

УДК 621.387

А.М. Носик<sup>1</sup>, О.П. Нарезній<sup>2</sup><sup>1</sup>Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків<sup>2</sup>Метрологічний центр військових еталонів Збройних Сил України, Харків

## ОСОБЛИВОСТІ ОРГАНІЗАЦІЇ ЕТАЛОННОГО СЕРВЕРА ЧАСУ АСУ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ НА ОСНОВІ АТОМНОГО ГОДИННИКА, ЩО СИНХРОНІЗУЄТЬСЯ ЗА СИГНАЛАМИ ГЛОБАЛЬНИХ НАВІГАЦІЙНИХ СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМ

В статті розглянуті програмно-апаратні засоби синхронізації (звірення) поточного часу АСУ спеціального призначення на основі застосування протоколу мережного часу NTP. Пропонується структура еталонного сервера часу даної системи на основі атомного годинника, що синхронізується з національною шкалою координованого часу UTC(UA) за допомогою сигналів, що передаються глобальними навігаційними супутниковими системами GPS/ГЛОНАСС.

**Ключові слова:** сервер часу, шкала часу, протоколи мережного часу.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Однією з найважливіших вимог до автоматизованих систем управління (АСУ), побудованих на основі сучасних цифрових систем зв'язку, є підтримка в комп'ютерному середовищі єдиного часу, погодженого зі шкалою все-світнього координованого часу UTC (Universal Time Coordinated) [1 – 3]. Це необхідно для точної фіксації подій та аварійних ситуацій у процесі функціонування АСУ. Тому в технічних характеристиках сучасних АСУ різного призначення задається інтервал часу, що називається максимальною похибкою синхронізації комп'ютерних часів MTSCC (Maximum Tolerance for Synchronization of Computer Clocks) [4]. Для реалізації в комп'ютерному середовищі єдиного часу за допомогою програмно-апаратних засобів на практиці створюються еталонні сервери часу, що представляють собою контролер домена, що звіряє час із точним зовнішнім хронометром [5].

У цей час питання застосування еталонних серверів часу в АСУ спеціального призначення Збройних Сил України, що синхронізується з національною шкалою координованого часу UTC(UA), мало досліджено. При цьому застосування часової синхронізації необхідне не лише при початковому завантаженні робочої станції, але й періодично в процесі роботи в мережі АСУ. Існує хибна думка, що відмова від застосування еталонних серверів часу для користувачів мережі не має очевидних наслідків. Проте для деяких функцій і процесів необхідні точні й синхронізовані маркери часу. Наприклад, неточні часові маркери можуть призвести до помилок при синхронізації автономних файлів, введенні інформації в бази даних і спільній роботі з документами.

У зв'язку із цим виникають завдання створення еталонних серверів часу для синхронізації (звірення) поточного часу в вузлах і серверах мережі, вибір методу (протоколу) розповсюдження сигналів точного часу, мінімізація похибок при розповсюдженні таких сигналів, а також вибір системи єдиного часу для забезпечення якісної взаємодії, раціонального використання мережних ресурсів АСУ спеціального призначення.

**Аналіз публікацій.** Аналіз побудови й проектування мереж синхронізації поточного часу в АСУ з розподіленою архітектурою вимагає оптимального вибору параметрів серверів часу, їх обґрунтованого територіального розподілу, а також вибору системи єдиного часу для калібрування серверів часу. Поставлені завдання можуть вирішуватися за допомогою протоколу мережного часу NTP (Network Time Protocol) [5 – 7] або нової версії протоколу прецизійного часу РТР [7, 8].

На теперішній час широко застосовується протокол NTP, для якого існує досить широкий спектр пристроїв з його реалізації.

Так, наприклад, даний протокол реалізовано у мережі Інтернет на двох зовнішніх серверах часу в США, що належать Військово-морській обсерваторії (USNO): ntp2.usno.navy.mil (192.5.41.209) і tock.usno.navy.mil (192.5.41.41) [9].

Використання цього протоколу дозволяє передати інформацію про точний час у локальних і глобальних мережах передачі даних (АТМ, локальні IP-мережі, магістральні мережі IP/MPLS і т.п.). У випадку використання протоколу NTP у мережі передачі даних АСУ можуть ефективно використовуватися такі пристрої, як сервери системи часової синхронізації.

