

УДК 681.2.089

М.Я. Мухаровський, О.А.-Б. Ахмадов, С.О. Ахмадов,
С.О. Бистрий, І.М. Бистра, В.С. Писчиков

АСПЕКТИ РОЗРОБКИ ТА МОДЕРНІЗАЦІЇ ВТОРИННОГО ЕТАЛОНУ ОДИНИЦЬ ЧАСУ І ЧАСТОТИ В ДП «УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ»

м. Київ, ДП «Укрметртестстандарт»

Розглянуто етапи розвитку вимірювання часу та класифікацію часу. Розвиток Вторинного еталона одиниць часу та частоти в ДП «Укрметртестстандарт», вдосконалення його апаратурного складу за рахунок новітніх технологій.

Ключові слова: секунда, еталон одиниць часу та частоти, водневі стандарти часу та частоти, метрологічні характеристики вторинного еталона одиниць часу та частоти.

Вступ

Звичайні годинники, які використовуються в повсякденному житті в мільйони разів більш неточні ніж еталон часу, це пов'язано з тим, що в повсякденному житті не потрібна точність до доль мікросекунди. Так наприклад точність ходу звичайного наручного годинника не перевищує $1 \cdot 10^{-6}$, а найкращі швейцарські хронометри ручної збірки $1 \cdot 10^{-7}$. Коли мова йде про освоєння космосу, про системи навігації, системи управління повітряним транспортом, про системи якості радіо- і телепередач та для інших цілей де точність відіграє важливу роль, необхідність передачі і відтворення точних сигналів часу часом є життєво необхідною умовою.

Необхідно відмітити, що одна секунда – це інтервал часу, який дорівнює 9 192 631 770 періодам випромінювання, що відповідає переходу між двома надтонкими рівнями основного стану атома цезія 133 при відсутності завад від зовнішніх полів. На сьогодні довжина секунди відома до 15-го знаку, але це не межа і дослідження продовжуються.

Еталони часу і частоти в Україні та країнах СНД

В Україні Державний первинний еталон одиниць часу і частоти (ДПЕЧЧ) знаходиться в ННЦ «Інститут метрології», м. Харків. Діапазон вимірювання частоти: від 1 до $7 \cdot 10^{10}$ Гц. Діапазон вимірювання інтервалів часу: від $1 \cdot 10^{-10}$ с до $1 \cdot 10^8$ с. Середньоквадратичне відносне відхилення результатів вимірювання $5 \cdot 10^{-14}$. Невилучена систематична похибка $1 \cdot 10^{-13}$.

В Києві в ДП «Укрметртестстандарт» знаходиться Вторинний еталон одиниць часу і частоти (ВЕЧЧ). Він є основною сполучною ланкою між ДПЕЧЧ і робочими еталонами, зразковими засобами вимірювань часу і частоти, тобто ВЕЧЧ забезпечує передавання розмірів одиниць часу ДПЕЧЧ до робочих еталонів і зразкових засобів вимірювань часу і частоти на території України, а також для забезпечення контролю і визначення метрологічних характеристик еталонних сигналів часу і частоти, що передаються по каналах зовнішніх зв'язів. ВЕЧЧ входить до державної повірочної схеми для засобів вимірювань часу та частоти згідно з ДСТУ 3538-97 «Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювань часу та частоти».

ВЕЧЧ побудований на базі водневих стандартів, які є базою групового зберігача частоти, ці стандарти працюють безперервно і також виконують функції зберігачів шкали часу. Діапазон вимірювання частоти: від 1 до $1 \cdot 10^8$ Гц. Діапазон вимірювання інтервалів часу: від $1 \cdot 10^{-9}$ с до $1 \cdot 10^8$ с. Сумарна відносна похибка ВЕЧЧ, тобто середнє квадратичне відносне відхилення результатів вимірювання при зв'язі з ДПЕЧЧ не перевищує $4 \cdot 10^{-13}$. Допустиме розходження шкали часу ВЕЧЧ і шкали часу ДПЕЧЧ не більше ± 3 мкс.

