

А. В. САВЧУК, В. Н. ШАПОШНИКОВ, И. П. ЧЕРНЯК

СИНХРОНИЗАЦІЯ ТЕКУЩЕГО ВРЕМЕНИ: ПРОТОКОЛ ПРЕЦИЗИОННОГО ВРЕМЕНИ

Протокол прецизионного времени (*Precision Time Protocol — PTP*) был разработан в виде стандарта *IEEE 1588* для синхронизации роботов на автосборочных предприятиях в локальных сетях с коммутацией пакетов; в дальнейшем он привлек внимание инженеров связи, столкнувшихся с проблемой распространения сигналов синхронизации в транспортной среде *NGN* [1].

Предлагаемая статья продолжает серию публикаций [2; 3], посвященных современным способам сличения времени.

Сети электросвязи: NTP или PTP?

Ввиду локальной природы сличения времени измерить можно только «собственное время данных часов» в непосредственной близости от экспериментатора [4]. Метролог при выполнении своих основных функций имеет дело главным образом с распознаванием и использованием явлений, которые мало зависят от трудноконтролируемых источников погрешностей. Однако постановка задачи дистанционного сличения времени часов, встроенных в компьютеры, которые подключены к сети Интернет, связана именно с трудноконтролируемыми источниками возмущений — вариациями задержки передачи и сетевым джиттером вследствие очередей в маршрутизаторах, перегрузки трактов и непредсказуемого числа переприемов. Для преодоления трудностей, вызванных этими «издержками производства» сети Интернет, был создан набор «смягчающих» алгоритмов NTP (*Network Time Protocol* — протокол сетевого времени). В результате почти 30-летней эволюции удалось достичь точности дистанционного сличения времени *10...100 мс* в глобальной сети и *1...20 мс* в корпоративных сетях. Дальнейшее повышение точности станет возможным лишь тогда, когда производители вычислительной техники поймут необходимость устранить «досадные задержки» в сетевом оборудовании и использовать «хорошие» (т. е. более дорогие) часы [5]. Все это требует значительных капитальных вложений в производство оборудования связи, что влечет за собой увеличение его стоимости. Ценой значительных затрат можно добиться точности сличения времени по протоколу NTP *1...25 мкс*, но только в локальной сети производственного предприятия [3]. При этом для таких сетей разработан новый способ сличения времени с точностью *20...100 нс* под названием протокол прецизионного времени (*Precision Time*

Protocol — PTP). Он появился в виде стандарта *IEEE 1588* [6] на этапе внедрения техники Ethernet в контрольно-измерительные системы с возможностью обобщения на другие сети с многоадресной (multicast) рассылкой сообщений. В соответствии с Рекомендацией ITU-T G.8261 оба стандарта — NTP и *IEEE 1588* — становятся в некотором смысле конкурентными способами сличения времени в сетях следующего поколения (*Next Generation Network* — NGN). В самом общем виде это показано на рис. 1, где ccNTP (*carrier class Network Time Protocol*) — протокол сетевого времени «операторского класса» (см. далее); WAN — *Wide Area Network*; MAN — *Metropolitan Area Network*; LAN — *Local Area Network*.

