

УДК 006.92

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

ВТОРИННИЙ ЕТАЛОН ОДИНИЦЬ ЧАСУ ТА ЧАСТОТИ ДП «УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ» ДО 2008 РОКУ

м. Київ, ДП «Укрметртестстандарт»

У статті розкрито періоди розвитку вторинного еталона одиниць часу та частоти ДП «Укрметртестстандарт», поступового вдосконалення його апаратурного складу. Наведено результати досліджень його метрологічних характеристик.

Ключові слова: розмір одиниць часу та частоти, водневі стандарти часу та частоти, внутрішні звірення на еталоні часу та частоти, зовнішні звірення між шкалами часу еталонів часу та частоти, метрологічні характеристики вторинного еталона одиниць часу та частоти.

Вступ

Вимірювання часу та частоти є найбільш точними серед усіх видів вимірювань. Використовуються практично в усіх галузях науки та промисловості. В НДВ-11 ДП «Укрметртестстандарт» з 1973 року зберігається та застосовується вторинний еталон одиниць часу та частоти (ВЕЧЧ). ВЕЧЧ функціонує з метою забезпечення передавання розмірів одиниць часу і частоти від Державного первинного еталона одиниць часу і частоти України (ДПЕЧЧ, ННЦ «Інститут метрології», м. Харків) 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 звірень.

Наразі ВЕЧЧ є одним з небагатьох еталонів часу і частоти в Україні, являється часткою державної повірочної схеми для засобів вимірювань часу та частоти за ДСТУ 3538-97.

Періоди розвитку ВЕЧЧ

Початок створення та функціонування ВЕЧЧ було тісно пов'язано з співробітництвом зі спеціалістами первинного еталона часу та частоти СРСР (м. Москва). ВЕЧЧ ДП «Укрметртестстандарт» (до 2004 р. – УкрЦСМ) став одним з вторинних еталонів часу та частоти СРСР. В 1976 році він 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 кварцеві генератори ЕКГ, а зовнішні звірення здійснювались по радіоканалах.

На протязі 1987 р. в НДВ-11 ДП «Укрметртестстандарт» були проведені роботи по підготовці приміщень, монтажу системи енергозабезпечення, монтажу апаратури комплексу Ч0-101 (в склад якого входять водневі стандарти часу і частоти ВС) і підготовці його до експлуатації. Дослідна експлуатація комплексу Ч0-101, яка була проведена у 1988 році, за допомогою спеціалістів первинного еталона часу та частоти СРСР (м. Москва) дозволила виконати налагоджування режимів роботи апаратури, перевірку надійності системи резервного електроживлення, відпрацювання раціонального графіка проведення звірень водневих зберігачів, розробку і випробування початкового варіанту методики ведення шкал часу ВЕЧЧ ДП «Укрметртестстандарт».

Таким чином, починаючи з 1989 р. на ВЕЧЧ ДП «Укрметртестстандарт» почався якісно новий період, період використання квантових стандартів частоти, а саме з того часу на ВЕЧЧ почали функціонувати водневі стандарти часу та частоти типа Ч1-70 (чотири одиниці), виготовлені НВО "Кварц" (Н.Новгород) в 1986 р. Це дозволило значно поліпшити метрологічні характеристики ВЕЧЧ. В 1990 р. ВЕЧЧ був атестований і затверджений, як вторинний еталон одиниць часу і частоти з параметрами $S_{\Sigma 0} = \pm 4 \cdot 10^{-13}$ и $\Delta = \pm 5$ мкс.

В наступні роки продовжувалося розширення науково-дослідницької сторони і удосконалення технічного складу ВЕЧЧ. У систему резервного живлення еталону, крім спеціальних акумуляторних батарей, був введений в експлуатацію дизель-генератор, який за

необхідністю міг забезпечити тривале автономне живлення ВЕЧЧ, у випадку переривів в забезпеченні електроживлення від мережі. В 1992 р. в рамках робіт з модернізації на ВЕЧЧ ДП «Укрметртестстандарт» були придбані два нових водневих стандарти часу та частоти типу Ч1-80, які дозволили значно підвищити надійність функціонування ВЕЧЧ у цілому та поліпшити його метрологічні характеристики. У цей рік введена також у експлуатацію приймальна апаратура супутникової радіонавігаційної системи ГЛОНАСС, яка дозволяла з високою точністю виконувати зовнішні зв'язки між еталонами часу і частоти.