Російській еталон часу входить до групи найкращих світових еталонів, його відносна похибка не перевищує $5 \cdot 10^{-14}$ с, що означає похибка в 1 секунду буде через півмільйона років.

Національний еталон часу Республіки Білорусь зберігається в лабораторії Мінського центру стандартизації і метрології. Його похибка складає $1 \cdot 10^{-13}$. Тобто за 300 років похибка підрахунку складе не більш ніж одна секунда.

У таблиці 1 наведено середньоквадратичне відносне відхилення результатів вимірювань еталонів часу і частоти.

Таблиця 1
Характеристики еталонів часу і частоти в країнах СНД

Країна	Похибка
Україна (ДПЕЧЧ)	$5 \cdot 10^{-14}$
Україна (ВЕЧЧ)	$4 \cdot 10^{-13}$
Росія	$5 \cdot 10^{-14}$
Білорусія	$1 \cdot 10^{-13}$

Вимірювання часу від минулого до сучасного. Вимірювання часу - це зіставлення подій за допомогою якогось періодичного процесу, прийнявши за основу те, що кожен період його займає однаковий час. Безумовно, на шкалі часу, обраної за якоюсь одною періодичною подією, яке інше може відбуватися нерівномірно, і один його період буде займати більше часу, ніж інший.

Астрономічний час. Вдосконаленням вимірювання часу по сонцю було використання видимого сонячного часу, коли полудень - час найвищого положення сонця над горизонтом - прийнято за 12 годин, а інтервал між полудня - видимий сонячний день - поділений на 24 години. Однак і цей захід недостатньо досконала: через нерівномірність руху Землі по орбіті (пов'язаної з відхиленням її форми від кола) і з-за нахилу земної осі, що призводить до вертикальних переміщень сонця протягом року, довжина видимого сонячного дня протягом року коливається на 30 сек. Коротше всього в грудні, довше - у вересні. Остаточно за міру часу було прийнято середній сонячний час, обраний так, щоб «нерухомі» зірки виявлялися в однаковому становищі кожен добу в один і той же час. Середній сонячний час відображає тільки обертання Землі, і всупереч своїй назві вже не пов'язане з сонцем. Розбіжність його з видимим сонячним часом може складати до 16 хвилин, тому що довші або коротші ніж 24 години видимі сонячні дні йдуть один за одним місяцями, і помилка накопичується.

Атомний час. За «астрономічний» стандарт часу прийнято середній гринвічський час - GMT, Greenwich Mean Time, - середній сонячний час, спостереження за яким здійснюється в Королівській Гринвічській обсерваторії на нульовому меридіані. Але і цей час недостатньо точний: через припливів і відливів Земля уповільнює своє обертання на 1,7 мс/століття, «нерухомість» зірок спірна, а точність астрономічних спостережень недостатня для тих застосувань, де важливі мілі-та мікросекунди. Протягом історії застосовувалося багато «неастрономічних» способів вимірювання часу: за згорянням свічки, закінчення води з посудини, коливання маятника і т.п. У 1955 р. в англійській національній фізичній лабораторії (NPL, National Physical Laboratory) для точного виміру часу вперше був застосований атомний годинник, заснований на власних коливаннях атома, пов'язаних з його внутрішньою структурою.

З 1967 р. він прийнятий міжнародним бюро мір і ваг (BIPM, Bureau International des Poids et Mesures,) за еталон часу: секундою називається інтервал між 9 192 631 770 міжрівневими переходами атома цезію-133 (число переходів вибрано для відповідності із середнім сонячним часом). Еталонний годинник, що зберігаються в BIPM, постійно звіряється з близько двомастами атомними годинами в національних лабораторіях на всіх континентах, що гарантує збереження еталонного точного часу навіть у випадку яких-небудь глобальних катастроф. Це еталонне час називають міжнародним атомним часом - TAI, Temps Atomique International. Саме з цим часом скоординовані супутники, наприклад супутники глобальної системи позиціонування (GPS, Global Positioning System), що передають сигнали точного часу у всі точки планети.

