

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

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СИНХРОНИЗАЦИИ ТЕКУЩЕГО ВРЕМЕНИ В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЯХ

Четвертый Форум по синхронизации в электросвязи ITSF'2006, который проходил в Праге 14–16 ноября 2006 года, собрал вместе проектировщиков сетей связи, операторов и провайдеров, производителей оборудования и разработчиков стандартов. Интерес широкого круга специалистов к проблемам синхронизации имеет под собой вполне конкретную материальную основу: объемы ежегодных продаж оборудования синхронизации во всем мире достигают 200 млн дол. США.

Формирование шкалы

**Всемирного скоординированного времени (UTC):
согласование несоизмеримых интервалов
времени**

В электросвязи все нормы на точность сличения времени и стабильность частоты устанавливаются по отношению к шкале и частоте UTC (Universal Time Coordinated). *Время события — абстрактное понятие, служащее для упорядочения событий в некоторой заданной системе отсчета, называемой шкалой времени. Классический астрономический способ определения точного гражданского, или Всемирного, времени (UT) связан с измерением угла поворота гринвичского меридиана относительно «сферы неподвижных звезд».*

Искусство счета времени заключается в том, чтобы «согласовать» несоизмеримые интервалы времени [1; 2]. Например, UTC представляет собой результат согласования UT с Международным атомным временем (Time Atomic International — TAI). После того как на XIII Генеральной конференции по мерам и весам в 1967 году была принята резолюция, согласно которой *секунда равна 9 192 631 770 периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия 133*, атомная секунда легла в основу TAI с начальной эпохой на 1 января 1968 года. Вскоре, однако, выяснилось, что вращение Земли в 10 000 раз менее равномерно, чем атомное время. Более того, обнаружилось замедление вращения планеты, равное $1,4 \cdot 10^{-3}$ с в сутки за столетие. *В течение года накапливается разность $|UTC - TAI| \cong 1$ с.* По рекомендации Пленарной ассамблеи Международного консультативного комитета по радиосвязи (1970 г.), после того как 1 января 1972 года разность UTC – TAI достигла значения 10 с, *несоизмеримость шкал UTC и TAI компенсируют положительными согласующими секундными*

скачками. Если воспользоваться тем, что движение точки по окружности можно трактовать как гармонические колебания проекции этой точки на ось ординат, то годовое вращение Земли вокруг Солнца допустимо представить в виде гармонического колебания, период которого равен году (рис. 1). Год в шкале TAI (выделено цветом) будет менее чем на 1 с короче, а UTC (жирная линия на рис. 1), представляя собой комбинацию двух шкал — TAI и UT, — обладает высокой точностью и согласуется с вращением Земли вокруг Солнца.

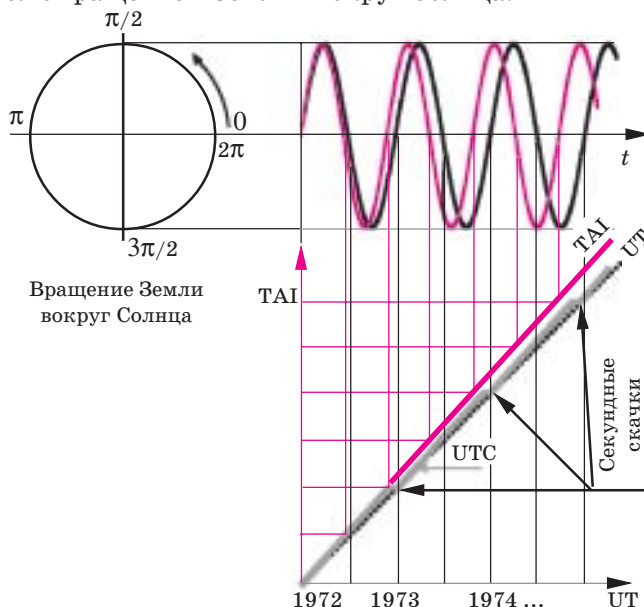


Рис. 1

Шкала UTC все в большей степени подвергается критике в связи с необходимостью вводить секундные скачки (с интервалом 1–2 года) из-за неравномерности вращения нашей планеты. Несмотря на принимаемые меры, к концу 2006 года расхождение между шкалами TAI и UT составило 33 с. Дополнительные сложности вносит и то обстоятельство, что используемая в навигационных системах шкала времени GPS хотя и основана на атомном времени, однако не совпадает ни с TAI, ни с UTC, так как в ней учтены только секундные скачки, вставленные до 1980 года (до ввода GPS в эксплуатацию) [3].