Пізніше на ВЕЧЧ ДП «Укрметртестстандарт» був введений в експлуатацію ще один незалежний канал зовнішніх зв'язок еталонних шкал часу - радіометеорний канал (РМК), апаратура якого, "Метка-6М", була розроблена і виготовлена в Україні, в місті Харкові, колективом спеціалістів під керівництвом д.т.н., професора Б.Л. Кашеєва. Апаратура РМК, використовувалась на еталонах часу і частоти у м. Москва та у м. Харкові. За допомогою цього каналу зовнішніх зв'язок регулярно проводилося зв'язки шкали часу ВЕЧЧ зі шкалою часу ДПЕЧЧ. У ці роки також було придбано новий приймач-компаратор типу Ч7-39, за допомогою якого проводилося зв'язки частотних характеристик по радіоканалах, зокрема російської радіостанції РБУ.

На ВЕЧЧ продовжувалися дослідницькі роботи. З першого кварталу 1992 року була відкрита тема 33.11.04.04 «Обеспечение хранения единиц времени и частоты Вторичного эталона УкрЦСМ и ведение шкалы координированного времени». Роботи за темою 33.11.04.04 успішно продовжувались як ПМР (постійна метрологічна робота) до 2000 року. Високий рівень науково-технічних можливостей ВЕЧЧ дозволив те, що ВЕЧЧ був у складі Державної служби єдиного часу та еталонних частот, а саме в 1997 року НДВ-11 УкрЦСМ (ВЕЧЧ) був атестовано та затверджено Держстандартом України, як Північний метрологічний центр Державної служби єдиного часу та еталонних частот.

У кінці 1999 року роботи по темі 33.11.04.04 були повністю виконані, а ВЕЧЧ того часу був признано національним надбанням України. Тому замість теми 33.11.04.04 з першого кварталу 2000 року була поставлена нова тема 54.00.11.02 «Хранение и обеспечение функционирования Вторичного эталона единиц времени и частоты УкрЦСМ, что составляет национальное достояние Украины». Параметри ВЕЧЧ на протязі усіх цих років з запасом задовольняли вимогам ДСТУ 3538-97 «Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювань часу та частоти». В грудні 2003 року ВЕЧЧ успішно пройшов чергову державну метрологічну атестацію.

Внутрішні зв'язки водневих стандартів ВЕЧЧ

Технічною основою ВЕЧЧ є груповий зберігач часу і частоти. До 2008 р. груповий зберігач створювався на базі водневих стандартів частоти Ч1-70 (ВС1, ВС3, ВС4) і Ч1-80 (ВС6). Ці стандарти частоти працюють безперервно і виконують також функції зберігачів шкал часу.

За частоту ВЕЧЧ приймається середня частота групового зберігача з урахуванням поправок по частоті кожного водневого зберігача. 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.

Внутрішні зв'язки ВС до 2008 р. проводилися за фазою сигналів частотою 5 МГц, які поступають від ВС через комутатори 101А/1 на частотомір ЧЗ-64.

Метод зв'язок за фазою полягав у виділенні різниці двох гармонічних коливань, що генеруються ВС. Схемне рішення, яке реалізовувало даний метод, дозволяло підвищити роздільну здатність методу в сто разів. На виході фазового компаратора різниця частот водневих стандартів, що зв'язалися, перетворювалися в інтервал часу величиною $0,1c \pm \delta$, де δ могло бути в границях $0 \div 2000$ нс. Цей інтервал часу, якій характеризує різницю між фазами сигналів водневих стандартів частотою 5 МГц, реєструвався синхронетром. Вимірювання проводилися кожні дві години цілодобово. Результати внутрішніх зв'язок заносилися оператором до журналу внутрішніх зв'язок водневих стандартів по фазі для їх подальшої обробки.

