



УДК 621.396.96

Е.А. Корецький, О.А. Михєєв, Р.М. Пароз  
ННЦ “Інститут метрології”, Харків, Україна

## СТВОРЕННЯ МОБІЛЬНОГО ЗБЕРІГАЧА ЧАСУ РУБІДІЄВОГО ІЗ ЗОВНІШНЬОЮ СИНХРОНІЗАЦІЄЮ ВІД ДЕРЖАВНОГО ПЕРВИННОГО ЕТАЛОНА ОДИНИЦЬ ЧАСУ І ЧАСТОТИ\*

*The main aspects of the creation of mobile timekeeper with the possibility of synchronization to State Primary Standard of Time and Frequency of Ukraine are considered and outlined. The detailed analysis of similar devices is made and choose the the most optimal technical solution in terms of functionality and price criteria. The basis is selected rubidium generator manufactured by Stanford Research Systems firm. To synchronize remotely with a primary standard GPS receiver of the Motorola company is used. The main element of the control unit is single board computer type of Raspberry Pi. The connection to the remote computer through Web interface are implemented. The experimental research of the created devices have been carried out.*

**Ключові слова:** мобільний еталон часу і частоти, шкала часу, синхронізація, глобальна супутникова навігаційна система.

### Постановка проблеми

На сьогоднішній день одна з важливих та актуальних задач — забезпечення єдності вимірювань в Україні за допомогою розроблення та подальшого удосконалення технічної бази Служби єдиного часу і еталонних частот для забезпечення держави частотно-часовою інформацією найвищого рівня точності в єдиних одиницях і шкалах без просторово-часових обмежень її одержання і використання. Частково вона може бути вирішена шляхом створення мобільного зберігача часу і частоти із зовнішньою синхронізацією від Державного первинного еталона одиниць часу і частоти (ДПЕЧЧ).

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

В Україні відсутнє виробництво сучасних рубідієвих газорозрядних ламп та генераторів частоти на їхній базі. Тому в результаті проведеного аналізу метрологічних та технічних характеристик наявних на ринку рубідієвих ламп за основу мобільного зберігача часу і частоти рубідієвого, що розробляється, було обрано рубідієвий модуль виробництва компанії Stanford Research Systems (США) типу PRS10 [1].

Даний генератор відрізняється від конкурентів ультранизькими значеннями спектральної щільності

потужності фазового шуму ( $-130$  дБ/Гц на частоті відстроювання  $10$  Гц), підвищеним строком експлуатації рубідієвої газорозрядної лампи ( $20$  років).

Низький фазовий шум модуля обумовлений тим, що на відміну від більшості аналогічних генераторів вмонтований кварцовий генератор, частота якого управляється за допомогою рубідієвої газорозрядної лампи, працює не на першій, а на третій гармоніці. Підвищений ресурс рубідієвої газорозрядної лампи забезпечується її вдосконаленою конструкцією з боковим відводом. Така конструкція, на відміну від класичної лампи сферичної форми, дозволяє загрузити збільшений приблизно в  $10$  разів запас рубідію.

Модуль, оснащений вбудованим синтезатором частоти, що керується мікроконтролером та здійснює підстроювання кварцового генератора частоти за сигналами, що поступають від світлочутливого детектора рубідієвої лампи. Крім того, в модулі передбачена можливість синхронізації генератора за зовнішніми сигналами ( $1$ PPS від прецизійного стандарту часу і частоти або від приймача сигналів супутникової навігаційної системи). Час інтегрування сигналів зовнішньої синхронізації може змінюватися в широкому діапазоні (від  $4$  хвилин до  $18$  годин).

Конструкцію модуля показано на рис. 1, 2.

\* Продовження публікації матеріалів X Міжнародної науково-технічної конференції “Метрологія та вимірювальна техніка” (початок – в “УМЖ” №3 за 2016 р.). Доповіді конференції друкуються безпосередньо з авторських оригіналів.