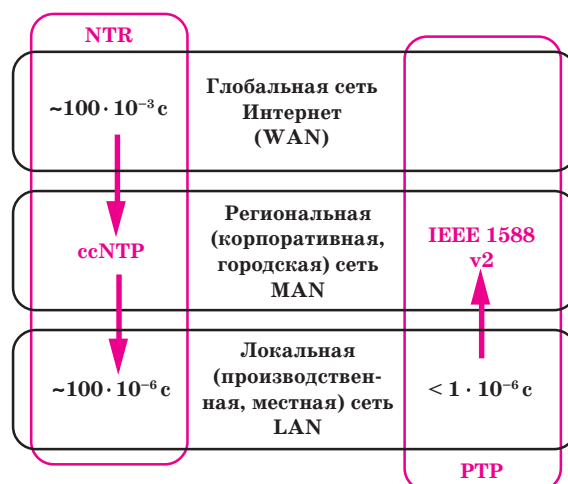


Рис. 1

В сети Интернет по алгоритмам маршрутизации могут быть выбраны разнообразные тракты передачи (по наземным или спутниковым линиям сетей общего пользования или ведомственных), а сеанс связи может быть прерван без всякого предупреждения. В результате из-за значительных вариаций задержек передачи качество обслуживания синхронизации по традиционному, или, как его часто называют, инициативному (*enterprise*) протоколу NTP не гарантированное, а «по возможности наилучшее» (*best effort*), тогда как в традиционных сетях электросвязи принято обеспечивать «магистральное» качество обслуживания, при котором эксплуатационная готовность всех основных составных частей инфраструктуры оператора составляет не менее 99,999%. Поэтому компания *Symetricom* реализовала протокол сетевого времени операторского класса (ccNTP), совмещенный с элементом сети тактовой синхронизации *SSU* (*Synchronization Supply Unit*) [8].

Высокое качество сличения времени, обеспечиваемое на основе РТР в локальных сетях, существенно ухудшается при попытках применить его, например, в городской сети общего пользования. Для преодоления этого недостатка был разработан РТР в виде IEEE 1588 v. 2, предназначенный специально для NGN [9].

На основе сопоставления двух наиболее развитых протоколов сличения времени — NTP [5] и РТР [10] — рассмотрим проблемы сличения времени и подстройки частоты в сетях с коммутацией пакетов.

Структура сети синхронизации по протоколу IEEE 1588

Если в случае NTP серверы часто работают как клиенты, а клиенты могут работать как серверы в режиме равноправного обмена, то сеть РТР строго иерархична. На вершине иерархии синхронизации располагаются, как показано на рис. 2, *гроссмейстерские часы* (grandmaster clock), обычно подключаемые к внешнему источнику UTC (Universal Time Coordinated — Всемирное скоординированное время), например к приемнику GPS.

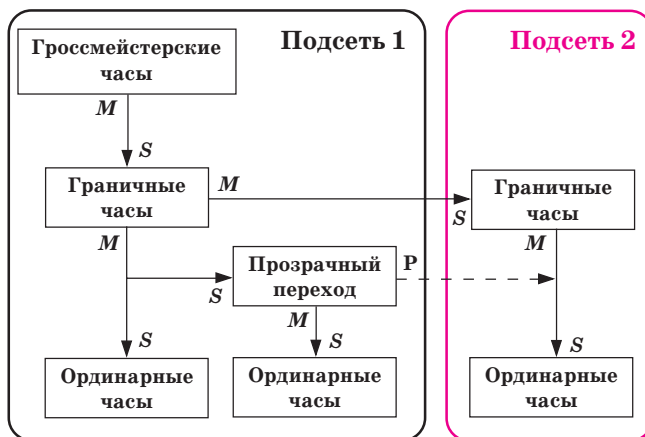


Рис. 2

Устройства РТР (*граничные часы* и *ординарные часы*) работают автономно, обнаруживая друг друга в сети с автоматическим конфигурированием. В результате формируется гибкая устойчивая сеть синхронизации, в которой нет необходимости конфигурировать отдельные устройства [7]. В каждом ведомом (slave — S) сетевом порту РТР с помощью алгоритма отыскания лучших ведущих часов оценивается роль других устройств РТР в сети по критериям: ведущий (master — M) или пассивный (passive — P).

Протокол РТР служит альтернативой NTP в сетях Ethernet как средство достижения повышенной точности благодаря аппаратным средствам проставления меток времени, встроенным в маршрутизаторы и коммутаторы. Маршрутизатор

(router) является источником флуктуаций задержки передачи между ведущими и ведомыми часами, достигающих $N \cdot 10^{-3}$ с, а такой элемент сети, как коммутатор (switch), — флуктуаций порядка $N \cdot 10^{-6}$ с. Очевидно, что при этом преодолеть барьер точности сличения времени в 10^{-6} с невозможно. Чтобы избавить сообщения РТР от задержек, вносимых коммутатором, предусмотрен *прозрачный переход* (transparency), который не подпадает под определение ведущих или ведомых часов и служит альтернативой граничным часам в пределах подсети как функция коммутатора (особенно при большом количестве последовательно соединенных коммутаторов).