Використовуючи дані журналу внутрішніх зв'язок ВС по фазі перевіряли їх на відсутність різких скачків в показаннях, якщо такі відсутні, то знаходили відносні взаємні різниці частот ВС за формулою:

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta t}{3600 \cdot 100 \cdot N}$$

де N - інтервал часу у годинах, за який визначалася величина відносні різниці частот ВС;

$$\Delta t = t_1 - t_2$$

де t_1 – показання частотоміра на час 02^h00^m 18.12.05;

t_2 – показання частотоміра на час 02^h00^m 19.12.05 .

Таблиця 1

Журнал внутрішніх звірень ВС по фазі

Дата	MJD	Київський час	BC3-BC6, мкс	Δt за 2 год, мкс	BC3-BC6 мкс	Δt за 2 год, мкс
1	2	3	4	5	6	7
01.12.05		00 ^h 00 ^m	2,21999		1,60729	
		02 ^h 00 ^m	2,22194	0,00195	1,60950	0,00221
	
02.12.05		00 ^h 00 ^m	2,23165		1,61355	
		02 ^h 00 ^m	2,23292	0,00127	1,61370	0,00015

Якщо у показаннях за добу були скачки, увесь інтервал розбивали на ділянки де показання рівномірні і розраховували Δt_i для кожного з одержаних ділянок, за інтервал часу N_i

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta t_1 + \Delta t_2 + \dots + \Delta t_i}{3600 \cdot 100 \cdot (N_1 + N_2 + \dots + N_i)}$$

Визначивши відносні взаємні різниці частот для кожної групи зберігачів часу і частоти

$$\left(\frac{\Delta f}{f}\right)_{BC3-BC6} \text{ та } \left(\frac{\Delta f}{f}\right)_{BC4-BC6}, \text{ їх значення заносили у таблицю результатів.}$$

За результатами відносних взаємних різниць частот для кожної групи зберігачів часу і частоти

$$\left(\frac{\Delta f}{f}\right)_{BC3-BC6} \text{ та } \left(\frac{\Delta f}{f}\right)_{BC4-BC6} \text{ обчислювалася відносна частота групового зберігача}$$

часу і частоти в системі UTC(UC) за формулою:

$$\left(\frac{\Delta f}{f}\right)_{ГрЗб} = \frac{\left(\frac{\Delta f}{f}\right)_{BC3-BC6} + \left(\frac{\Delta f}{f}\right)_{BC4-BC6}}{n}$$

де n – кількість водневих генераторів з яких складається груповий зберігач.

Далі знаходили відносні різниці частот для кожного ВС в системі UTC(UC) за формулами:

$$\left(\frac{\Delta f}{f}\right)_{ГрЗб-BC3} = \left(\frac{\Delta f}{f}\right)_{ГрЗб-BC6} - \left(\frac{\Delta f}{f}\right)_{BC4-BC6}; \left(\frac{\Delta f}{f}\right)_{ГрЗб-BC4} = \left(\frac{\Delta f}{f}\right)_{ГрЗб-BC6} - \left(\frac{\Delta f}{f}\right)_{BC4-BC6}$$

Всі ці обчислення проводилися для кожного дня і заносилися у таблицю результатів.

Розраховували значення частоти групового зберігача часу і частоти $\left(\frac{\Delta f}{f}\right)_{ГрЗб}$ визначали набір

шкали за попередню добу, або добову поправку до шкали за формулою:

$$\Delta T_3 = \left(\frac{\Delta f}{f}\right)_{ГрЗб} \cdot 86400 \text{ (с)}$$

Визначали значення шкали координованого часу на поточний день.

$$UTC(UC) = UTC(UC)_{II} + \Delta\Pi_3$$

де $UTC(UC)_{II}$ – значення шкали координованого часу ВЕЧЧ на попередній день.