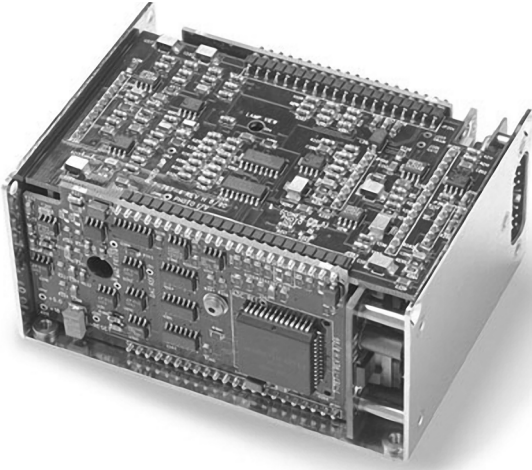


Рис. 1. Конструкція модуля рубідієвого генератора

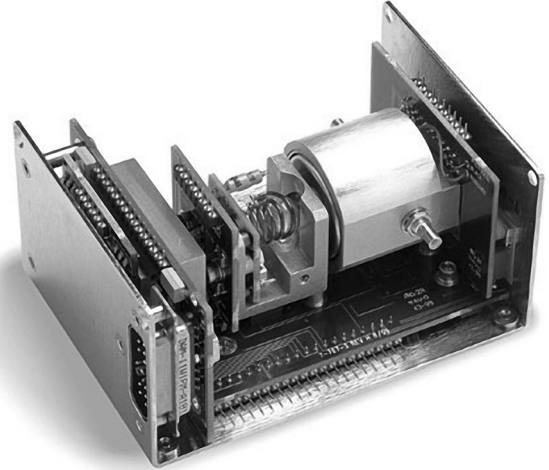


Рис. 2. Конструкція рубідієвої газорозрядної лампи модуля рубідієвого генератора

### Розробка мобільного зберігача часу

У ході виконання робіт було розроблено спеціальну комп'ютерну програму, за допомогою якої можливо повністю керувати усіма режимами роботи рубідієвого модуля, що входить до складу зберігача, а також приймачем GPS, за допомогою якого виконується синхронізація мобільного зберігача часу з ДПЕЧЧ. Для проведення досліджень було обрано GPS-приймач фірми Моторола типу Motorola Oncore UT+.

Особливістю GPS приймача Motorola Oncore UT+ є спеціальний режим роботи Precise Timing Mode. Він дозволяє поліпшити характеристики 1PPS сигналу і використовувати приймач у високоточних системах синхронізації часу. Нестабільність сигналу 1PPS на виході приймача Motorola Oncore UT+ оцінюється такими значеннями:

- в режимі Survey = 130 нс;
- в режимі Hold — утримання координат = 50 нс.

Програма MotorolaSettings призначена для перегляду і зміни поточних налаштувань GPS приймача, розрахунку координат антени за потрібний інтервал часу і переведення приймача в режим Precise Timing Mode.

Основним елементом блока керування є одноплатний комп'ютер типу Raspberry Pi Він виконує наступні функції:

- зв'язок з персональним комп'ютером (ПК) через web-інтерфейс. Це необхідно для передачі команд керування з ПК на рубідієвий модуль для виводу телеметрії з модуля, управління вихідною частотою модуля без захвату за зовнішніми сигналами, передачі параметрів захвату при синхронізації частоти модуля за зовнішніми сигналами, а також перебудови часової шкали модуля;

- вимірювання часової різниці між шкалою модуля та шкалою приймача GPS;

- вивід інформації на рідинно-кристалічний індикатор;

- керування мікросхемою синтезатора частот для формування на додатковому виході сигналу із заданої частотою, начальною фазою та амплітудою.

В якості синтезатора частот була використана мікросхема прямого синтезу типу AD9954 фірми Analog Device. Інтегральна схема AD9954 є цифровим синтезатором прямого синтезу, який використовує передові технології у поєднанні з внутрішньою високою швидкістю, високошвидкісний ЦАП для формування повної цифровим засобом програмованої фази, синтезатор високої частоти, що здатний генерувати аналоговий синусоїдальний сигнал з частотою від декількох герц до 160 МГц. AD9954 дозволяє формувати швидкі стрибкоподібної перебудови частоти в поєднанні з тонкою настройкою як по частоті (розрізнявання 0,01 Гц або краще) і фазою (розрізнення 0,022°). AD9954 програмується через послідовний порт вводу/виводу з високою швидкістю. Він також має високошвидкісний компаратора на кристалі для випадків, що вимагають вихідний сигнал прямокутної форми. Вбудований або зовнішній генератор з внутрішньою системою ФАПЧ надають користувачам широкі можливості для генерації системного тактового сигналу пристрою.

### Результати експериментальних досліджень мобільного зберігача часу

У ході виконання робіт були проведені експериментальні дослідження мобільного зберігача часу. Дослідження торкалися насамперед частотно-часових характеристик стандарту, а саме довготривалі та короткотривалі характеристики нестабільності частоти в режимі без зовнішньої синхронізації та з зовнішньою синхронізацією за сигналами GPS.

Усі вимірювання проводилися фазо-часовим методом і визначалася відносна нестабільна частоти мобільного зберігача щодо міри № 3 еталона. Запис вимірювань вівся безперервно на протязі не менш 3 діб з інтервалом запису 1 сек.