Граничные часы, предназначенные для исключения больших флуктуаций задержек передачи, свойственных маршрутизаторам, работают как «передаточный стандарт времени» на границе между подсетями и наряду с выполнением функций синхронизации служат ретрансляторами управляющих сообщений РТР. Конструктивно они встроены в маршрутизатор как многопортовое устройство, причем один порт — ведомый гроссмейстерскими часами, а все остальные — ведущие для ординарных часов. Как свидетельствуют результаты экспериментов, граничные часы способны обеспечить сквозное сличение времени с точностью, которая эквивалентна достижимой в пределах подсети.

Ординарные часы — как правило, ведомые; они встроены в прикладные функции, представленные либо датчиками, либо исполнительными механизмами.

Особенности встречного метода сличения шкал времени по протоколу РТР

В отличие от протокола NTP, по которому обмен пронумерованными метками времени происходит одновременно со многими серверами и, как правило, в режиме равноправного обмена (peer-to-peer), в протоколе РТР встречный метод сличения шкал времени существенно доработан.

Первая особенность РТР состоит в том, что для доставки ведомым часам четырех меток времени используют не два, а четыре сообщения (рис. 3):

- ▶ *Sync* (синхронизация) — многоадресная рассылка от гроссмейстерских часов через каждые 2 с по умолчанию;
- ▶ *Follow Up* (напоминание) — многоадресная рассылка метки времени T_1 ;
- ▶ *Delay Req* (запрос задержки) — от ведомых часов гроссмейстерским;
- ▶ *Delay Resp* (отклик задержки) — передача времени T_4 .

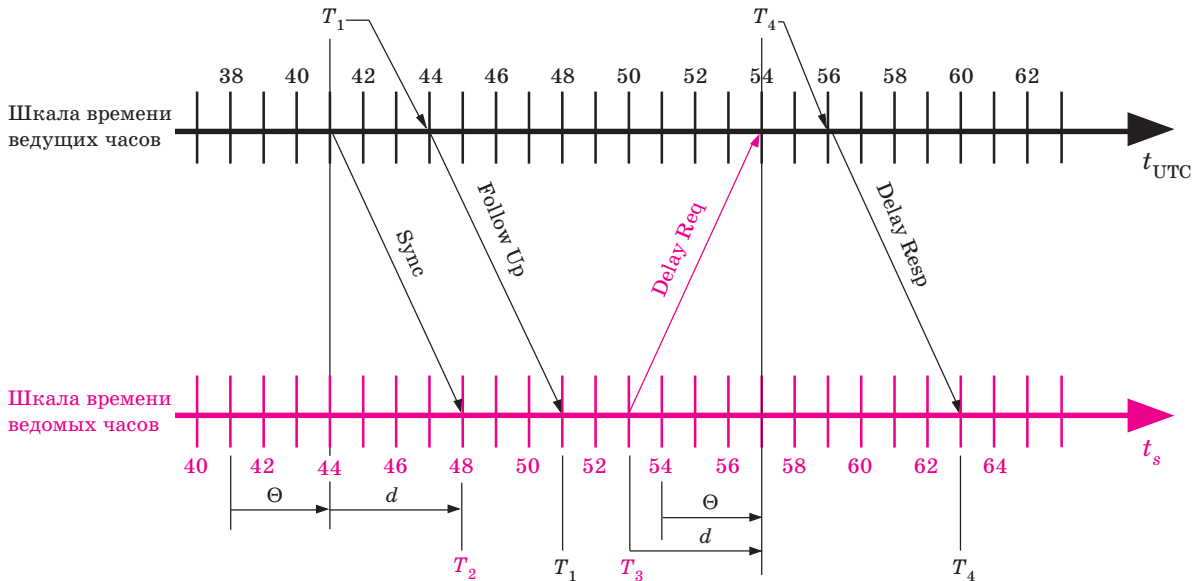


Рис. 3

В результате обработки этих четырех сообщений ведомые часы (как видно из рис. 3, где для наглядности на шкалах времени t_{UTC} ведущих и времени t_s ведомых часов нанесены секундные метки) получают четыре метки времени:

- ▶ T_1, T_2 — время соответственно отправки сообщения *Sync* от grossмейстерских часов и приема его ведомыми часами;
- ▶ T_3, T_4 — время соответственно отправки сообщения *Delay Req* от ведомых часов и приема его grossмейстерскими часами.