Нестабільність частот водневих стандартів

Нестабільність частот ВС характеризувалася:

— середнім значенням за 30 діб відносних взаємних різниць частот ВС

$$\left\langle \frac{\Delta f_i}{f} \right\rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta f_i}{f}$$

де $\frac{\Delta f_i}{f}$ – відносні взаємні різниці частот ВС при і-му вимірюванні;

— середньоквадратичним відносним відхиленням відносних різниць частот ВС

$$\delta_B = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\Delta f_i}{f} - \left\langle \frac{\Delta f_i}{f} \right\rangle \right)^2}{n-1}}$$

— середньою систематичною відносною зміною відносних різниць частот ВС

$$\nu = \frac{\frac{\Delta f_1}{f} - \frac{\Delta f_n}{f}}{\tau_H}$$

де $\frac{\Delta f_1}{f}$ і $\frac{\Delta f_n}{f}$ – відносні різниці частот ВС на початку і в кінці часу спостереження τ_H (одна доба).

— середньоквадратичною відносною випадковою варіацією відносних різниць частот

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{\Delta f_{i+1}}{f} - \frac{\Delta f_i}{f} - \nu \cdot \tau_B \right)^2}{n-2}}$$

де n – число вимірювань, яке повинно було бути не менше 10;

τ_B – інтервал часу вибірки (дві години).

Ведення шкал часу ВЕЧЧ

При проведенні вимірювань, пов'язаних з контролем та веденням шкал часу ВЕЧЧ, виконувалися внутрішні звірення ведучого ВС ВЕЧЧ з іншими ВС ВЕЧЧ і зовнішні звірення зі шкалою часу ДПЕЧЧ, ННЦ «Інститут метрології», м. Харків. За результатами цих звірень будувалися три основні шкали часу ВЕЧЧ:

— атомна шкала часу ВЕЧЧ $TA(UC)$ – отримувалася аналітично (розрахунковим) шляхом за результатами внутрішніх звірень ведучого ВС з іншими ВС і з шкалою часу ДПЕЧЧ;

— шкала координованого часу ВЕЧЧ $UTC(UC)$ – отримувалася шляхом корекції атомної шкали часу ВЕЧЧ за результатами звірень шкал часу ВЕЧЧ зі шкалою часу ДПЕЧЧ по каналам зв'язку (наприклад GPS) і за допомогою рухомі квантового годинника (ВКГ);

— робоча шкала часу ВЕЧЧ $UTC(UC)_{POB}$ – формувалася від ведучого ВС і використовувалася для практичних вимірювань при проведенні внутрішніх і зовнішніх звірень.

Від кожного ВС, які входили до складу ВЕЧЧ формувалися їх шкали часу, які постійно звірялися зі шкалою часу ведучого ВС ВЕЧЧ по внутрішнім каналам звірень.

$T(UC)6$ – шкала часу ВС6 (типу Ч1-80);

$T(UC)3$ – шкала часу ВС3 (типу Ч1-70);

$T(UC)4$ – шкала часу ВС4 (типу Ч1-70).

Шкала $TA(UC)$ відтворювалася груповим зберігачем ВЕЧЧ. Початок відліку $TA(UC)$ встановлювалася при первинній атестації ВЕЧЧ, тобто:

$$UTC(UA) - TA(UC) = 0$$

Шкала ТА(УС), яка є локально-автономною, давала можливість метрологічної оцінки стабільності відтворення ВЕЧЧ розмірів одиниць за тривалий інтервал часу, а також для побудови групової шкали часу ВЕЧЧ.

В період між атестаціями ВЕЧЧ не було введення будь-яких поправок в розмір одиниць і часового положення ТА(УС).

Шкала атомного часу ТА(УС) – аналітична шкала з умовним початком відліку, в якій початковий момент і розмір одиниці часу не корегувалася, на відміну від шкали UTC(УС).

Значення атомної шкали заносилися до таблиці результатів.