Время и частота в сетях электросвязи

Как известно, для обеспечения целостности и непрерывности доставки информации в транспортной среде SDN развертывают сети (тактовой) синхронизации [4; 5]. В Рекомендации ITU-T G.810 (08/96) [6] понятие синхронизации сети

определяется как «способ распределения *времени и/или частоты*, общих для всех элементов сети», но в этом же нормативном документе рекомендуют не ссылаться на шкалу Всемирного скоординированного *времени UTC*, а использовать термин «*частота UTC*». Этим подчеркивают, что время в сетях синхронизации не имеет значения: достаточно во всех узлах цифровой сети связи любым способом поддерживать на физическом уровне одну и ту же тактовую частоту.

Сети синхронизации современной транспортной среды SDH построены на основе хорошо развитой нормативной базы (Рекомендации ITU-T G.810, G.811–G.813, G.823) и работают по схеме, представленной на рис. 2.

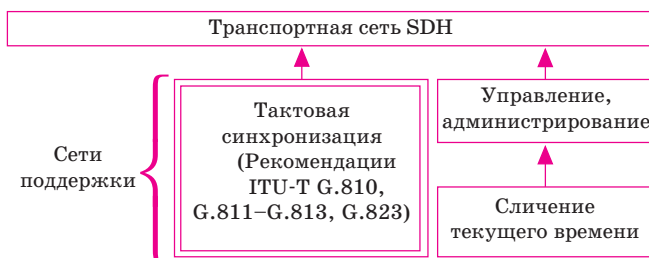


Рис. 2

В то же время одним из важнейших требований к системам управления современных сетей электросвязи является поддержание в компьютерной среде *единого времени*, согласованного со шкалой *UTC*. Это необходимо для точной фиксации событий и аварийных ситуаций в системах технического обслуживания и управления (а также событий в биллинговых системах), для чего нужны совсем другие сети синхронизации. Речь идет о хорошо известной задаче «привязки шкал времени территориально разнесенных часов», или «сличения времени» [7], а эта проблема пока относится к нормативному полю метрологии [8].

Будущее отрасли связи, как полагают, принадлежит «сетям следующего поколения» (NGN) [9]. Базой NGN служит конвергентная транспортная среда на основе коммутации пакетов, главным преимуществом которой считалась возможность обеспечить целостность и непрерывность доставки информации без синхронизации на физическом уровне (более того, коммутация пакетов разрушает тактовую синхронизацию сообщения). Однако уже на этапе разработки нормативной базы NGN выяснилось, что без *синхронизации и частоты, и времени* поддерживать надлежащее качество предоставления услуг в NGN невозможно [10]. Так или иначе, *в настоящее время мы стоим на пороге создания новых стандартов по синхронизации в области электросвязи на основе альтернативных подходов*. Решение о том, какой из них будет преобладать в сетях NGN, готовят два международных органа стандарти-

зации — ITU-T и IEEE. Для этого в ITU-T дорабатывают Рекомендацию ITU-T G.8261 и разрабатывают новые Рекомендации (G.paslock и G.pasmode), в которых должны быть охвачены все аспекты синхронизации в среде с коммутацией пакетов:

- на уровне 1 (физическом) — «синхронный» Ethernet;
- на уровне 2 — внутриканальные способы восстановления тактовой частоты относительным и адаптивным способами.

Предлагается также приспособить для электросвязи стандарт IEEE 1588, первоначально разработанный для синхронизации роботов на сборочных предприятиях. В любом случае предусматривается использовать выделенные каналы в сетях NGN для синхронизации и частоты, и времени (как показано на рис. 3). Задача разработчиков новых стандартов состоит в том, чтобы обобщить этот опыт на основе достижений в области метрологии [7; 8; 12] и практики использования протокола сетевого времени NTP в сети Интернет [11].