Остается вычислить:

- ▶ одностороннюю задержку передачи (исходя из предположения, что задержки в обоих направлениях одинаковы):

$$d = \frac{(T_2 - T_1) + (T_4 - T_3)}{2}; \quad (1)$$

- ▶ расхождение времени

$$\Theta = (T_2 - T_1) - d = \frac{(T_2 - T_1) - (T_4 - T_3)}{2}. \quad (2)$$

Например, для случая, представленного на рис. 3, где ведомые часы опережают ведущие на 4 с, получаем:

- ▶ одностороннюю задержку

$$d = \frac{(48 - 41) + (54 - 53)}{2} = \frac{7 + 1}{2} = 4 \text{ с};$$

- ▶ расхождение времени

$$\Theta = (48 - 41) - 4 = 7 - 4 = 3 \text{ с}.$$

Вторая особенность PTP заключается в том, что обмен сообщениями *Delay Resp* и *Delay Req* происходит нерегулярно (приблизительно 1 раз за 4...60 с), а многоадресная рассылка пары сообщений *Sync* и *Follow Up* — периодически (по умолчанию — каждые 2 с), причем (как показано на рис. 4) ведущие часы передают их значительно чаще, чем обмениваются с ведомыми часами сообщениями *Delay Resp* и *Delay Req*.

Из (2) следует, что в течение большей части времени ведомые часы получают регулярную поправку

$$(\Theta + d)_i = (T_{2i} - T_{1i}), \quad i = 1, \dots, 30, \quad (3)$$

где i — номер следующих одна за другой пар сообщений *Sync* и *Follow Up*.

Встроенные аппаратные средства PTP

Значительные вариации задержек, присущие сетям с коммутацией пакетов, — фактор, ограничи-

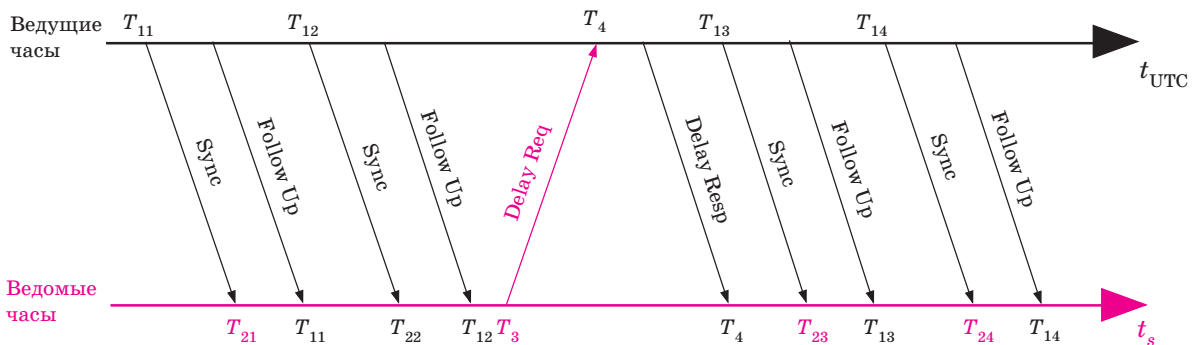


Рис. 4

ваючий можливість забезпечити якість синхронізації на субмікророзрядному рівні. Цілесобразність збільшення в таких умовах числа повідомлень РТР до чотирьох в поєднанні з апаратними засобами проставлення міток часу, вбудованими в маршрутизатори, можна пояснити з допомогою рис. 5.