Робоча шкала часу ВЕЧЧ $T(UC)POB$ – це фізична шкала, яка реалізувала координовану шкалу часу ВЕЧЧ з точністю до відомої поправки – 50 нс. Ця шкала відтворювалася апаратурою формування, зберігання і резервування робочої шкали часу, яка отримувала сигнали еталонної частоти одного з водневих зберігачів, який був на той час ведучим. Якщо розходження робочої і координованої шкал часу перевищувала допустиме значення, то робоча шкала корегувалася.

Величина поправки до робочої і координованої шкали часу розраховувалася наступним шляхом.

Визначалася різниця між робочою та координованою шкалами часу.

$$\Delta = UTC(UC) - T(UC)POB_{II}$$

де UTC(УС) – значення шкали координованого часу ВЕЧЧ на поточний день;

$T(UC)POB_{II}$ – значення робочої шкали ВЕЧЧ за попередній день.

Визначалася величина поправки до робочої шкали $\Delta T = n \cdot 50 - \Delta$, де $n = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$

За результатами розрахунків визначалося значення робочої шкали ВЕЧЧ, як:

$$T(UC)POB = T(UC)POB_n + \Delta T$$

Значення різниці робочої і координованої шкал часу розраховувалися кожний день і її значення заносилися до таблиці результатів.

Атомна шкала ВЕЧЧ ТА(УС) відтворюється груповим зберігачем ВЕЧЧ. Початок відліку ТА(УС) встановлювалася при первинній атестації ВЕЧЧ, тобто $UTC(UA) - TA(UC) = 0$

Шкала ТА(УС), яка є локально-автономною, давала можливість метрологічної оцінки стабільності відтворення ВЕЧЧ розмірів одиниць за тривалий інтервал часу, а також для побудови групової шкали часу ВЕЧЧ.

В період між атестаціями ВЕЧЧ не допускалося введення будь-яких поправок в розмір одиниць і часового положення ТА(УС).

Шкала атомного часу ТА(УС) – аналітична шкала з умовним початком відліку, в якій початковий момент і розмір одиниці часу не корегувалася, на відміну від шкали UTC(УС).

Значення атомної шкали заносилися до таблиці результатів.

Основними методами звірень ВЕЧЧ с ДПЕЧЧ до 2008 р. були:

- метод звірення сигналів часу по каналу СРНС GPS/ГЛОНАСС;
- метод звірень шкал часу за допомогою вимірюваного квантового годинника (ВКГ);
- метод звірень шкал часу за допомогою апаратури радіометеорного каналу «Метка-6М».

Вказані звірення здійснювалися:

- каналом СРНС GPS/ГЛОНАСС – постійно кожної парної години доби;
- за допомогою ВКГ – за затвердженням графіком;
- за допомогою апаратури «Метка-6М» – за затвердженням графіком.

Визначення розмірів одиниць часу та частоти, що зберігаються робочим еталонном, при використанні каналу СРНС GPS/ГЛОНАСС здійснювалися на інтервалі часу 3 місяці.

Управління роботою приймальної апаратури каналу СРНС GPS/ГЛОНАСС типу СН-3834 здійснювалося спеціальною комп'ютерною програмою. Сигнали шкали часу поступали на комутатор 101А/1, результат вимірювання відображався на табло частотоміра ЧЗ-64. Значення розходження шкал часу заносилися до таблиці результатів.

При використанні метода ВКГ обчислювався фактичний інтервал часу між двома звірненнями. У разі, якщо розміри одиниць, що зберігалися ВЕЧЧ, відрізнялися від розміру одиниць, що зберігав ДПЕЧЧ, більше, ніж на величину $8 \cdot 10^{-14}$, виконувалися коригування розміру одиниці частоти ВЕЧЧ.

Автоматична система внутрішніх звірень

В 2004 році за договором з ННЦ «Інститут метрології» були успішно проведені роботи по розробці та введенню в експлуатацію автоматичної системи внутрішніх звірень. Управління внутрішніми звіреннями здійснювалося спеціально розробленою комп'ютерною програмою, яка по заданому алгоритму автоматично і в певній послідовності переключала пари каналів, які вимірювалися на двох комутаторах типу 101А/1. При цьому, значення, які вимірювалися з частотоміра ЧЗ-64/1 записувалися в базу даних, а також відображалися на екрані монітора та записувалися в журнали ведення внутрішніх звірень. Програма керувала роботою всього цього комплексу приладів через комп'ютерну плату, підключену до зовнішніх пристроїв сполучення, які керували роботою комутаторів та частотоміра.

