

## АНАЛІЗ І ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ СИНХРОНІЗАЦІЇ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ

*В роботі розглядаються методи синхронізації телекомунікаційних систем. Акцентується увага на необхідність правильної побудови апаратури синхронізації. Пропонується ряд технічних рішень на основі зовнішніх джерел еталонних сигналів, в якості яких пропонується використовувати радіочастотні методи синхронізації та методи синхронізації на основі супутникових навігаційних систем.*

*Ключові слова: мережа, синхронізація, стабільність, еталон частоти, еталон часу.*

V.R. LIUBCHYK, V.I. STETSYUK, I.V. FAYFURA

Khmelnitsky National University

### ANALYSIS AND IMPROVEMENT METHOD SYNCHRONIZATION TELECOMMUNICATION SYSTEMS

*Considers methods of synchronization of telecommunication systems. Focuses attention the need be built correctly synchronizations facilities. Proposed a number of technical solutions based on external sources of reference signals, as are the methods proposed to use frequency synchronization and synchronization methods based on satellite navigation systems.*

*Keywords: network, synchronization, stability, standard frequency, standard time.*

#### Вступ

Будь-яка цифрова телекомунікаційна мережа, у якій спільно працюють системи передачі та комутації інформаційних потоків, повинна мати для забезпечення надійності та якості свого функціонування систему тактової мережної синхронізації (ТМС). До таких мереж відносяться мережі синхронної цифрової ієрархії (SDH) та плезіохронної цифрової ієрархії (PDH). Система ТМС здійснює узгодження шкал часу і частоти всіх пристроїв мережі, щоб уникнути або звести до мінімуму помилки асинхронізму (джитер, вандер, стафінг, “ковзання” цифрового сигналу, тощо). Без вирішення проблеми синхронізації не можна побудувати систему з гарантованою високою якістю зв'язку. Забезпечення тактової синхронізації телекомунікаційної мережі при підтримці як можна більш високої стабільності еталонних тактових частот є принципово необхідним. Одне з найбільш складних завдань при проектуванні мереж ТМС – вибір способу одержання сигналів синхронізації та їх розподіл всередині цифрової мережі для забезпечення надійною синхронізацією всього цифрового обладнання. Таким чином, актуальність даного питання очевидна, причому вона не знімається в процесі розвитку, модернізації та вдосконалення мережних технологій, а навпаки загострюється.

#### Програмно-апаратні методи покращення синхронізації телекомунікаційних систем і мереж

Більшість телекомунікаційних цифрових систем, що використовують когерентну модуляцію, вимагають усі три рівні синхронізації: фазову, тактову (символьну) і циклову (кадрову). Системи цифрового зв'язку з некогерентною модуляцією зазвичай вимагають тільки тактової (символьної) і циклової (кадрової) синхронізації, оскільки модуляція є некогерентною, точної синхронізації фази не потрібно. Крім того, некогерентним системам необхідна частотна синхронізація. Частотна синхронізація відрізняється від фазової тим, що копія носійного коливання, яке генерується приймачем, може мати довільний зсув фази від прийнятої носійної. Мережна синхронізація є одним із видів синхронізації, необхідної для підтримки безперервності передачі інформації в цифровій мережі, що містить різні системи передачі та комутації, які розташовані в різних місцях телекомунікаційної мережі. Найбільш загальною є система тактової мережної синхронізації, яка забезпечує когерентність коливаний генераторів тактової частоти на безлічі вузлів цифрової мережі зв'язку. Система ТМС є сукупністю ведучих і ведених генераторів та каналів синхронізації, які створюють мережу тактової синхронізації.

Рекомендація ІТУ-Т G.803 [1] описує наступні режими цифрових мереж за синхронізацією:

1) *синхронний* режим (SDH, Synchronous Digital Hierarchy), при якому ковзання практично відсутні та мають випадковий характер. Це режим роботи мереж із примусовою синхронізацією, коли всі елементи мережі одержують тактову частоту від одного еталонного генератора.