Зкоординований час. З 1884 р. за міжнародний стандарт часу було прийнято GMT з поправкою на ціле число годин, що відповідає «часовому поясу», або меридіану найближчого до спостерігача адміністративного центру. Цей стандарт був названий UT (Universal Time), або UT₀, оскільки пізніше були прийняті «уточнюючі» його стандарти UT₁ та UT₂, що все ще спиралась на астрономічні спостереження. З 1 січня 1958 р. за еталон міжнародного часу також було прийнято атомний час; міжнародний час в нульовому часовому поясі збігалося з TAI. До 1972 р. було відмічено, що GMT і TAI розходяться на 10 секунд через неточну пропорційність добового та річного періоду обертання Землі, а також нерівномірність її добового обертання. У результаті для узгодження міжнародного часу з сонячним були введені «високосні секунди» (leap seconds), що додаються або віднімаються з UTC за рішенням міжнародної служби обертання землі (IERS, International Earth Rotation Service) для підтримки різниці між UT та GMT менше 0,9 сек. Новий стандарт був названий UT_C (Coordinated Universal Time, Temps Universel Coordonné) для позначення його зкоординованості з сонячним часом.

Високосні секунди. За рішенням IERS «високосні секунди» можуть додаватися (або відніматися) в ніч на 1 липня або 1 січня; 1 липня 1972 було додано відразу 10 секунд, з тих пір зрідка додавалося по секунді (віднімання не робилося жодного разу). На жовтень 2004 р. було додано 32 «високосні секунди», тобто TAI-UTC = 32 сек. Остання «високосна секунда» додавалася 1 січня 1999 У таких випадках після 23:59:59 31 грудня слідує додаткова секунда - 23:59:60, і тільки потім - 0:00:00 1 січня. Якщо буде потрібно відняти «високосний секунду», то після 23:59:58 відразу відбудеться перехід на 0:00:00 наступного дня.

Час в комп'ютері. Оскільки час в комп'ютерах зазвичай зберігається у вигляді числа секунд з деякою опорної дати - 1 січня 1970 р., 1 січня 1900, 1 січня 1600 р., або який-небудь ще - то одним з недоліків стандарту UTC є нетривіальність (для дат у минулому) і неможливість (для дат в майбутньому) точного перекладу зберігаемого часу в звичну для людини форму через те, що в кожному році своя (і невідома заздалегідь) кількість секунд. Зокрема, неможливо точно перевести в "комп'ютерний час" дату в майбутньому, наприклад опівночі 1 січня 4000, оскільки невідомо навіть приблизно, скільки "високосних секунд" буде внесено в UTC до того часу. У реальності комп'ютери зазвичай не роблять поправку на "високосні секунди" між датами, так що якщо запланувати якусь подію на вищевказане час і тримати системний годинник постійно синхронізованими з еталонними, то воно цілком може статися не опівночі, а опівдні.

Передача часу

Щодня еталони різних країн синхронізують свої показання через супутниковий зв'язок, отриманні дані порівнюють з даними лондонського, паризького та інших еталонів. Це спрощений варіант роботи всесвітньої системи точного часу.

В деяких країнах СНД цілодобово на частоті 66,9 МГц транслюється інформація про точний час. Зашифрована інформація про рік, місяць, часто і час кожен день транслюється по телебаченню, покази закладені в 11 рядку телевізійного растра і стають доступні завдяки спеціальній апаратурі. Також сигнали точного часу транслюються по національному радіо, в останньому з шести сигналів зашифрована інформація про час, тому ввечері останній сигнал довший ніж в ранці, ці сигнали призначені для звичайних споживачів, яким не потрібна максимальна точність. Тобто, коли по радіо повідомляють, що "початок шостого сигналу відповідає такому то часу", це означає, що шостий сигнал звучить вчасно. Завдяки цим сигналам виставляється час в міських мережах годинників а також в годинниках на підприємствах. Даний вид розповсюдження інформації про точний час до цього часу використовується і в Україні.