Метрологічні характеристики ВЕЧЧ

Нижче наведено графік взаємного розположення шкал часу, побудований за результатами внутрішніх і зовнішніх звірень ВЕЧЧ, починаючи з квітня 1975 року до серпня 2004 року. На графіку є два принципово різні періоди – перший з 1975 року по 1989 рік, другий з 1989 року до 2004 року.

В перший період в якості зберігачів частоти і часу використовувалась група спеціальних еталонних кварцових генераторів ЕКГ. На графіку можна побачити, що в цей період розходження шкал часу знаходилося всередині інтервалу ± 9 мкс., тоді це з запасом відповідало характеристикам, які були записані у паспорті ВЕЧЧ того часу.

В другий період, в 1989 році було проведено велике переоснащення ВЕЧЧ, був введено в експлуатацію комплекс Ч0-101, основою якого були водневі стандарти частоти і часу типу Ч1-70 (чотири стандарти). В комплекс спеціальних приладів ВЕЧЧ входили також системи, які забезпечували комутацію та розмноження еталонних сигналів водневих стандартів (УКРИК) та проведення внутрішніх звірень частотно-часових характеристик водневих стандартів між собою (ССФ и СИОКУ). Метрологічні характеристики ВЕЧЧ в цей період значно поліпшувалися. Це бачимо на графіку, с 1989 року по 1999 рік величина розходження шкал часу не виходила за межі ± 3 мкс., а з 1999 року по 2004 рік ця величина заходила всередині інтервалу ± 1 мкс., що з великим запасом відповідало значенням метрологічних характеристик, що були записані в паспорті на ВЕЧЧ ДП «Укрметртестстандарт» на той час.

Висновки

За роки функціонування та вдосконалення ВЕЧЧ ДП «Укрметртестстандарт»:

- 1 Не було жодного випадку метрологічного відказу ВЕЧЧ.
- 2 Декілька разів проведено модернізацію апаратури ВЕЧЧ.
- 3 Метрологічні характеристики ВЕЧЧ рік у рік поліпшувалися.
- 4 ВЕЧЧ ДП «Укрметртестстандарт» за усі роки свого функціонування відіграє важливу роль у забезпеченні єдності вимірювань часу та частоти в Україні. Фактично, в Україні в системі Держспоживстандарту до цього часу є тільки два еталона одиниць часу та частоти - Державний первинний еталон одиниць часу та частоти (ННЦ «Інститут метрології», м. Харків) та ВЕЧЧ ДП «Укрметртестстандарт», м. Київ.

Список літературних джерел

1. А. Бич. Основы теории времени. – К.: Знание Украины, 2005.
2. П. И. Бакулин., Н.С. Блинов. Служба точного времени. – М.: Наука, 1977.
3. О. Величко, Б. Макаренко, В. Камінський та ін. Державна служба єдиного часу і еталонних частот – необхідний елемент розвитку наземної космічної інфраструктури України. Космічна наука і технологія. 1997. – Т. 3, № 1.2.
4. О.С. Клейман, В.П. Оголюк, Г.С. Сидоренко, В.С. Соловійов, О.О. Ткачук. Державний первинний еталон одиниць часу і частоти. Український метрологічний журнал. 1997. Випуск 3.
5. Г. Сидоренко, В. Соловійов, О. Ткачук та ін. Використання сигналів супутникових радіонавігаційних систем для порівнення шкал часу. Космічна наука і технологія. – 2001. Т.7. - №4.
6. О. А.-Б. Ахмадов, В.С. Писчиков. Вторинний еталон часу та частоти УкрЦСМ. 1998. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції. Метрологія та вимірювальна техніка. Сборник статей.