2) *псевдосинхронний* режим застосовується там, де застосування синхронного режиму пов'язане з технічними або організаційними труднощами. Цей режим має місце на стиках мереж із синхронними режимами роботи. Характеризується використанням еталонних генераторів із добовою нестабільністю не більше  $10^{-11}$  (згідно G.811); допускається одне ковзання за 70 дб;

3) *плезіохронний* режим (PDH, Plesiochronous Digital Hierarchy) – означає “майже синхронний” і характеризується внутрішньою синхронізацією вузлів від власних джерел з номінально співпадаючими частотами та відсутністю синхронізації комутаторів. Цей режим роботи найбільш простий для реалізації, оскільки дозволяє уникнути розподілу тактових імпульсів по всій мережі. В мережах SDH даний режим може існувати тимчасово при втраті елементом мережі зовнішньої примусової синхронізації або при відмові основних (резервних) еталонних генераторів. Характеризується відносною помилкою встановлення

номінальної частоти в синхросигналі не більше, ніж  $10^{-9}$  (1 ковзання за 17 годин);

4) *асинхронний* режим характеризується повною відсутністю синхронізації. Існував на початковій стадії розвитку телекомунікаційних систем. Сьогодні практично не застосовується в цифрових мережах. Являється аварійним для системи ТМС, при побудові яких необхідно виключити можливість виникнення такого режиму. Відносна нестабільність частоти складає  $10^{-5}$  (1 ковзання за 7 секунд).

При побудові мереж передачі даних використовуються генератори трьох рівнів точності і стабільності: Stratum 1, Stratum 2 (2E) і Stratum 3 (3E) [2].

Рівень *Stratum 1* – найвищий. Гарантована точність – не нижче  $\pm 1 \cdot 10^{-11}$ . Досягнути такого рівня можна, використовуючи квантові стандарти частоти (наприклад, рубідієві) або спеціальні частото задаючі засоби, які будуть розглянуті нижче. При побудові телекомунікаційних мереж використання такого рівня синхронізації оправдане тільки на рівні первинного еталонного генератора (ПЕГ) через високу вартість і технічну складність обладнання.

Рівень *Stratum 2* – більш низький, він гарантує точність не нижче  $\pm 1 \cdot 10^{-8}$ , якої можна досягнути використовуючи термостатовані кварцові генератори ОСХО, ДОСХО. Дані пристрої мають помірну вартість, велику номенклатуру і широко використовуються в якості опорних генераторів та пристроїв хронуння. В ієрархії телекомунікаційних мереж рівень Stratum 2 відповідає вторинним задаючим генераторам (ВЗГ).

Рівень *Stratum 3* гарантує точність не нижче  $\pm 4,6 \cdot 10^{-6}$ . Із запасом забезпечується термокомпенсованими аналоговими кварцовими генераторами (КГ). Подібні пристрої не дорогі, також мають широку номенклатуру. В мережі синхронізації рівень Stratum 3 відповідає генераторам мережних елементів (ГМЕ).

Сучасні мережі характеризуються трьома топологіями побудови систем синхронізації [1, 2]:

- ієрархічна, від головного генератора або система “ведучий-ведений”;
- система взаємної синхронізації генераторів;
- змішана синхронізації.

На практиці побудова конкретної телекомунікаційної мережі здійснюється згідно обраної технології (PDH, SDH, ATM, тощо), топології та ряду об’єктивних і суб’єктивних параметрів. Але неминуче питання вибору засобів і методів синхронізації складових мережі. Причому, яка б не була обрана схема побудови мережі (ієрархічна, взаємна або змішана), наряду із внутрішньою синхронізацією, необхідно передбачити можливість надходження сигналів синхронізації від зовнішнього більш стабільного (еталонного) джерела. Такими зовнішніми джерелами можуть бути: радіочастотні методи синхронізації, методи синхронізації на основі супутникових навігаційних систем та програмні засоби синхронізації.

Еталонні сигнали часу і частоти (ЕСЧЧ) є засобом передачі розмірів одиниць і шкал часу та являють собою несучі коливання, модульовані за амплітудою, фазою або частотою сигналами, що містять часові мітки шкали часу, а також інформацію про поточні значення часу, дати та іншої додаткової інформації. ЕСЧЧ призначені для передачі розмірів одиниць часу, частоти і шкали координованого часу UTC від державного первинного еталону до еталонних і робочих засобів вимірів з метою забезпечення єдності вимірів часу і частоти в країні. Для передачі еталонних сигналів Державними службами часу, частоти і визначення параметрів обертання Землі використовується розгалужена мережа засобів передачі:

- ДХ спеціалізовані радіостанції (наприклад RBU і RTZ);
- КХ спеціалізовані радіостанції (наприклад RWM);
- космічна навігаційна система ГЛОНАСС / GPS / Galileo;
- засоби передачі ЕСЧЧ разом із сигналами телебачення;
- засоби передачі точного часу через глобальну мережу Інтернет.