Вторинний еталон одиниць часу і частоти та його метрологічні характеристики

З 1973 року в НДВ-11 ДП «Укрметртестстандарт» зберігається та експлуатується ВЕЧЧ.

Його основу складають шість водневих стандартів (ВС) частоти, крім ВС ВЕЧЧ входять: система підсилення і розмноження еталонних сигналів часу і частоти, система внутрішніх і зовнішніх звірень частот і шкал часу ВЕЧЧ.

В 1976 році був затверджений як робочий еталон одиниць часу і частоти з параметрами $S = \pm 3 \cdot 10^{-12}$ та $\Delta = \pm 10$ мкс. На той час основа ВЕЧЧ - апаратура зберігання розмірів одиниць часу і частоти мала у своєму складі еталонні кварцові генератори ЕКГ, а зовнішні звірення здійснювались по радіоканалах.

Починаючи з 1989 р. на ВЕЧЧ розпочався період використання квантових стандартів частоти, а саме з того часу на ВЕЧЧ почали функціонувати ВС часу та частоти типу Ч1-70 (чотири одиниці), виготовлені в НВО "Кварц" (Н.Новгород). Це дозволило значно поліпшити метрологічні характеристики ВЕЧЧ. В 1990 р. ВЕЧЧ був атестований і затверджений, як вторинний еталон одиниць часу і частоти з параметрами $S_{\Sigma 0} = \pm 4 \cdot 10^{-13}$ і $\Delta = \pm 5$ мкс.

В 1992 р. в рамках робіт з модернізації на ВЕЧЧ були придбані два нових водневих стандарти часу та частоти типу Ч1-80, які дозволили поліпшити його метрологічні характеристики.

Високий рівень науково-технічних можливостей ВЕЧЧ забезпечив включення ВЕЧЧ до складу Державної служби єдиного часу та еталонних частот, і в 1997 році ДП «Укрметртестстандарт» був атестований та затверджений Держстандартом України, як Північний метрологічний центр Державної служби єдиного часу та еталонних частот.

В 2008-2009 рр. було введено в експлуатацію два ВС нового покоління, типу VCH-1005, що дало змогу продовжити термін експлуатації ВЕЧЧ.

Технічною основою ВЕЧЧ являється груповий зберігач часу і частоти. Середня частота групового зберігача часу і частоти з урахуванням поправок по частоті кожного водневого зберігача приймається за частоту ВЕЧЧ. Використання принципу групового зберігача дозволяє підвищити надійність зберігання і зменшити похибку відтворення одиниць часу і частоти за рахунок статистичної обробки результатів спостереження окремих зберігачів ВЕЧЧ.

Нижче, на рисунках 1 та 2 наведено порівняльні значення частот водневих стандартів частоти ВС5 (а), ВС4(б), ВС6(в) та групового зберігача часу і частоти (г) за добу (Рис.1) та за 10 днів (Рис. 2), відносно GPS за період часу з 1975 по 2004

