига за счёт окружающей тепловой радиации.

Длительность секунды ТАИ соответствует длительности секунды эфемеридного времени ET для 1900 г. с точностью порядка 2 нс. В настоящее время нестабильность секунды ТАИ на интервалах времени от одного месяца до одного года равна или чуть меньше $1 \cdot 10^{-14}$. На больших интервалах усреднения нестабильность увеличивается (до $\sim 5 \cdot 10^{-14}$).

Для связи шкалы всемирного времени UT1, основанной на вращении Земли, со шкалой строго равномерного Международного атомного времени ТАИ с 1964 г. ввели равномерно-переменную шкалу времени UTC – Всемирного координированного времени. Она установлена BIPM и IERS и рекомендована для широкого использования во всем мире.

UTC – это время, которое, базируясь на атомной шкале ТАИ, согласовывается с всемирным временем UT1 (связанным с суточным вращением Земли) путём введения определённых поправок и формирует базу координированного распространения стандартных частот и сигналов времени. Вначале сближение шкал UT1 и UTC достигалось ступенчатыми сдвигами частоты (при этом менялась продолжительность секунды). Впоследствии частотные сдвиги были отменены, и в шкалу UTC было введено понятие “корректирующей”, “високосной” или “скачущей” секунды (*leap second*).

Масштабы UTC и ТАИ равны, а нульпункт меняется скачком. Между UTC и UT1 накапливается расхождение, обусловленное, во-первых, неравномерностью шкалы UT1, а во-вторых, неравенством масштабов UT1 и ТАИ (1 атомная секунда не равна в точности 1 секунде UT1). При нарастании расхождения между UTC и UT1 до 0,9 с производится корректировка скачком на 1 с. Дополнительная секунда добавляется 30 июня или 31 декабря при необходимости.

Добавление “високосной” или “скачущей” секунды ввели в 1972 г. Последняя синхронизация “земного” и “стандартного” времени была проведена летом 2012 г.

Развитие времячастотных измерений в Украине

С момента начала организации эталонных времячастотных измерений и до сегодняшних дней

ведущей организацией в этом виде измерений в Украине является Национальный научный центр “Институт метрологии”. Понимание необходимости наличия в стране государственной системы, обеспечивающей единство измерений времени и частоты, на территории Украины проявилось уже в первое десятилетие существования СССР и первая государственная система метрологического обеспечения времячастотных измерений создавалась при активном участии нашего института.

Организация Государственной службы времени относится к периоду 1927–1929 гг., когда на Главную украинскую палату мер и весов (так тогда назывался институт) была возложена задача обеспечения точным временем развивавшейся промышленности и научных организаций Харькова – столицы Украины в те годы. С 1935 г. образцовые частоты передавались радиопередатчиком, изготовленным и установленным в институте, велись передачи сигналов точного времени, формирование которых осуществлялось с помощью часов Рифлера. Поправки на точность хода часов регулярно определялись по астрономическим наблюдениям Харьковской обсерватории, тем самым реализовывалась привязка эталонной секунды к суточному вращению Земли.

В 1939 г., опираясь на результаты проведенных научно-исследовательских работ, институт приступил к разработке эталона времени и частоты. Эта работа, прерванная войной, завершилась в 1950 г. созданием первого в СССР государственного эталона времени и частоты, основу которого составляла группа высокоточных кварцевых генераторов. Эталон находился на уровне национальных эталонов Германии, США и Англии того времени. По точности эталон оказался одним из немногих, на базе которого удалось обнаружить неравномерность вращения Земли.

В 1958 г. впервые в СССР в состав эталона был введен молекулярный генератор на аммиаке. Этим было положено начало переходу в СССР к воспроизведению единиц времени и частоты с помощью квантовых генераторов. Погрешность воспроизведения частоты молекулярным генератором составляла $1 \cdot 10^{-9}$, что являлось в то время большим достижением отечественной метрологии. Материалы исследований молекулярного генератора были представлены ССТФ.

В институте были проведены приоритетные работы по созданию рубидиевых и водородных стандартов частоты и внедрению их в службу времени и частоты, созданию цезиевого репера частоты и молекулярного генератора на изотопе аммиака N_{15}H_3 , проведены исследовательские работы по созданию оптических квантовых генераторов, созданию высокоточных систем сличения частот. После обретения Украиной независимости встал вопрос о создании своей национальной службы времени и частоты и государственного эталона.