Особливе значення мають радіостанції спеціального призначення, деякі із них представлені у табл. 1.

Таблиця 1

Еталонні сигнали часу і частоти

Назва радіостанції	Частота носійного коливання, кГц	Випромінювана потужність, кВт	Форма сигналів та спосіб їх передачі	Похибка за частотою і часом
RBU	66 2/3	10	DXXXW Безперервно	$2 \cdot 10^{-12}$ ; 10 мкс
RTZ	50	10	NON, A1X, A1N, Безперервно	$5 \cdot 10^{-12}$ ; 20 мкс
RWM	4996 9996 14996	20 20 20	A1X, A1N, NON, Безперервно	$5 \cdot 10^{-11}$ ; 20 мкс
RID	5004 10004 15004	5 5 5	A1X, A1N, NON, Безперервно	$5 \cdot 10^{-11}$ ; 20 мкс

NON – немодульовані несучі коливання; A1 – випромінювання з АМ несучих коливань квантованими сигналами без застосування модулюючих підносійних коливань; A2 – випромінювання з АМ несучих коливань квантованими сигналами із застосуванням підносійних коливань; A1N (A2N) – випромінювання типу A1 (A2), що не містить інформації змінного характеру; A1X (A2X) – випромінювання типу A1 (A2), що містить інформацію нестандартного виду; DXXXW – випромінювання при якому несучі коливання модулюються в певній послідовності за амплітудою і фазою складним сигналом шляхом комбінації частотного і часового ущільнення.

Найбільш відомі радіонавігаційні мережі наземного базування, що працюють на частотах 50 кГц, 66,6 кГц і 100 кГц, які доступні на території України. Сигнали вказаних радіомовних служб поширюються на відстані від 1000 до 50000 км і охоплюють величезні території, наприклад RBU і RWM – від 20-60° с. д. до 40-70° пн. ш., що більш ніж достатньо для України.

З таблиці видно, що похибка за частотою сигналів, переданих у ДХ діапазоні на частотах 66,(6) кГц і 50,0 кГц, становлять від  $2 \cdot 10^{-12}$  до  $5 \cdot 10^{-12}$  за добу, що навіть дещо вище, ніж у рубідієвого (Rb) стандарту частоти. Для порівняння нагадаємо, що відповідно до рек. G.811 МККТТ погрешність по частоті первинного еталонного генератора на цифровій мережі не повинна перевищувати  $1 \cdot 10^{-11}$  за час від 7 діб і більше. Таким чином, характеристики ЕСЧЧ перевищують дані вимоги і цілком можуть бути використані як джерело синхронізації, навіть із огляду на той факт, що на приймальній стороні точність частоти може бути знижена на порядок (гірший варіант).

На основі запропонованого методу синхронізації із застосуванням сигналів ЕСЧЧ і досвіду його реалізації, пропонується схема синхрокомплекту для сумісної роботи із телекомунікаційним обладнанням (рис. 1). Як бачимо, дана реалізація досить проста, а значить і максимально дешева, як і сам приймач еталонних сигналів.

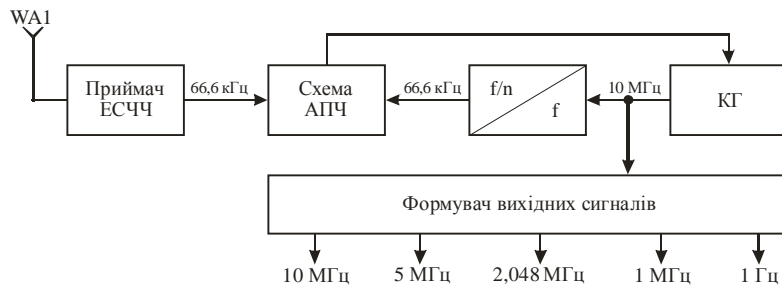


Рис. 1. Структурна схема запропонованого синхрокомплекту на основі сигналів ЕСЧЧ: ЕСЧЧ – еталонні сигнали часу і частоти; АПЧ – автоматичне підлаштування частоти; КГ – кварцовий генератор