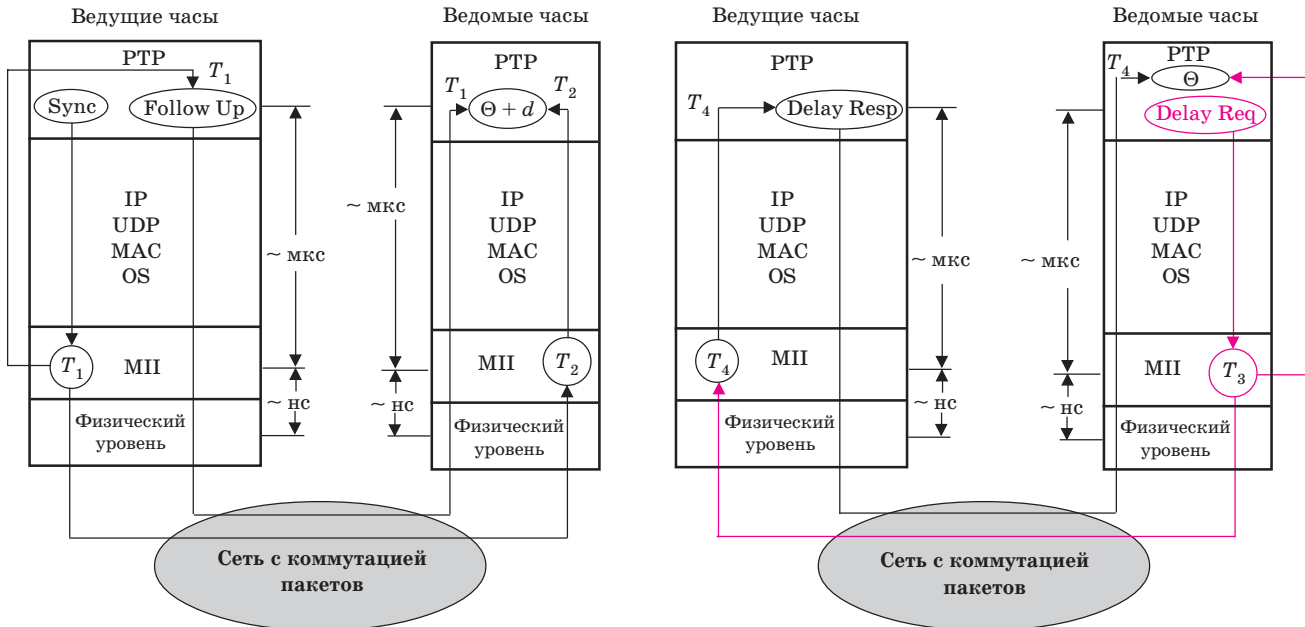


Рис. 5

Сообщения РТР формируются на прикладном уровне; ему предшествуют протоколы сетевого (IP — Internet Protocol) и транспортного (UDP — User Data Protocol) уровней, драйвер управления доступом к среде (MAC — Media Access Control) и операционная система (OS — Operating System), вариации задержки в которых составляют не менее $N \cdot 10^{-6}$ с. Чтобы их исключить, метку времени следует вставлять в сообщение и считывать из него как можно ближе к физическому уровню. Для этого используют независимый от среды интерфейс (Media Independent Interface — МП), благодаря которому (см. рис. 5) удастся уменьшить аппаратные флуктуации задержек при обработке стека протоколов с нескольких микросекунд до нескольких наносекунд.

Сличение шкал времени и подстройка частоты

Как и ранее [2], под синхронизацией частоты будем понимать поддержание (подстройку) одинаковой для всех часов частоты их генераторов, под синхронизацией (сличением) времени — согласование показаний всех часов с UTC, а под синхронизацией часов — синхронизацию и частоты, и времени. На практике в сетях NGN возможны два варианта.

1. В сети с коммутацией пакетов есть доступ к стыкам синхронизации (по определению Рекомендации ITU-T G.810). Последние могут принадлежать как внешней, так и собственной сети тактовой синхронизации (например, в случае синхронного Ethernet [1]). Тогда относительная частота генераторов часов может быть не хуже $1 \cdot 10^{-11}$,

что позволит весьма точно вычислить задержку по (1) и расхождение времени по (2). Результаты эксперимента (проведенного, правда, в сети SDH, а не в сети с коммутацией пакетов) показали, что погрешность сличений времени составила не более 4,4 нс на расстояниях свыше 18 000 км [11]. Протокол операторского класса ссNTP предназначен именно для варианта 1.