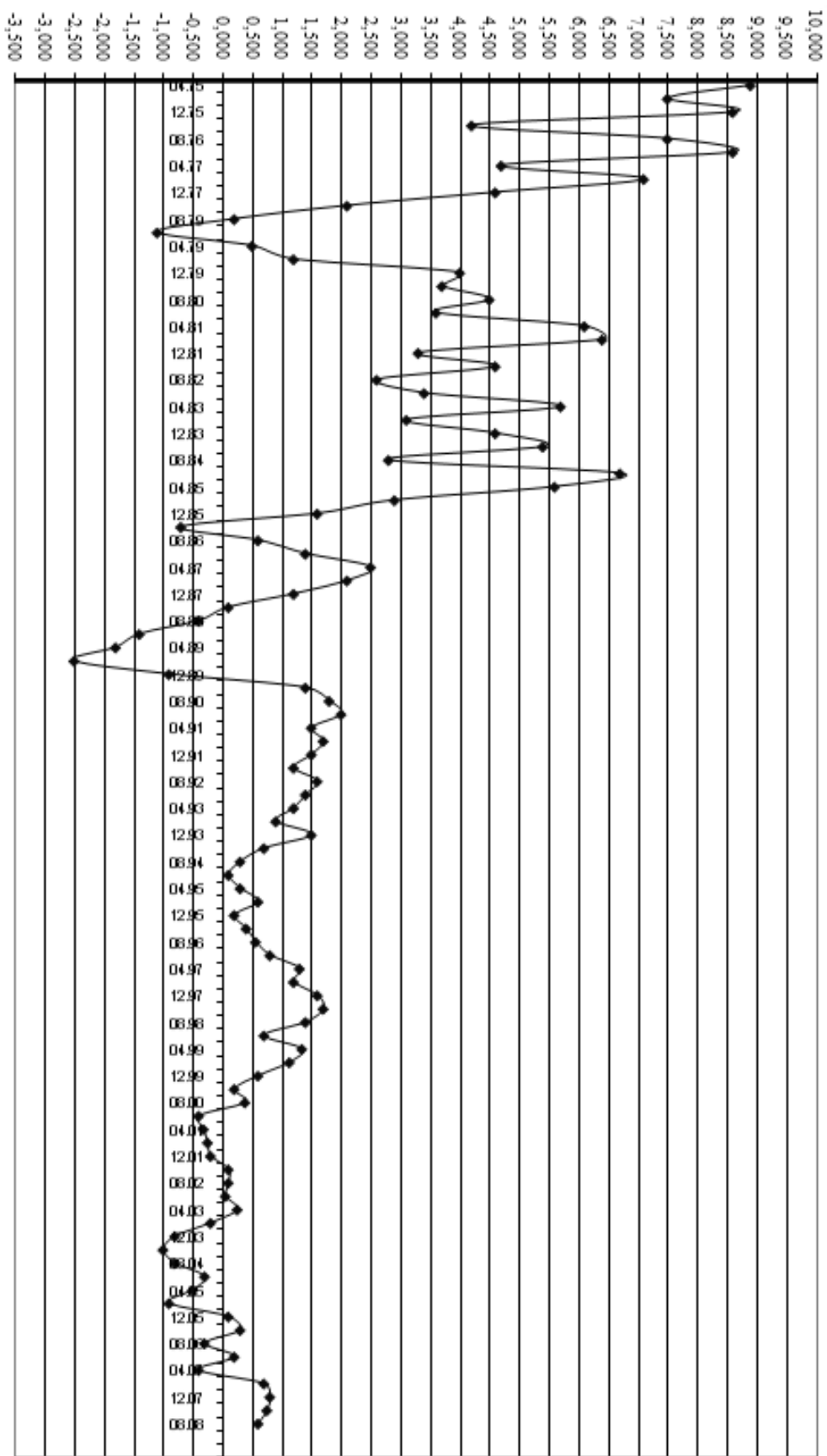


Рис. 1. Розподілення шкали часу UTC(US)-T(GPS), мкс, 1975 - 2008