Радіосигнал з антени виділяється, підсилюється приймачем і надходить на систему АПЧ, на другий вхід якої також приходить сигнал 66,6 кГц, який формується від внутрішнього кварцового генератора (КГ). Сигнал із системи АПЧ використовується для керування частотою кварцового генератора. Формувач вихідних сигналів здійснює формування синхро-последовностей 10 МГц, 5 МГц, 2,048 МГц, 1 МГц і 1 Гц. Таким чином, запропонований метод синхронізації на основі еталонних сигналів часу і частоти, що передаються постійно і безкоштовно дозволяє засинхронізувати телекомунікаційне обладнання на рівні рубідієвого стандарту частоти. Серед недоліків даного методу синхронізації слід відмітити неможливість використання повнодіапазонних антен та великий рівень індустріальних завод у всьому діапазоні. Тому прийом рекомендується здійснювати на магнітну антену.

Досить перспективним на сьогодні являється метод використання сигналів супутникових навігаційних систем (СНС) – GPS, ГЛОНАСС і GALILEO. Кожен навігаційний супутник обладнаний квантовим стандартом з відносною нестабільністю частоти  $10 \cdot 10^{-11} \dots 10 \cdot 10^{-12}$  (Cs, Rb, Cs+Rb). Але наземні приймачі мають набагато гірші параметри стабільності – порядку  $1 \cdot 10^{-9}$  і дозволяють здійснювати синхронізацію часу в точці прийому з точністю до 1-10 нс. Ця можливість реалізується завдяки тому, що GPS приймач окрім NMEA даних передає сигнали 1PPS, які з наносекундною точністю (залежно від моделі GPS приймача) прив'язані до точного часу. Прив'язка до шкали координованого часу UTC здійснюється по передньому фронту імпульсу 1PPS (1 Гц). Тому використання даних сигналів для хронування зв'язкових і телекомунікаційних систем являється перспективним. Так, наприклад, для роботи одночастотних мереж наземного цифрового телевізійного мовлення (мережі SFN) необхідна часова (1 імпульс/с) і частотна (10 МГц) синхронізація. Вилучити і сформувати ці сигнали можна за допомогою GPS приймача і відповідного синхрокомплекту.

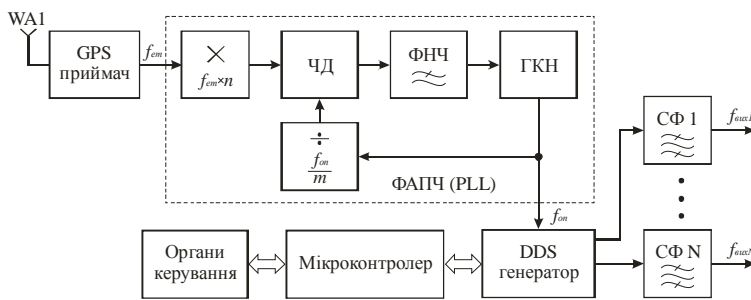


Рис. 2. Структурна схема синхрогенератора на основі DDS синтезу

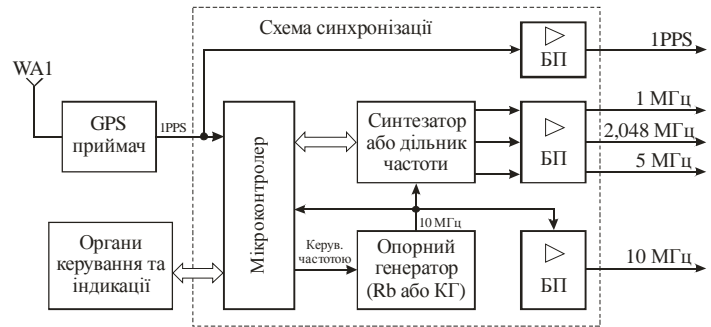
Використання сигналів навігаційних систем в якості еталонних може мати найрізноманітніший спектр. Найбільш очевидним варіантом такого застосування є DDS синтез, де в якості опорного генератора (в класичному варіанті кварцового) буде використовуватися комбінація GPS приймача і схеми ФАПЧ [3, 4]. GPS приймач виступає в ролі формувача еталонного сигналу (1PPS), на основі якого схема ФАПЧ формує високостабільний опорний сигнал для