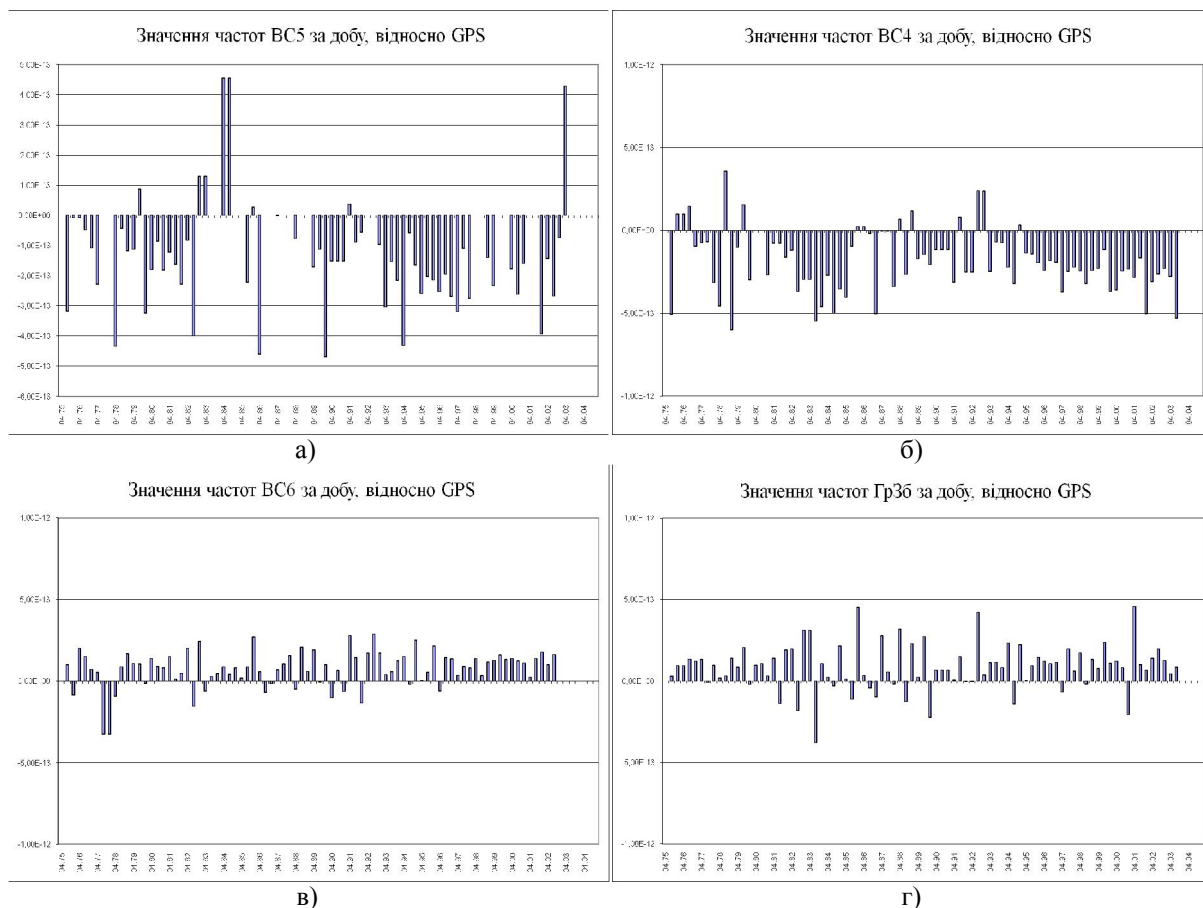


Рис. 1 Порівняльні значення частот водневих стандартів частоти ВС5 (а), ВС4(б), ВС6(в) та груповий зберігач часу і частоти (г) за добу, відносно GPS на протязі 1975-2004 р.