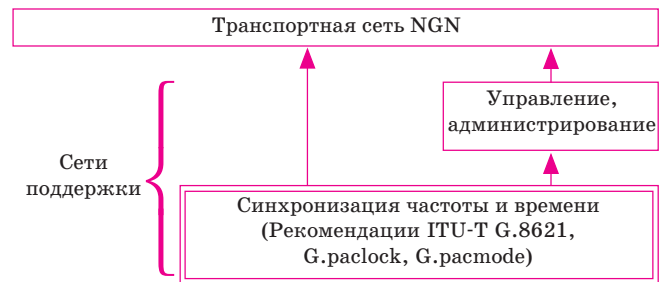


Рис. 3

Подстройка частоты на основе дистанционного сличения шкал времени

Рассмотрим систему сличения времени, состоящую из компьютерных часов, которые имеются в двух пунктах, соединенных системой передачи. Компьютерные часы (рис. 4) содержат генератор с кварцевой стабилизацией и подключенный к его выходу счетчик времени, показания которого передаются в процессор. Показания часов или содержимое счетчика в любой данный момент времени называют *эпохой* или *моментом* и фиксируют в виде *метки времени* этой эпохи. В общем случае эпоха (одно из значений этого слова — «период дискретизации») не непрерывна и зависит от емкости счетчика.

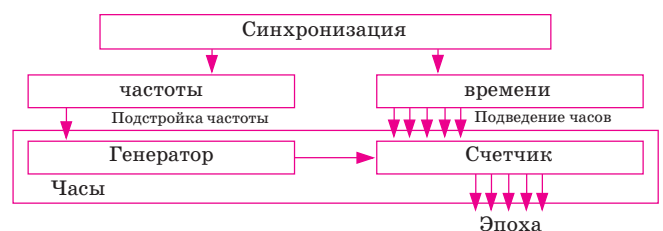


Рис. 4

Гармонический сигнал на выходе генератора имеет вид [12; 13]

$$s(t) = A \sin[\Phi(t)], \quad (1)$$

где A — постоянная амплитуда; $\Phi(t)$ — мгновенное значение фазы,

$$\Phi(t) = 2\pi\nu_{\text{ном}}t + \varphi(t); \quad (2)$$

$\nu_{\text{ном}}$ — номинальное значение частоты ν ; $\varphi(t)$ — случайная составляющая отклонений фазы.

Мгновенная частота (скорость изменения мгновенного значения фазы) описывается выражением

$$\nu(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\Phi(t)}{dt} = \nu_{\text{ном}} + \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi(t)}{dt}. \quad (3)$$

Каждый раз, когда мгновенное значение фазы $\Phi(t)$ увеличивается на 2π , часы показывают приращение времени на $1/\nu_{\text{ном}} = T_{\text{ном}}$, где $T_{\text{ном}}$ — период колебаний номинальной частоты.

Сдвиг частоты $\nu(t) - \nu_{\text{ном}}$ характеризуется относительной частотой

$$y(t) = \frac{\nu(t) - \nu_{\text{ном}}}{\nu_{\text{ном}}} = \left(\nu_{\text{ном}} + \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi(t)}{dt} - \nu_{\text{ном}} \right) / \nu_{\text{ном}} = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi(t)}{dt}. \quad (4)$$

Функция погрешности времени $x(t)$, определяемая как интеграл от $y(t)$, т. е.

$$x(t) = \int_0^t y(t) dt + S_t, \quad (5)$$

равна разности между периодом колебаний $T(t)$ на выходе генератора и периодом колебаний номинальной частоты $T_{\text{ном}}(t)$:

$$x(t) = T(t) - T_{\text{ном}}(t). \quad (6)$$

Если ход местных часов должен быть согласован с номинальной шкалой времени от удаленного источника, то следует предусмотреть определенные средства регулярных поправок времени и подстроек частоты местных часов. *Синхронизировать частоту* — значит подстраивать частоту генератора так, чтобы она была одинаковой для всех часов, *синхронизировать время* — согласовывать показания часов в определенные эпохи с номинальной шкалой времени (как правило, UTC), а *синхронизировать часы* — значит синхронизировать и частоту, и время.