При звіренні шкал часу (ШЧ), що власне і є основним завданням часової синхронізації, варто

враховувати похибки, які властиві повідомленням NTP. Основні методи практичної оцінки похибок сигналів NTP наведені в [5]. Типова точність синхронізації внутрішніх NTP-часів двох машин, підключених до однієї й тієї ж 10-Мбіт/с локальної мережі Ethernet, що завантажена не більше ніж на 80%, складає 10 мс. При великій довжині з'єднань (через весь континент) за комутуємими мережами точність синхронізації може складати 100 мс. При використанні міжконтинентальних і супутникових з'єднань точність синхронізації погіршується до 4 с [6].

Проте застосування стандартних атомних годинників з вмонтованим NTP-сервером та подібних пристроїв, що використовуються для синхронізації з UTC в АСУ спеціального призначення на сьогоднішній момент є не доцільним у зв'язку з їх закритою апаратно-програмною побудовою.

**Метою статті** є обґрунтування та вибір програмно-апаратних засобів необхідних для створення еталонного сервера часу в АСУ спеціального призначення, що синхронізується з UTC(UA) на основі застосування атомного годинника та вибору протоколу мережного часу NTP.

### **Викладення основного матеріалу**

Розв'язання задачі забезпечення режиму реального часу (real-time) АСУ нерозривно пов'язане із завданнями формування системної ШЧ і синхронізації з нею всіх компонентів системи. При цьому часові маркери будуть передаватися у цифровій мережі зв'язку з розподіленою архітектурою, що застосовується в АСУ. Основним вузлом системи єдиного часу, що пропонується, повинен стати еталонний сервер часу. У якості базового часозадаючого елемента АСУ пропонується використовувати атомні годинники, які формують ШЧ (і необхідну сітку синхрочастот) шляхом розподілу частоти опорного квантового стандарту частоти. Для цього необхідно виконати наступний комплекс науково-технічних заходів. По-перше, розробити програмно-апаратні засоби генерації й обробки NTP-повідомлень в АСУ з метою забезпечення доступності й максимальної надійності інформації про час, а також для синхронізації атомних часів еталонного сервера часу й передачі інформації про час віддаленим робочим станціям. По-друге, провести моніторинг особливості використання повідомлень протоколу NTP у реальній транспортній мережі АСУ. Для цього необхідно розсилаючи NTP-запити по всіх IP-адресах та аналізувати часові затримки, а на їх основі порівнювати ШЧ декількох територіально рознесених серверів NTP щодо одного з них. Крім того, на основі програмного забезпечення, призначеного для моніторингу підмереж NTP, можна встановити характер взаємних відхилень ШЧ

залежно від завантаженості мережі в різний час доби.

На практиці в якості NTP-серверів нульового рівня звичайно використовуються спеціалізовані пристрої з можливостями одержання інформації про час UTC безпосередньо від еталонного джерела (атомні годинники, приймач GPS/ГЛОНАСС, LORAN-3 або др.). Сервери рівня 1 або нижче являють собою підключені до IP-мережі робочі станції, на яких мітки часу обробляє спеціальне програмне забезпечення (активний NTP-демон). Крім того, активний NTP-демон забезпечує підтримку точного системного часу на ПЕОМ, на яких він установлений. У робочих станціях АСУ найнижчого рівня пропонується використовувати протокол SNTP (Simple Network Time Protocol) [4].

При цьому в якості базових виступають наступні три припущення: 1) пакет проходить шлях від робочої станції до сервера й назад за рівний час; 2) швидкість ходу годинників робочої станції й сервера однакові; 3) на обчислення нового локального часу не потрібні додаткові ресурси. Насправді всі ці припущення не вірні і одержати точне значення серверного часу за допомогою одного NTP-запиту неможливо. Тому для синхронізації часів, як правило, використовується декілька NTP-серверів, на які постійно надходять запити. Накопичуючи статистику за тривалий час математичними методами можна визначити точність показань кожного із серверів, швидкість ходу годинника на кожному з них та домогтися математично доказової точності синхронізації. Методи, що використовуються, описані, наприклад, у протоколі мережного часу NTP версії 3. Даний протокол докладно викладений у документі RFC-1305 і широко використовується для синхронізації годинників ПЕОМ у мережі Інтернет.