DDS синтезатора. Останній може бути як одноканальним, так і багатоканальним (рис. 2). В якості частотозадаючого елемента у запропонованій структурі можна використовувати:

- DDS синтезатори (AD9851, AD9852, AD9854, AD9954, AD9956 та інш.);
- спеціалізовані мікросхеми для генерації тактових імпульсів (прецизійні формувачі серії AD95xx – джитер 263 фс ( $10^{-15}$ ));

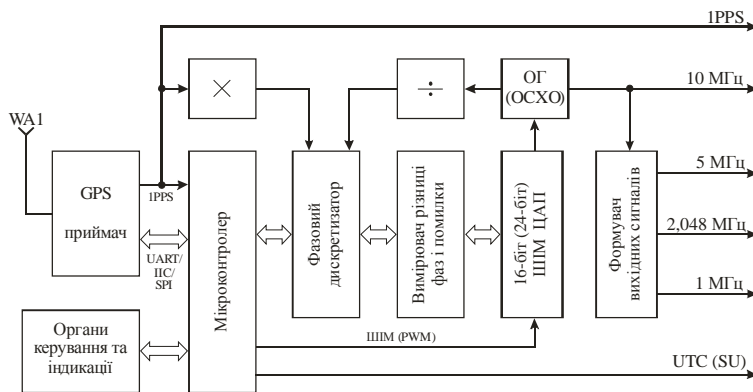
- генератори з вузькосмуговою ФАПЧ (IDT8T49N2031 – джитер 285 фс ( $10^{-15}$ )).

Принцип дії наступного запропонованого синхрокомплекту (рис. 3) оснований на безперервному порівнянні двох шкал часу, одна із яких визначається приймальним пристроєм супутникових навігаційних систем, а інша – формується із сигналу частотою 10 МГц, сформованого вбудованим рубідієвим (Rb) або термостабілізованим кварцовим (КГ) опорним генератором. Результати порівняння шкал часу використовуються для періодичного корегування частоти вбудованого опорного генератора. Сигнал із опорного генератора частотою 10 МГц надходить у мікроконтролер і синтезатор сигналів (подільник частоти) 5 МГц, 2,048 МГц і 1 МГц. Процесор формує шкалу часу генератора і постійно порівнює її зі шкалою часу UTC, використовуючи імпульси 1PPS із приймача GPS. Процесор здійснює статистичну обробку інформації про порівняння шкал часу, обчислює відносну різницю частот і формує код керування перелаштуванням синтезатора і сигнал керування частотою опорного генератора, тим самим здійснюючи його підстроювання за частотою 10 МГц. Сигнали 5 МГц, 2,048 МГц і 1 МГц являються найбільш вживаними в апаратурі синхронізації, тому їх формування необхідно передбачити при проектуванні. В даному випадку ряд необхідних частот забезпечує синтезатор, керований мікроконтролером. Всі вихідні сигнали виводяться назовні через відповідні буферні підсилювачі. Додатково передбачена можливість відтворення високостабільного імпульсного сигналу частотою 1 Гц (1PPS), прив'язаного до шкали часу супутникових навігаційних систем. Керування режимами роботи і поточну індикацію здійснюють відповідні органи.



БП – буферний підсилювач; Rb – рубідієвий генератор; КГ – кварцовий генератор (ОСХО)  
 Рис. 3. Структурна схема синхрогенератора з рубідієвим стандартом

Окрім розглянутих аналогових методів побудови синхрокомплекту телекомунікаційних систем на основі сигналів супутникової навігації, можна запропонувати і суто цифрову схему. Особливістю даної схеми є наявність кола цифрового ФАПЧ, організованого на основі мікроконтролера, фазового дискретизатора, вимірювача різниці фаз і помилки, 16-біт або 24-біт ЦАП (за вимогою), керованого методом широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), опорного термостатованого кварцового генератора (ОСХО), дільника опорного сигналу 10 МГц та помножувача частоти сигналу 1 PPS.