2. В сети с коммутацией пакетов нет доступа к стыкам синхронизации. В этом случае при синхронизации ведомых часов возникает противоречие: чтобы вычислить расхождение времени по (2), необходимо оценить задержку по (1) с достаточной точностью, но для этого придется подстраивать частоту генератора часов с помощью почти непрерывного сличения времени по той же формуле (2). Протокол IEEE 1588 v. 2 предназначен для варианта 2.

Подстройка частоты по протоколу РТР (вариант 2)

Регулярные поправки (3) по результатам обработки последовательных пар сообщений Sync и Follow Up вызывают периодическую пилообразную составляющую погрешности $x(t)$ [5] в показаниях

времени ведомых часов, которая на интервале рассылки τ_u имеет следующий вид (рис. 6, а):

$$x(t) = \begin{cases} \frac{\Theta}{\tau_u - \tau_c} t + d, & 0 \leq t < \tau_u - \tau_c; \\ -\frac{\Theta}{\tau_c} t + d, & \tau_u - \tau_c \leq t < \tau_u. \end{cases}$$

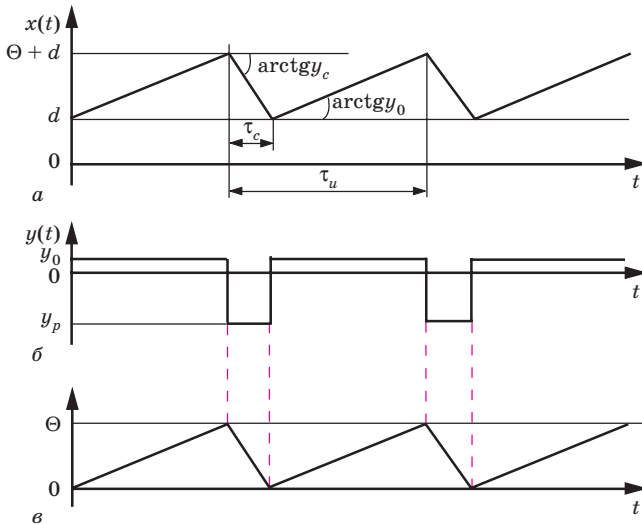


Рис. 6

Поправка состоит в том, что на интервале регулировки $\tau_c < \tau_u$ относительную частоту генератора ведомых часов принудительно устанавливают равной частоте y_c .

Чтобы сосредоточиться на процессе подстройки частоты, здесь мы откажемся от анализа других многочисленных систематических и случайных составляющих погрешности. С этой целью введем условие

$$\Theta = y_c \tau_c = y_0 (\tau_u - \tau_c), \quad (4)$$

где Θ — максимальное расхождение времени на интервале τ_u рассылки пары сообщений **Follow Up** и **Sync**, $\tau_u = 2$ с; y_0 — относительная частота генератора ведомых часов в режиме свободных колебаний.

Производная пилообразной составляющей погрешности времени ведомых часов (рис. 6, б)

$$\frac{dx(t)}{dt} = y(t)$$

описывает скачкообразное поведение относительной частоты

$$y(t) = \begin{cases} y_0, & 0 \leq t < \tau_u - \tau_c; \\ y_c, & \tau_u - \tau_c \leq t < \tau_u \end{cases}$$

их генератора, среднее значение которой при условии (4) равно нулю:

$$y_{cp} = \frac{1}{\tau_u} \int_0^{\tau_u} y(t) dt = \frac{1}{\tau_u} [y_0 (\tau_u - \tau_c) - y_c \tau_c] = \frac{v_{cp} - v_{UTC}}{v_{UTC}} = 0. \quad (5)$$