Для решения сложных вопросов обеспечения единства измерений времени и частоты, согласно постановлениям Кабинета Министров Украины, создана Государственная служба единого времени и эталонных частот (ГСВЧ). Основной объем работ в ГСВЧ, а также их координация, выполняется Украинским метрологическим центром (УМЦ) ГСВЧ, который создан на базе ННЦ „Институт метрологии”. Действующим Положением об Украинском метрологическом центре Государственной службы единого времени и эталонных частот определяются основные задачи и функции УМЦ.

Технической основой ГСВЧ является государственный первичный эталон единиц времени и частоты, который находится в УМЦ [15]. Согласно ДСТУ 3538:2009, в основу измерений времени и частоты в Украине должны быть положены единицы времени и частоты и шкала времени, воспроизводимые государственным первичным эталоном.

В 2001 г. ССТФ было введено понятие времени UTC (k), где под индексом k подразумевается обозначение той или иной лаборатории или обсерватории. В частности, в Украине используется национальная ступенчато-непрерывная шкала времени UTC (UA), в настоящее время отличающаяся от UTC не более чем на 100 нс. Эта шкала привязана к шкале атомного времени TA(UA), которая была введена в 1996 г. при проведении метрологической аттестации созданного в ННЦ „Институт метрологии” государственного первичного эталона единиц времени и частоты и национальной координированной шкалы времени UTC (UA).

С 2008 г. Украина участвует в формировании ТАИ и UTC.

Воспроизведение и хранение единиц времени и частоты на государственном первичном эталоне осуществляются групповой мерой, в состав которой входят четыре квантовые меры: активный водородный стандарт частоты и времени типа iMaser 3000 (мера 1), водородные стандарты частоты и времени типа Ч1–80 (меры 2 и 3) и цезиевый стандарт частоты и времени типа 5071A с атомно-лучевой трубкой с улучшенными метрологическими характеристиками (мера 4).

Относительные взаимные разницы частот квантовых мер, действительные значения каждой меры для суточных интервалов времени измерений, а также другие метрологические характеристики мер (средние значения соответствующих величин за 10 и 30 суток и среднее квадратичное отклонение суточных оценок частоты от среднего значения за 30 суток), которые определяются по данным внутренних сличений мер между собой, приводятся в ежемесячных информационных бюллетенях серий E1 и E2 на сайте ННЦ „Институт метрологии”. Например, в течение 1–3 кварталов 2012 г. относительная неисключенная систематическая погрешность государственного первичного эталона составила $2 \cdot 10^{-15}$, что является результатом на

уровне ведущих стран мира в области измерения времени и частоты.

Информация о шкалах времени государственного первичного эталона в виде ежесуточных значений разницы шкал времени UTC(UA) и TA(UA) приведена в ежемесячных бюллетенях серии T, которые размещены на странице ННЦ „Институт метрологии” по адресу: <http://www.metrology.kharkov.ua>. Например, в 1–3 кварталах 2012 г. максимальное отклонение национальной шкалы времени UTC(UA) от UTC составило –38 нс при допустимом значении ± 100 нс. Средний ход национальной шкалы времени в 1–3 кварталах составил –0,11 нс/день.

В течение последних 10 лет осуществляется постоянное сравнение национальной шкалы координированного времени Украины UTC(UA) с Международной шкалой координированного времени UTC с использованием сигналов спутниковой радионавигационной системы GPS. Основной системой внешних сличений до августа 2012 г. была автоматизированная система измерений TTS-2 на базе приемника Motorola Oncore. Начиная с августа 2012 г., основной системой внешних сличений является автоматизированная система измерений TTS-4 на базе приемника Javad TRE-G3T. С помощью этих систем осуществляются наблюдения в режиме “common-view” в соответствии с требованиями Технических директив ССТФ ВІРМ.

При обработке данных измерений вычисляются средние значения разницы шкал времени T(Pa6)–T(GPS) в стандартном сеансе длительностью 13 мин (780 измерений), а также среднее значение этой величины за каждые сутки.

При последующей обработке результатов измерений учитываются текущие значения поправки на рабочую шкалу времени эталона UTC(UA)–T(Pa6), а также задержки сигналов в кабелях. Тем самым определяется среднее за каждые сутки значение разницы шкалы координированного времени государственного эталона UTC(UA) и шкалы времени T(GPS) системы GPS. Эти данные являются исходными при последующем сравнении шкал времени эталонов.