ШИМ (PWM) – широтно-імпульсна модуляція; UTC – всесвітня шкала координованого часу; ОГ – опорний кварцовий генератор (ОСХО)  
 Рис. 4. Структурна схема цифрового синхрогенератора

За допомогою сигналів супутникових навігаційних систем можна синхронізувати персональні комп'ютери, локальні мережі, технологічне обладнання, тощо. Так як в даному випадку використовується часова синхронізація, а не частотна, то для забезпечення синхронізму всіх складових мережі достатньо самого протоколу NMEA 0183 [ ]. Структурна схема даного пристрою синхронізації представлена на рис. 5. Всі GPS приймачі обладнані протоколом обміну інформації з периферійними пристроями UART. Більш дорогі моделі мають паралельно додаткові інтерфейси – I<sup>2</sup>C, SPI та USB. Для стикування з ПЕОМ найзручніше використовувати UART. Обмін інформацією здійснюється за протоколом NMEA 0183 (текстовий протокол зв'язку для навігаційного обладнання), який містить найрізноманітнішу інформацію, серед якої: координати місця розташування, висоту над рівнем моря, швидкість пересування і саме основне – точну дату і час, прив'язані до всесвітньої шкали координованого часу UTC. Далі це повідомлення розшифровує мікроконтролер, виводить дані на екран контрольного монітора і формує відповідні синхросигнали на одному із своїх інтерфейсів (за вимогою – RS-232, RS-422, RS-485). Якщо необхідно обслуговувати n-ну кількість периферійних пристроїв (технологічного обладнання), необхідно

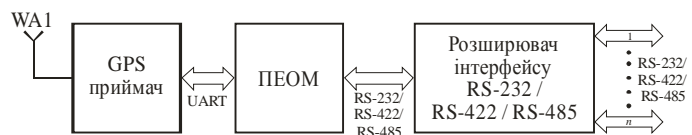


Рис. 5. Структурна схема пристрою синхронізації за протоколом NMEA 0183

Якщо необхідно обслуговувати n-ну кількість периферійних пристроїв (технологічного обладнання), необхідно

встановити розширювач відповідного інтерфейсу (RS-232 / RS-422 / RS-485).

Ще одне із запропонованих застосувань сигналів супутникової навігації – синхронізація бездротових систем зв'язку і моніторингу (рис. 6).

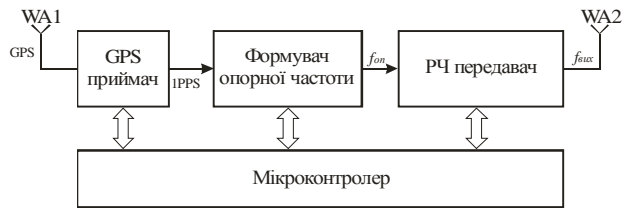


Рис. 6. Структурна схема пристрою синхронізації бездротових систем з використанням мікроконтролера

За допомогою даної схеми можна синхронізувати віддалені об'єкти та пристрої, а також технологічне обладнання в мобільному режимі. Так, наприклад для роботи в діапазонах ISM та GSM в якості радіочастотного передавача можна використати однокристалні пристрої типу TRF4900 і TH722032 з робочою смугою частот – 850-950 МГц. Даний принцип синхронізації може бути реалізований в будь-якому радіочастотному діапазоні – 433 МГц

(ADF7021-N – 80-650 МГц), FM 88-108 МГц (NJM2206), тощо.

Логічним доповненням ряду реалізацій можуть бути комбіновані методи синхронізації телекомунікаційних систем (рис. 7), які будуть містити як приймач ЕСЧЧ, так і приймач GPS в якості джерел еталонних сигналів. Також обов'язкова наявність власного високостабільного термостатованого кварцового генератора (ОСХО), який працює постійно, засинхронізовуючись від одного із джерел за протоколом пріоритету. При нормальному прийомі усіх сигналів, перевага повинна віддаватися сигналам ЕСЧЧ. При цьому перемикач SA1 замкнений і еталонні сигнали ЕСЧЧ надходять на вхід підлаштування внутрішнього КГ. Якщо з якої-небудь причини сигнали ЕСЧЧ будуть відсутні або прийом їх стане неможливим, перемикач SA1 розмикається, а SA2 замикається надаючи еталонний сигнал нижчого пріоритету (з приймача GPS). При відсутності обох зовнішніх еталонних сигналів, власний КГ виробляє опорний сигнал і синхрокомплект в цілому залишається працездатним, підтримуючи стабільність сигналів синхронізації на максимально можливному для нього рівні. Зрозуміло, що час самостійної роботи необхідно мінімізувати. Але слід сказати, що вірогідність відсутності обох сигналів надзвичайно низька. Крім того, можна передбачити алгоритм самонавчанням, а також наявність відповідних сигналів сигналізації стану.