На цей час у протоколі NTP версії 4 реалізовано алгоритм синхронізації системних годин, який підвищує її точність і зменшує вплив мережного джиттера (jitter) [4], застосовуються збільшені (до 36 год) інтервали опитування, використовується пакетний (burst) режим, що гарантує швидку синхронізацію хоста при його запуску або після відновлення перерваного мережного з'єднання. В NTP версії 4 більшість обчислень використовують 64-розрядні числа із плаваючою комою, що дозволяє зменшити обсяг оброблюваних даних і прискорити їх обробку (зокрема, виключається операція контролю меж чисел). Також до переваг цієї версії відноситься схема аутентифікації (autokey), підтримка ядра (nanokernel) (для досягнення наносекундної точності) і адресації протоколу IPv6 [4].

Проте застосування часової мітки NTP версії 4 є необґрунтовано складним для апаратної реалізації еталонного сервера часу АСУ. Пропонується

використовувати часову мітку NTP версії 3, що характеризується 64-бітним числом без знака з фіксованою комою. При цьому системний час починається з 0 годин 1 січня 1900, а часові мітки складаються з 32-бітного лічильника секунд і 32-бітного лічильника часток секунди, дозволяючи передавати час у діапазоні  $2^{32}$  секунд з теоретичною точністю  $2^{-32}$  секунди. Максимальне число, що може бути представлене в даному форматі, дорівнює 4.294.967.295 секунд із точністю порядку 200 пікосекунд, що задовольняє вимогам АСУ.

У якості операційної системи для еталонного сервера часу пропонується використовувати операційну систему Linux (її оригінальне ядро може оперувати з мікросекундними часовими затримками). Для забезпечення підтримки ядром операційної системи Linux еталонного сервера часу АСУ буде потрібно дві речі. По-перше, можливо застосувати "відкриті" вихідні коди ядра, та, по-друге, відповідний ядру patch NTP. Апаратні годинники в операційній системі Linux відповідно до угоди мають адреси виду 127.127.t.u, де t – тип драйвера апаратних годин, u – номер екземпляра пристрою в діапазоні 0–3, що забезпечує можливість використання декількох пристроїв одного типу. Для підключення приймача GPS/ГЛОНАСС можна використовувати драйвер типу 20 – Generic NMEA GPS Receiver (NMEA), а для атомного годинника драйвер типу 22 – PPS Clock Discipline (PPS).

Відносна нестабільність частоти для сучасних атомних годинників дорівнює  $(1...5) \times 10^{-14}$  і вище [3]. Звичайно, для підтримки такої високої стабільності необхідне створення складного апаратного комплексу, що забезпечує функціонування серцевини атомного годинника – атомного (квантового) стандарту – в умовах постійної температури, мінімального впливу зовнішніх та внутрішніх електромагнітних полів, виключення вібрацій і т.п. Проте можливості протоколу NTP версії 3 не дозволяє реалізувати дану точність атомного годинника для АСУ. Тому застосування у якості атомного годинника цезієвих і водневих стандартів частоти є економічно й технічно не виправданим.

У якості атомного годинника для формування системної ШЧ еталонного сервера часу АСУ пропонується використовувати пасивний квантовий стандарт частоти типу СЧВ-74 з відносною похибкою по частоті від включення до включення  $\pm 2 \times 10^{-11}$  і синхронізатор типу Ч7-37 з похибкою формування ШЧ не більше 10 нс.