Данные измерений системами TTS-2 и TTS-4 в формате GGTTTS ежедневно отправляются на FTP-серверы ВІРМ. Ежемесячно туда же отправляются в заданном формате данные о шкалах времени отдельных атомных часов эталона (водородных и цезиевого стандартов частоты и времени) в виде разницы UTC(UA) – T(CLOCK). В ВІРМ эти данные используются совместно с аналогичными данными других лабораторий для формирования международных шкал атомного ТАИ и координированного UTC времени.

Результаты международных сличений государственного первичного эталона единиц времени и частоты Украины, калибровочные и измерительные возможности (СМС-строки) [16] представлены в официальных изданиях (Circular T,

CSTF-K001.UTC и Appendix C) Базы данных ключевых сличений (KCDB) на сайте ВІРМ <http://www.bipm.org>.

На рис. 2 представлены результаты сравнения шкал времени UTC(UA) и T(GPS) с помощью систем TTS-2 и TTS-4 в течение 1–3 кварталов 2012 г. Каждая точка на графике – это среднее за сутки значение разницы отмеченных шкал времени.

В УМЦ непрерывно в автоматическом режиме осуществляются внутренние сравнения шкал времени всех мер группового хранителя. В результате статистической обработки данных внутренних сличений вычисляются поправки каждой меры относительно групповой шкалы. Кроме того, с помощью автоматизированной системы внешних сличений непрерывно осуществляются сличения шкалы ведущей меры со шкалами времени глобальных навигационных спутниковых систем (GPS, ГЛОНАСС). Результаты обработки данных внеш-

них сличений отправляются в ВІРМ ежедневно. Результаты обработки данных внутренних сличений отправляются в ВІРМ каждые пять суток.

Результаты расчетов поправок к шкале ТАІ, а также значения взвешивающих коэффициентов стандартов, которые принимают участие в формировании шкалы ТАІ, ежемесячно публикуются KCDB. В таблице для входящих в состав государственных первичных эталонов Украины и Российской Федерации стандартов частоты и времени, в качестве примера, приведены значения взвешивающих коэффициентов, полученные на протяжении первых 6-ти месяцев 2012 г.

Анализируя данные таблицы, следует отметить, что государственный первичный эталон единиц времени и частоты России в своем составе имеет только водородные стандарты (первые две цифры 40 в коде стандарта), в то время как государственный первичный эталон единиц времени и частоты Украины в своем составе имеет три водородных



Рис. 2. Результаты сравнения шкал времени UTC(UA) и T(GPS)

Значения взвешивающих коэффициентов атомных стандартов частоты и времени Украины и России

Страна	Код стандарта	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь
Украина	40 7881	0,016	0,015	0,014	0,014	0,014	0,014
Украина	40 7882	0,212	0,213	0,237	0,259	0,284	0,257
Украина	40 7854	0,007	0,010	0,019	0,051	0,090	0,091
Украина	35 2465	0,102	0,072	0,057	0,045	0,041	0,048
Россия	40 3811	0,008	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007
Россия	40 3815	0,021	0,021	0,021	0,022	0,022	0,023
Россия	40 3816	0,028	0,027	0,028	0,029	0,032	0,033
Россия	40 3810	0,000	0,000	0,001	0,002	0,002	0,003
Россия	40 3814	0,000	0,000	0,075	0,029	0,022	0,020
Россия	40 3812	*****	*****	*****	0,000	0,000	0,000

стандарта и один цезиевый (первые две цифры 35 в коде стандарта). Это значит, что в Украине секунда воспроизводится в соответствии с определением для Международной системы SI.

Кроме того, ведущая мера (код 40 7882) государственного первичного эталона единиц времени и частоты Украины имела в первой половине 2012 г. значительно большее среднее значение взвешивающего коэффициента (0,244), чем сумма всех шести взвешивающих коэффициентов эталонов времени и частоты Российской Федерации (0,084). Кроме этого, взвешивающий коэффициент цезиевого стандарта государственного эталона Украины (код 35 2465) на указанном интервале времени был больше, чем у наилучшего водородного стандарта России (код 40 3816).

Это позволяет утверждать, что в настоящее время вклад государственного первичного эталона единиц времени и частоты Украины в формирование международных шкал времени TAI и UTC более весомый, чем вклад эталона России.