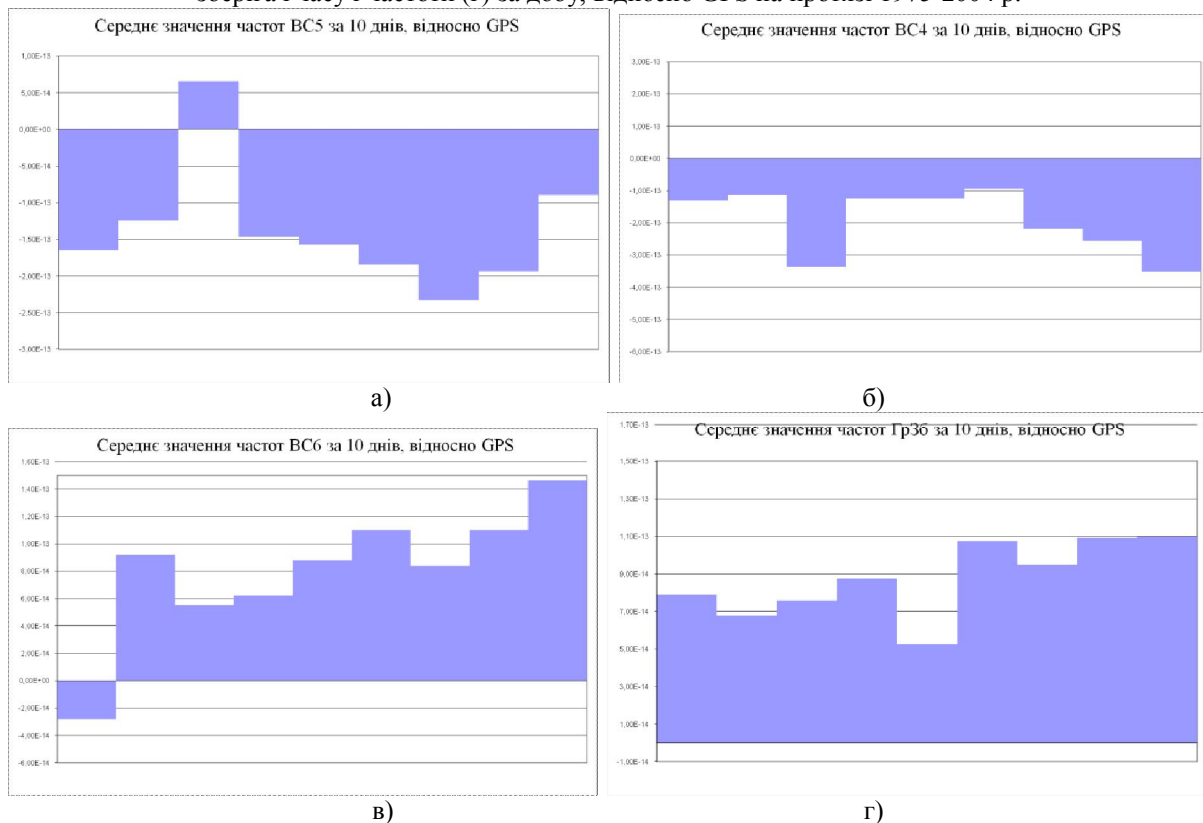


Рис. 3 Порівняльні значення частот водневих стандартів частоти ВС5 (а), ВС4(б), ВС6(в) та груповий зберігач часу і частоти (г) за 10 днів, відносно GPS

Експериментальні дослідження, показали, що розраховане значення групового зберігача часу і частоти за добу та 10 днів, відносно GPS (Рис. 1, в та 2, в), відповідає паспортним значенням сумарної відносної похибки ВЕЧЧ ДП «Укрметртестстандарт» – $4 \cdot 10^{-13}$.

На Рис. 3 наведено графік взаємного розходження шкал часу, побудований за результатами внутрішніх і зовнішніх звірень ВЕЧЧ, з 1989 року по 2010 рік.