На теперішній час в Україні основними методами синхронізації часу й частоти є пасивні методи синхронізації, що засновані на використанні сигналів глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС) GPS і ГЛОНАСС. У зв'язку із цим у якості зовнішніх еталонних джерел синхросигналів для

корекції атомних (системних) годинників АСУ будемо застосовувати сигнали ГНСС. Прийнята ідеологія синхронізації ШЧ в АСУ дозволить досить просто забезпечити взаємну синхронізацію всіх системних шкал NTP серверів рівня 1. Найпростіший варіант розв'язання цього завдання полягає в наступному. До атомного годинника АСУ підключається навігаційно-часова апаратура системи GPS (або універсальна апаратура GPS/ГЛОНАСС), за сигналами ГНСС вирішується часова задача й визначається розбіжність системних шкал серверів рівня 1 (stratum 1). Розбіжність у вигляді відповідних коефіцієнтів заставляється на сервери рівня 1 (stratum 1) і передається разом з NTP повідомленнями. З урахуванням використання так званого цивільного C/A (Clear/Acquisition) коду (є й захищений P (Protected) код військового призначення) для системи GPS похибка складала за одними даними 170 нс, за іншими – 1 мкс. Система ГЛОНАСС із використанням ПТ-коду припускає похибку до 100 нс [4].

Аналогічний спосіб пропонується застосовувати для синхронізації атомного годинника еталонного сервера часу АСУ з UTC(UA), що формується Державним первинним еталоном одиниці часу та частоти України, але з більш високою точністю зведення ШЧ за рахунок застосування диференціального режиму [4].

Залежно від способу подальшого використання знайденої часової неузгодженості, яка обумовлена функціональним призначенням даного синхронізованого сервера, можливі різні варіанти зведення ШЧ мережі АСУ за сигналами ГНСС. Найбільш характерні алгоритми обробки вимірювань базуються на використанні методу найменших квадратів або рекурентного фільтра Калмана.

Для розв'язання задачі метрологічного забезпечення еталонного сервера часу пропонується використовувати стандартний транспортний контейнер для СЧВ-74 із незалежним автономним живленням і в «гарячому» режимі проводити атестацію безпосередньо на Державному первинному еталоні одиниць часу й частоти. Ця пропозиція дозволить реалізувати найбільш простий метод синхронізації (метод перевезених квантових годин), що дозволить не тільки атестувати часозадаючий компонент АСУ, але й провести калібрування транспортних потоків поширення NTP повідомлень.

На рис. 1 наведено варіант структурної схеми еталонного сервера часу АСУ, побудованого на основі типових засобів вимірювальної техніки.

Принципи коректування системного часу робочої станції АСУ вимагають, щоб їхнє значення нарощувалось монотонно, при цьому двох успішних зчитувань значень часу одночасно бути не мо-

же, ці значення ніколи не будуть співпадати. Такий стан речей можливий у випадку, якщо латентність при зчитуванні значень перевершує апаратну здатність.

Більшість ПЕОМ робочих станцій містять у складі апаратної частини кварцовий генератор з резонансною стабілізацією та апаратний лічильник, що генерує процесорні переривання через інтерва-

ли, які дорівнюють декільком мілісекундам. Змінна-час може бути прочитана операційною системою й додатками, а також змінена (встановлена) від зовнішнього програмного або апаратного впливу. Один раз встановлений комп'ютерний час отримує постійне збільшення з номінальним темпом, що залежить від величини розбіжності.