Заключение

Секунда в настоящее время является наиболее точно определяемой единицей измерения. За тысячелетия, прошедшие от изобретения первых часов, их точность увеличилась на целых 14 порядков. Однако существующие проблемы в сравнении Международного атомного времени и Всемирного времени не позволяют останавливаться на достигнутом на сегодняшний день уровне точности. В целом, вопрос о переопределении секунды остаётся открытым, обсуждаемым и ещё, на первый взгляд, довольно далёким от своего окончательного решения.

Следует заметить, что одним из определяющих факторов, влияющих на необходимость переопределения секунды, является достаточно быстрое повышение точности оптических стандартов частоты, над созданием которых работают ведущие метрологические институты, имеющие в своем составе лаборатории времени и частоты. Вопросы развития метрологических аспектов дальнейшей эволюции переопределения секунды и ее практической реализации в Украине являются предметом дальнейших исследований в обозначенном направлении.

Список литературы

1. Хокинг С. Краткая история времени: от Большого взрыва до чёрных дыр: пер. с англ. / С. Хокинг; пер. с англ. Н.Я. Смородинской. – СПб.: Амфора, 2001. – 268 с.
2. Измерения времени и частоты. Термины и определения: ГОСТ 8.567-99: – [Дата введения 2001-01-01]. – М.: Изд-во стандартов, 2000. – 15 с. – (Государственный стандарт Российской Федерации).
3. NIST cesium fountains current status and future prospects / S.R. Jefferts, T.P. Heavner, T.E. Parker, J.H. Shirley // *Acta Physica Polonica*. – 2007. – Vol. 112, No 5. – P. 759–767.
4. Testing local position invariance with four cesium – fountain primary frequency standards and four NIST hydrogen masers / N. Ashby, T.P. Heavner, S.R. Jefferts [et al.] // *Physical Review Letters*. – 2007. – Vol. 070802 (4). – P. 98–105.
5. Холл Дж. Л. Определение и измерение оптических частот: перспективы оптических часов – и не только / Дж. Л. Холл. // УФН. – 2006. – Т. 176, № 12. – P. 1353–1367.
6. An optical clock based on a single trapped 199Hg^+ ion / S.A. Diddams, T. Udem, J.C. Bergquist [et al.] // *Science*. – 2001. – № 293. – P. 825–828.
7. Ye J. Accuracy comparison of absolute optical frequency measurement between harmonic-generation synthesis and a frequency division femtosecond comb / J. Ye, H.Y. Tai, L.H. John // *Physical Review Letters*. – 2000. – Т. 85. – P. 3797–3800.
8. Optical frequency synthesis and comparison with uncertainty at the 10^{-19} level / L. Ma, Z. Bi, A. Bartels [et al.] // *Science*. – 2004. – Т. 303. – P. 1843–1845.
9. Электронный ресурс: <http://goandtrack.com/scientists-invent-atomic-clock-that-is-so-accurate-it-can-detect-changes-in.html>.
10. A single-ion nuclear clock for metrology at the 19th decimal place / C.J. Campbell, A.G. Radnaev, A. Kuzmich [et al.] // *Atomic Physics*. – 2011. – № 11. – P. 5–9.
11. Recommendation CCTF1 2001, Secondary representations of the second // The 15th Meeting of the Consultative committee for time and frequency. – Braunschweig, Germany: PTB. – P. 132.
12. Gill P. On secondary representations of the second / P. Gill, F. Riehle // *Proc. 2006 European time and frequency forum EFTF*. – P. 282–288.
13. Gill P. When should we change the definition of the second? / P. Gill // *Phil. Trans. R. Soc.* – 2011. – № 369. – P. 4109–4130.
14. Сена Л.А. Единицы физических величин и их размерности / Л.А. Сена. – 3-е изд. – М.: Наука, 1988. – 336 с.
15. Романько В.М. Про стан та забезпечення функціонування державного первинного еталона одиниць часу і частоти / В.М. Романько // *Український метрологічний журнал*. – 2011. – № 3. – С. 13–21.
16. Неежмаков П.И. Неопределенность калибровки разности шкал времени при обеспечении прослеживаемости к всемирному координированному времени / П.И. Неежмаков, В.Н. Романько // *Системи обробки інформації: зб. наук. пр.; Невизначеність вимірювань: наукові, нормативні, прикладні та методичні аспекти*. – Харків: ХВУ, 2012. – Вип. 1 (99). – С. 37–44.