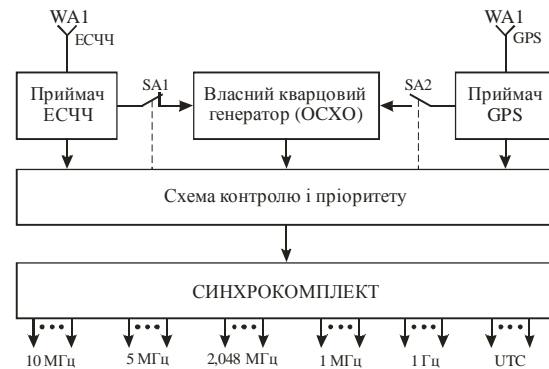


Рис. 7. Комбінований синхрокомплект

Запропонований у роботі метод синхронізації із використанням сигналів супутникових навігаційних систем дозволяє порівняно просто і дешево забезпечити часову і частотну синхронізацію телекомунікаційного обладнання із стабільністю  $1 \cdot 10^{-9}$ , що перевищує рівень Stratum 2 на порядок. Зрозуміло, що це набагато гірше, ніж ЕСЧЧ ( $1 \cdot 10^{-12}$ ), але сигнали навігаційних систем присутні постійно в будь-якій точці земної кулі, поширюються безкоштовно, а апаратура має мініатюрне виконання, включаючи антенне обладнання.

Маючи доступ до глобальної мережі Internet можна синхронізуватися за протоколом NTP (Network Time Protocol), наприклад, з pool.ntp.org. Це величезний кластер серверів точного часу, що надає надійний і простий у використанні сервіс для мільйонів клієнтів. NTP – мережний протокол для синхронізації внутрішнього часу комп'ютера з використанням мереж зі змінною латентністю. Він використовує алгоритм Марзулло, включаючи таку особливість, як врахування часу передачі. У версії 4 здатний досягати точності 10 мс (1/100 с) при роботі через мережу Internet і до 0,2 мс (1/5000 с) та краще всередині локальних мереж. Як і описані вище генератори трьох рівнів точності і стабільності, сервери також бувають Stratum 1, Stratum 2 і Stratum 3.

Stratum 1 – одержують точний час безпосередньо від джерела точного часу: атомних годинників (наприклад time-a.nist.gov, точність –  $10^{-12}$ ) або GPS приймача (ntp.x.imvr.ru точність –  $10^{-9}$ ). Є сервери, які отримують точний час через стільникову мережу CDMA ( $10^{-6}$ ). Простим користувачам звертатися до Stratum 1 серверів строго заборонено (точніше публічного доступу взагалі немає), тому що навантаження на них і так дуже велике.

Stratum 2 – одержують точний час від Stratum 1 серверів. При правильному налаштуванні та виборі серверів-джерел точного часу мають погрішність менше 1 мс ( $\pm 1 \cdot 10^{-3}$ ). Підключатися зазвичай можна всім, але багато серверів регулярно “падають” від навантаження (наприклад time.windows.com). Вказаний вище www.pool.ntp.org підтримує round-robin списки публічних Stratum 2 NTP серверів. У такий спосіб забезпечується балансування навантаження і вони практично завжди доступні.

Stratum 3 – одержують час від Stratum 2 серверів, тому великої точності ці сервери не забезпечують. Але при великій кількості серверів, мільйонам користувачів забезпечується придатна для побутового використання синхронізація.

Із всього вище сказаного очевидно, що використовувати глобальну мережу Internet для

синхронізації телекомунікаційного обладнання не можна. Слід також врахувати той факт, що мова йде про часову синхронізацію, тобто розбіжність шкал часу між конкретним сервером і UTC, але крім точних часових міток потрібно мати еталон частоти, який отримати з комп'ютера неможливо.