Другими словами, в результате усреднения пилообразной составляющей, возникающей вследствие регулярных поправок времени ведомых часов, средняя частота τ_{cp} их генератора становится равной частоте UTC. Это значит, что задача **синхронизации частоты** решена, правда, равенство $v_{cp} = v_{UTC}$, вытекающее из (5), имеет место при условии (4), которое на практике выполнить невозможно. Вследствие разброса относительной частоты генератора ведомых часов ее среднее значение v_{cp} можно определить с конечной неопределенностью, зависящей от выбора относительной частоты регулировки y_c . Для того чтобы **синхронизировать часы**, остается изредка уменьшать поправку (3) на значение односторонней задержки d , определяемой выражением (1), после обмена сообщениями **Delay Req** и **Delay Resp**, тем самым «подводя» часы на величину d . Тогда показания синхронизированных часов $x(t)$ будут иметь вид, показанный на рис. 6, в.

Оценка возможности подстройки частоты на основе РТР

Если говорить о системах связи, то, как следует из сказанного ранее, РТР в виде IEEE 1588 v. 2 служит предметом исследований как вариант «туннельного перехода» синхронизации частоты через сети с коммутацией пакетов, что особенно актуально для местных участков сетей мобильной связи 3G (рис. 7).

Пусть Θ_{max} — максимально допустимое расхождение времени, а $\tau_c = \frac{1}{n} \tau_u$, где $n \geq 2$ — целое число.

Тогда на основании (4) после несложных преобразований можно записать

$$y_0 < \frac{n}{\tau_u (n-1)} \Theta_{max}. \quad (6)$$

По умолчанию $\tau_u = 2$ с, и если нас интересует сличение времени с точностью 1 мкс, то $y_0 < 0,5 \cdot 10^{-6} \dots 0,56 \cdot 10^{-6}$ при $n = 2 \dots 10$.

В настоящее время основой встроенного генераторного оборудования элементов сети служат кварцевые генераторы, долговременная стабильность которых может изменяться в широких пределах: $1 \cdot 10^{-6} \dots 1 \cdot 10^{-8}$ в год (эта же ситуация сохранится и в обозримом будущем) [12]. Если срок службы элементов сети сейчас составляет 10 лет, то в реальных условиях относительная частота генераторов ведомых часов в режиме свободных колебаний составит $y_0 = 1 \cdot 10^{-5} \dots 1 \cdot 10^{-8}$. Тогда согласно техническим условиям на оборудование элементов сети с коммутацией пакетов интервал τ_u рассылки пары сообщений **Follow Up** и **Sync** в выражении (6) необходимо уменьшить как минимум в 10 раз, т. е. до $\tau_u = 0,2$ с. Однако в такой грубой оценке не учтена неопределенность, вызванная асимметрией задержек в сети и их флуктуациями, исследование которых выходит за рамки статьи.