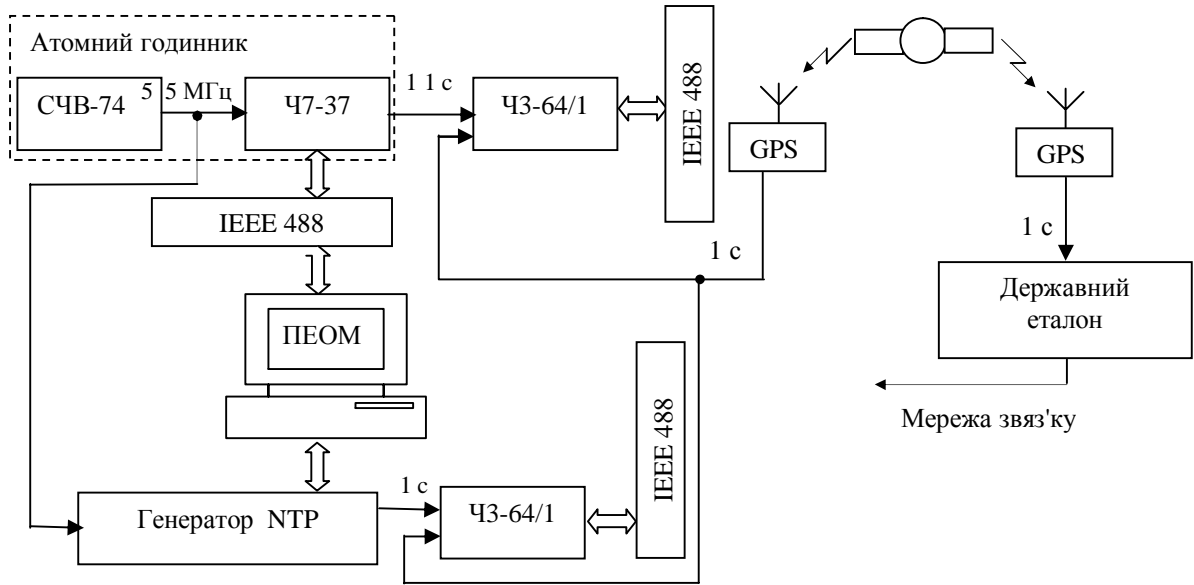


Рис. 1. Схема еталонного сервера часу АСУ, що реалізує протокол NTP

У нашому випадку ядро операційної системи Linux має програмні механізми збільшення або зменшення величини розбіжності на невелике фіксоване значення, для того, щоб зробити задане коректування комп'ютерного часу не стрибкоподібно, а поступово, протягом декількох наступних тактів.

При цьому процедура синхронізації часу робочої станції АСУ буде описуватися наступним чином. Модель зміни детермінованого тридцятимільйонного зрушення шкали робочої станції відносно ШЧ еталонного сервера часу може бути обчислена, як наступна функція:

$$\Delta T(t) = \Delta T(t_0) + \Delta f/f_H (t - t_0) + \frac{v(t - t_0)^2}{2},$$

де  $t$  – поточний час;

$\Delta T(t_0)$  – зсув ШЧ робочої станції щодо шкали еталонного серверу часу в момент останньої корекції  $t_0$ ;

$\Delta f/f_H$  – відносне відхилення частоти кварцового генератора від свого номінального значення  $f_H$ ;

$v$  – відносна швидкість лінійної систематичної зміни частоти (дрейф) внаслідок "старіння" кварцового резонатора.

Протокол NTP обчислює перші дві складові. Похибки, що обумовлені не урахуванням третьої

складової (що має вплив при різних прецизійних застосуваннях обчислювальної техніки), є незначними і у більшості випадків перекриваються похибками перших двох складових.

Протокол NTP оцінює  $\Delta T(t_0)$  й  $\Delta f/f_H$ , де необхідно, у фіксовані проміжки часу й проводить коректування часу з метою зменшення  $\Delta T(t)$  в подальшому.

У загальному випадку  $\Delta f/f_H$  має систематичні зсуви, що дорівнюють кілька сотень герц на мільйон в той чи інший бік, що викликано, в першу чергу, змінами температури навколишнього середовища. Якщо періодично не проводити корекцію, сумарна добова похибка може досягти декількох секунд за добу.

Для того щоб результуючі похибки не перевищували номінальних значень, алгоритми протоколу NTP періодично обчислюють  $\Delta T(t_0)$  і  $\Delta f/f_H$  з метою компенсування таких похибок та скорегування системний час.

На практиці це означає, що, наприклад, для досягнення номінальної точності в десять мілісекунд потрібна синхронізація робочої станції із сервером з інтервалом у десять хвилин.

## Висновки

У цей час у мережі АСУ спеціального призначення відсутні еталонні сервери часу, що синхронізуються зі шкалою координованого часу України UTC(UA). При цьому часова синхронізація необхідна не лише при початковому завантаженні робочі станції, але й у продовж всього часу їхньої роботи в мережі АСУ.

Аспекти безпеки й надійності функціонування АСУ не дозволяють використовувати стандартні еталонні сервери часу мережі, які використовують мережу Інтернет для синхронізації місцевої ШЧ із національною UTC(UA), внаслідок чого методи синхронізації, що використовують протокол NTP, потребують модифікації.