За результатами експериментальних даних були розраховані значення девіації Алана для стандартних інтервалів усереднення  $\tau$ : 1, 10, 100, 1000, 10000 та 100000 с. Було досліджено декілька режимів роботи мобільного зберігача, а саме: вільний хід (без зовніш-

ньої синхронізації), а також з зовнішньою синхронізацією з інтервалами усереднення 4 хвилини, 68 хвилин та 9 годин. Інтервали усереднення вводяться в якості параметру в рубідієвий модуль за допомогою програми управління, яка описана вище. Кінцеві результати експериментальних досліджень наведено в таблиці 1.

Крім того, були досліджені частотні характеристики мобільного зберігача на добових інтервалах усереднення, тобто обчислювались середні відносні частотні відхилення на добових часових інтервалах, а потім визначалось середнє квадратичне відхилення цих точок. Результати вимірювань та розрахунків наведено в таблиці 2.

Таблиця 2. Девіація Алана для різних режимів мобільного зберігача часу

$\tau$ , с	1	10	100	1000	10000
Вільний хід	$4,32 \cdot 10^{-10}$	$4,23 \cdot 10^{-11}$	$4,58 \cdot 10^{-12}$	$7,04 \cdot 10^{-13}$	$1,19 \cdot 10^{-12}$
Зовнішня синхронізація, T=4 хвил.	$4,51 \cdot 10^{-10}$	$7,38 \cdot 10^{-11}$	$2,22 \cdot 10^{-11}$	$6,28 \cdot 10^{-12}$	$1,26 \cdot 10^{-12}$
Зовнішня синхронізація, T=68 хвил.	$4,02 \cdot 10^{-10}$	$4,01 \cdot 10^{-11}$	$4,14 \cdot 10^{-12}$	$2,13 \cdot 10^{-12}$	$8,33 \cdot 10^{-13}$
Зовнішня синхронізація, T=9 годин	$4,03 \cdot 10^{-10}$	$4,11 \cdot 10^{-11}$	$4,69 \cdot 10^{-12}$	$1,38 \cdot 10^{-12}$	$9,65 \cdot 10^{-13}$

Крім того, мобільний зберігач має вихід часової шкали, який може перебудовуватися з розрізнявальною здатністю 1 нс. У режимі зовнішньої синхронізації за GPS часова шкала зберігача синхронізується з часом GPS або UTC. У цьому випадку, використовуючи білутені T, в яких наводяться дані про відхилення часової шкали первинного еталона часу і частоти України від шкали UTC, є можливість перебудувати шкалу мобільного зберігача та забезпечити її синхронізацію з первинним еталонном часу та частоти.

Результати є невід'ємною частиною робіт із забезпечення розвитку та подальшого удосконалення технічної бази Служби єдиного часу і еталонних частот для забезпечення держави частотно-часової інформації найвищого рівня точності в єдиних одиницях і шкалах без просторово-часових обмежень її одержання і використання шляхом створення мобільного зберігача часу і частоти рубідієвого із зовнішньою синхронізацією від Державного первинного еталона одиниць часу і частоти.

Результати цієї роботи використовуються для розв'язання низки наукових і прикладних задач:

– підвищення можливостей Служби єдиного часу і еталонних частот по забезпеченню споживачів (особливо військових споживачів) часо-час-

Таблиця 1. Середнє квадратичне відхилення частоти мобільного зберігача на добових точках усереднення

	СКВ
Вільний хід	$1,39 \cdot 10^{-12}$
Зовнішня синхронізація, T=4 хвил.	$3,62 \cdot 10^{-13}$
Зовнішня синхронізація, T=68 хвил.	$1,04 \cdot 10^{-13}$
Зовнішня синхронізація, T=9 годин	$4,29 \cdot 10^{-13}$

Таким чином, аналіз даних таблиць 1 і 2 свідчить про те, що створений мобільний зберігач часу відповідає характеристикам та параметрам вторинного еталона часу та частоти.

тотною інформацією в умовах відсутності каналів зв'язку та при наявності завад;

– підвищення технічних та метрологічних характеристик мобільних зберігачів часу вітчизняного виробництва (з використанням компонентів закордонного виробництва) до сучасного світового рівня.

### Висновки

Заявлений рівень технічних та метрологічних характеристик мобільного зберігача часу рубідієвого відповідає світовому рівню. Оцінена приблизна собівартість виробництва розробленого мобільного зберігача часу рубідієвого (близько 3500–4000 доларів США) є досить низькою, тому даний прилад є конкурентноспроможним. Попит на подібні прилади тільки на теренах СНД складає десятки одиниць на рік, тому доведення даного приладу до серійного виробництва є виправданим та перспективним.

У цілому виконано комплекс робіт з удосконалення технічної бази Служби єдиного часу і еталонних частот.

### Список літератури

[1] [www.thinksrs.com](http://www.thinksrs.com)