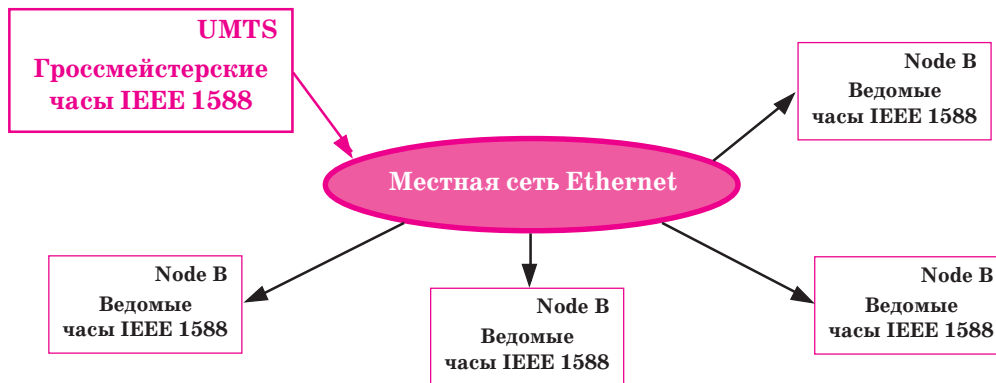


Рис. 7

Литература

1. Гайдаманчук В. А., Савчук А. В. Особенности синхронизации сетей следующего поколения: новые проблемы и новые достижения // Зв'язок.— 2006.— № 4.— С. 4–11.
2. Савчук А. В., Шапошников В. Н., Черняк И. П. Теоретические основы синхронизации текущего времени в телекоммуникациях // Зв'язок.— 2007.— № 3.— С. 1–5.
3. Савчук А. В., Шапошников В. Н., Черняк И. П. Синхронизация текущего времени: протокол сетевого времени // Зв'язок.— 2007.— № 6.— С. 10–15.
4. Одуан К., Гино Б. Измерение времени. Основы GPS.— М.: Техносфера, 2002.— 400 с.
5. Mills D. L. Computer Network Time Synchronization: the Network Time Protocol.— CRC Press, 2006.— 304 p.

6. <http://ieee1588nist.gov/>
7. Dlugy-Hegwer R., Huckeba H. Designing and Testing IEEE 1588 Timing Networks // Symmetricom Timing, Test & Measurement Division.— January 2007.
8. Five Essential Elements of Carrier Class NTP. Symmetricom NGN Series Application Brief // www.symmetricom.com.
9. IEEE 1588 Precision Time Protocol — Frequency Synchronization Over Packet Networks. Symmetricom NGN Series Application Brief // www.symmetricom.com.
10. Eidson J. C. Measurement, Control, and Communication Using IEEE 1588. Springer, 2006.
11. Новое в технике электросвязи. Волоконно-оптические линии на службе времени // Connect.— 2005.— № 1.— С. 2.
12. Levis L. L. An Introduction to frequency Standards // Proceedings of the IEEE.— July 1991.— Vol. 79, № 7.— P. 927–935.

В. С. ОРЛЕНКО, В. О. ХОРОШКО

МЕТОДИКА ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОБМІНУ ІНФОРМАЦІЄЮ В ЗАХИЩЕНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

Одна з особливостей сучасного етапу розроблення та впровадження телекомунікаційних систем (ТКС) в Україні полягає в тому, що при їх створенні доводиться розв'язувати **два доволі суперечливі завдання**. По-перше, необхідно створити ТКС з мінімальною вартістю послуг за їх достатнього асортименту та належної якості. При цьому найчастіше вартість послуг обернено пропорційна до ступеня використання ресурсів, а отже, з метою мінімізації вартості послуг доцільно створювати мережі з колективним використанням ресурсів та відповідною організацією доступу.

Проте наявність у ТКС колективних ресурсів не означає необхідності, а іноді й можливості забезпечення доступності всіх ресурсів для всіх користувачів. Це надважливо в ситуаціях, коли певні ресурси є ресурсами з обмеженим доступом. До того ж здебільшого ресурси цих мереж призначені для несанкціонованого використання та втручання, зокрема й зловмисного, у процесі надання послуг або управління з боку зловмисників. Такі порушення процесів функціонування ТКС еквівалентні заповіданню шкоди власникові мережі, бо призводять до збитків у тій чи іншій формі. Тому при створенні ТКС розробляють певні

правила розмежування доступу. У визначенні цих правил, а також способів і засобів (механізмів) їх реалізації полягає друге завдання, тісно пов'язане з необхідністю створення та впровадження заходів і засобів технічного захисту ресурсів ТКС, насамперед інформації [1].

Водночас конче потрібно чітко бачити й ураховувати суперечності, з якими доводиться стикатися при впровадженні ТКС та застосуванні відповідних заходів і засобів захисту. Ці суперечності пояснюються тим, що навіть найдосконаліші системи технічного, програмного або криптографічного захисту не дають змоги уникнути певних незручностей. Ідеться, зокрема, про таке.

◎ Виникають чималі ускладнення у процесі використання більшості захищених мереж та ресурсів, створюється підвищене навантаження на системні ресурси, через що зростає тривалість виконання операцій обміну інформацією в ТКС і знижується загальна продуктивність таких систем. При цьому **чим надійніший захист, тим більші втрати продуктивності, а отже, й економічні чи інші втрати.**

◎ Істотно зростає вартість захищеної ТКС і, відповідно, — вартість її функціональних послуг.