Потрібне проведення досліджень щодо накопичення статистики стосовно часових затримок за тривалий час на основі використання математичних методів визначення точності показань кожного із серверів, швидкості ходу годинників на кожному з них.

Застосування типових засобів виміральної техніки дозволяє вирішити задачу створення еталонного сервера часу нульового рівня (stratum 0) з мінімальними витратами.

Використання модифікованого протоколу NTP дозволить проводити криптографічну аутентифікацію індивідуальних серверів.

### Список літератури

1. Скляр Б. *Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение: пер. с англ. Е.Г. Грозы и др. / Б. Скляр.* – М.: Издат. дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.
2. Финкельштейн А.М. *Фундаментальное координатно-временное обеспечение / А.М. Финкельштейн // Вестник Российской Академии Наук.* – 2007. – Т. 77. – № 7. – С. 608-617.

3. *Maximum tolerance for computer clock synchronization / Microsoft TechNet January 21, 2005.* [Електрон. ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: [http://technet.microsoft.com/en-us/library/cc779260\(ws.10\).aspx](http://technet.microsoft.com/en-us/library/cc779260(ws.10).aspx).

4. Одуан К. *Измерение времени. Основы GPS: пер. с англ. / К. Одуан, Б. Гино.* – М.: Техносфера, 2002. – 400 с.

5. Mills David L. *Computer Network Time Synchronization: the Network Time Protocol / David L. Mills.* – CRC Press, 2006. – 304 p.

6. Савчук А.В. *Синхронизация текущего времени: протокол сетевого времени / А.В. Савчук, В.Н. Шапошников, И.П. Черняк // Зв'язок.* – 2007. – № 6. – С. 10-15.

7. Рыжков А.В. *Распределение сигналов точного времени по наземным цифровым сетям электросвязи / А.В. Рыжков, М.Н. Колтунов, Е.О. Новожилов, Н.Н. Леготин // Электросвязь.* – 2007. – №10. – С. 30-34.

8. Савчук А.В. *Синхронизация текущего времени: протокол прецизионного времени / А.В. Савчук, В.Н. Шапошников, И.П. Черняк // Зв'язок.* – 2008. – № 2. – С. 28-33.

9. *Список американских серверов точного времени (Военно-морская обсерватория).* [Електрон. ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <http://tycho.usno.navy.mil/ntp.html>.

10. *Сетевые спутниковые радионавигационные системы / В.С. Шебшаевич, П.П. Дмитриев, Н.В. Иванцевич и др.; под ред. В.С. Шебшаевича.* – 2-е изд. – М.: Радио и связь, 1993. – 408 с.

Надійшла до редколегії 31.08.2010

Рецензент: д-р техн. наук, с.н.с. Г.В. Худов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

### ОСОБЕННОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ ЭТАЛОННОГО СЕРВЕРА ВРЕМЕНИ АСУ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ АТОМНЫХ ЧАСОВ, СИНХРОНИЗИРУЕМЫХ ПО СИГНАЛАМ ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ

А.М. Носик, А.П. Нарезний

*В статье рассмотрены программно-аппаратные средства синхронизации (сличения) текущего времени АСУ специального назначения на основе применения протокола сетевого времени NTP. Предлагается структура эталонного сервера времени данной системы на основе атомных часов синхронизированных с национальной шкалой координированного времени UTC(UA) с помощью сигналов передаваемых глобальными навигационными спутниковыми системами GPS/ГЛОНАСС.*

**Ключевые слова:** сервер времени, шкала времени, протоколы сетевого времени.

### FEATURES OF REFERENCE SERVER TIME ACS SPETSIAL DESTINATIONS BASED ON ATOMIC CLOCKS SYNCHRONIZED ON SIGNALS GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEMS

A.M. Nosyk, O.P. Narezniy

*The article deals with software and hardware synchronization (comparisons) of the current time of ACS for special purposes on the basis of a Network Time Protocol NTP. The structure of the reference time server of the system based on atomic clocks synchronized with the national scale coordinated time UTC (UA) with signals transmitted global navigation satellite systems, GPS / GLONASS.*

**Keywords:** time server, time scale, transactions network time.