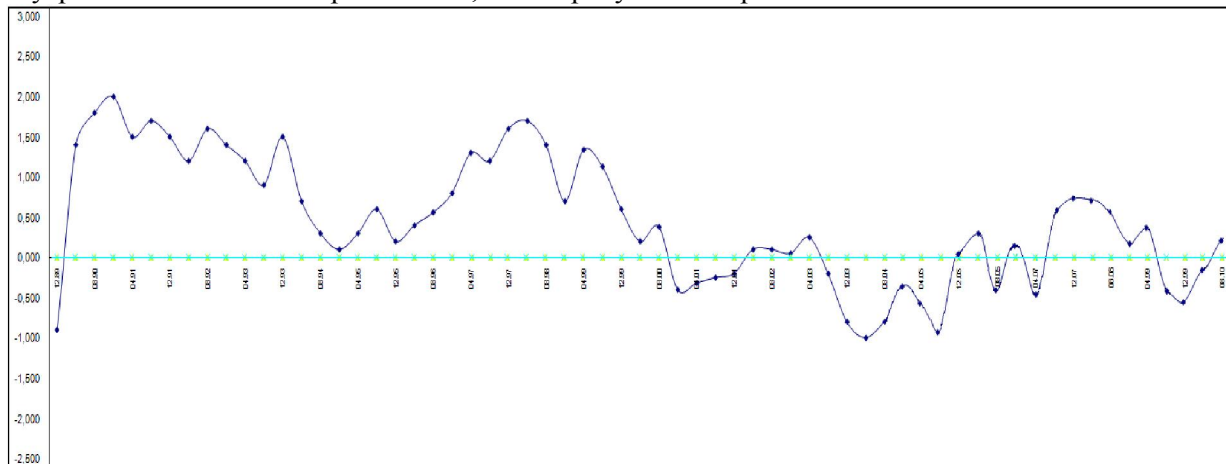


Рис. 3. Графік взаємного розходження шкал часу ВЕЧЧ та шкали часу отриманої за допомогою GPS, мкс, з 1989 по 2010р.

Як видно з Рис.3, на даний час величина розходження шкал не виходить за межі ± 3 мкс, що відповідає паспортним даним допустимого розходження шкали часу ВЕЧЧ і шкали часу, що зберігається ДПЕЧЧ.

До метрологічних характеристик ВЕЧЧ також відносяться: діапазон вимірювання частоти від 1 до $1 \cdot 10^8$ Гц; діапазон вимірювання інтервалів часу від $1 \cdot 10^{-9}$ с до $1 \cdot 10^8$ с.

Висновки

Необхідно відмітити, що ВЕЧЧ в ДП «Укрметртестстандарт» постійно модернізують, завдяки чому поліпшуються його метрологічні характеристики. ВЕЧЧ відіграє важливу роль у забезпеченні єдності вимірювань часу та частоти в Україні. Можна стверджувати, що в Україні в системі Держспоживстандарту до цього часу є тільки два еталона одиниць часу та частоти - Державний первинний еталон одиниць часу та частоти, м. Хаків та Вторинний еталон одиниць часу і частоти, м. Київ.

Список літературних джерел

1. Бич А.М. Основы теории времени: Закономерная эволюция реляционной концепции времени // К.: Знання України, 2005.- 116 с.
2. Бакулин П. И., Блинов Н.С. Служба точного времени. 2 изд. – М.: Наука, 1977. – 352 с.
3. Величко О., Макаренко Б., Камінський В. та ін. Державна служба єдиного часу і еталонних частот – необхідний елемент розвитку наземної космічної інфраструктури України. / О.М. Величко, Б.И. Макаренко, В.Ю. Камінський та ін. // Космічна наука і технологія. – 1997. – Т. 3, № 1/2. – С. 7-15.
4. Клейман О.С., Оголюк В.П., Сидоренко Г.С., Соловійов В.С., Ткачук О.О. Державний первинний еталон одиниць часу і частоти. // Український метрологічний журнал. – 1997. – Вип.3.
5. Сидоренко Г., Соловійов В., Ткачук О. та ін. Використання сигналів супутникових радіонавігаційних систем для порівняння шкал часу. Космічна наука і технологія. – 2001. Т.7. - №4.
6. Ахмадов О. А.-Б., Писчиков В.С. Вторинний еталон часу та частоти УкрЦСМ. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції. Метрологія та вимірювальна техніка 1998. Сборник статей.
7. ДСТУ 3538-97 «Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювань часу та частоти».
8. ГОСТ 8.129-99 «Государственная поверочная схема для средств измерений времени и частоты».
9. Мухаровський М.Я., Ахмадов О.А.-Б., Ахмадов С.О., Бистрий С.О., Писчиков В.С. Вторинний еталон одиниць часу і частоти ДП «Укрметртестстандарт» до 2008 року. // Вісник інженерної академії України. -2010. – Випуск 3-4. С. 246-252.