#### Висновки

У ході проведених досліджень підтверджена можливість використання еталонних сигналів часу і частоти (ЕСЧЧ) для побудови систем синхронізації телекомунікаційних мереж найвищого рівня з гарантованою точністю  $\pm 1 \cdot 10^{-11}$ . В роботі була розроблена схема синхрокомплекту на основі приймача ЕСЧЧ RBU 66,6(6) кГц. Запропонований метод синхронізації на основі еталонних сигналів часу і частоти, що передаються постійно і безкоштовно дозволяє засинхронізувати телекомунікаційне обладнання на рівні рубідієвого стандарту частоти. Даний метод синхронізації виявився найбільш дешевим і стабільним.

Розглянуто методи синхронізації на основі супутникових навігаційних систем (СНС) та розроблено ряд практичних рішень на рівні структурних схем різноманітних варіантів їх застосування. Запропонований у роботі метод синхронізації із використанням сигналів СНС дозволяє порівняно просто і дешево забезпечити часову і частотну синхронізацію телекомунікаційного обладнання із стабільністю  $1 \cdot 10^{-9}$ , що перевищує рівень Stratum 2 на порядок. Синхронізація цифрових пристроїв телекомунікаційних систем з використанням приймачів супутникових навігаційних систем дозволяє спростити структуру синхрокомплекту і скоротити витрати на синхронізацію мережного обладнання. Комплексування телекомунікаційних систем з навігаційною системою дозволяє:

- адаптивно змінювати параметри петель синхронізації та можливість виключення яких-небудь додаткових петель синхронізації;
- використати спрощені системи синхронізації;
- використати шкалу абсолютного часу для синхронної зміни основних параметрів радіосистеми (модуляції, кодування, шифрування, тощо);
- реалізацію синхронізації цифрових систем зв'язку за носійною частотою.

Крім того, при зв'язку з рухомими об'єктами приймач СНС видає дані про вектор швидкості об'єкта, що дозволяє врахувати в системі синхронізації ефект Доплера.

Стосовно програмних методів синхронізації зрозуміло, що використовувати їх для синхронізації телекомунікаційного обладнання не можна через низьку стабільність сигналів ( $1 \cdot 10^{-3}$ ) та відсутність еталонних частот у явному вигляді.

#### Література

1. ITU-T Recommendation G.803. Telecommunication standardization sector of ITU. Series G: transmission systems and media, digital systems and networks. Digital transmission systems – Digital networks – General aspects. – Geneva, 2001. – 59 p.
2. IEEE 1588-2008, IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems, July 2008. – PP. 1-269.
3. Стецюк В. І. Схемотехнічні особливості використання синтезаторів частот в приймальному тракту цифрових приймачів / В. І. Стецюк, Ю. М. Бойко // Вісник Хмельницького національного університету. – Хмельницький, 2013. – № 5. – С. 219-231.
4. Стецюк В. І. Дослідження характеристик кварцових резонаторів за допомогою DDS синтезаторів. – Міжнародний науково-технічний журнал “Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах”. – Хмельницький, 2014. – № 1, – С. 69-71.

#### References

1. ITU-T Recommendation G.803. Telecommunication standardization sector of ITU. Series G: transmission systems and media, digital systems and networks. Digital transmission systems – Digital networks – General aspects. – Geneva, 2001. – 59 p.
2. IEEE 1588-2008, IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems, July 2008. – PP. 1-269.
3. Stecyuk V. I. Shemotehni'chni osoblivosti vikoristannya sintezatoriv chastot v priymalnomu trakti cifrovih priymachiv / V. I. Stecyuk, U. M. Boyko // Vi'snik Hmelnickogo nacional'nogo universitetu. – Hmelnickiy, 2013. – № 5. – S. 219-231.
4. Stecyuk V. I. Doslijemnya harakteristik kvarcovih rezonatoriv za dopomogoyu DDS sintezatori'v. – Mijnarodniy naukovotekhnichnij jurnal “Vimiryuvalna ta obchislyuvalna tehnika v tehnologichnih procesah”. – Hmelnickiy, 2014. – № 1, – С. 69-71.

Рецензія/Peer review : 12.5.2015 р.

Надрукована/Printed : 15.5.2015 р.

Рецензент: к.т.н., доц. каф. РТЗ Бойко Ю. М.