Рассмотрим задачу синхронизации частоты в системе сличения шкал H и N времени двух часов, которые разнесены в пространстве. Пусть частота ν_H шкалы H времени будет меньше частоты ν_N шкалы N времени; тогда линия шкалы H будет иметь меньший наклон (рис. 5). Для простоты полагаем, что H и N имеют общее начало, а ν_H и ν_N не зависят от времени; при этом шкалы времени изображаются в виде прямых, исходящих из начала координат (см. рис. 5).

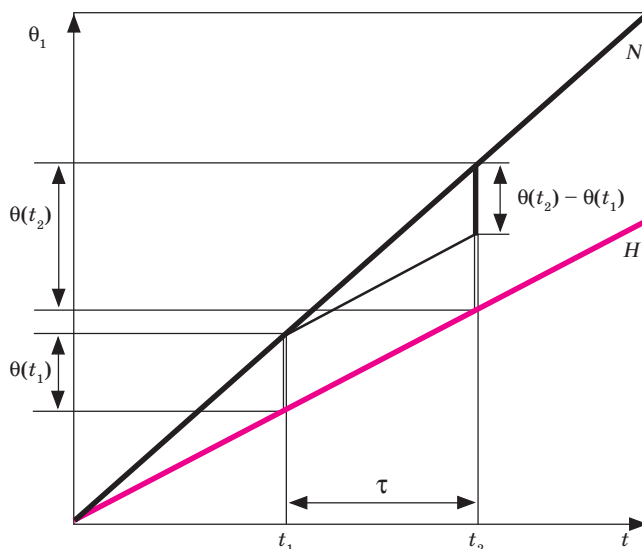


Рис. 5

Цель дистанционного сличения времени состоит в том, чтобы вычислить расхождение $\theta(t)$ шкал H и N , например описанным далее встречным методом. Расхождение шкал времени $\pm\theta$ — алгебраическая величина, равная разности между показаниями времени двух часов. По результатам двух сличений в последовательные моменты времени t_1 и t_2 можно вычислить разность относительных частот генераторов $y_H = (\nu_H - \nu_{\text{ном}}) / \nu_{\text{ном}}$ и $y_N = (\nu_N - \nu_{\text{ном}}) / \nu_{\text{ном}}$ по формуле

$$y_H - y_N = \frac{\theta(t_2) - \theta(t_1)}{t_2 - t_1}. \quad (7)$$

В принятом линейном приближении интервал $t_2 - t_1 = \tau$ можно назвать интервалом усреднения.

Обычно одну из двух шкал времени считают эталонной, а ее частоту — номинальной; в данном случае будем полагать, что $y_N = 0$, а y_H обозначим просто y . Тогда (7) можно переписать в виде

$$y = \Delta\theta(\tau) / \tau, \quad (8)$$

где $\Delta\theta(\tau)$ — приращение расхождения шкал времени на интервале усреднения τ , $\Delta\theta(\tau) = \theta(t_2) - \theta(t_1)$; y — относительная частота генератора местных часов.

Данный пример свидетельствует о том, что в системах сличения времени есть все для синхронизации по частоте (синхронизации). В общем случае, если имеет место синхронизация текущего времени, для определения относительного сдвига мгновенной частоты $y(t)$ местного генератора достаточно продифференцировать $x(t)$:

$$\frac{dx(t)}{dt} = \frac{d}{dt} \int_0^t y(t) dt + S_t = y(t). \quad (9)$$

Используя соотношение (6), при линейной аппроксимации $x(t)$ получаем

$$y(t) \cong x(t) / T_{\text{ном}}. \quad (10)$$

Встречный метод дистанционного сличения шкал времени

В основе наиболее известных протоколов — сетевого и прецизионного времени (соответственно NTP и PTP IEEE 1588) — лежит так называемый встречный метод дистанционного сличения шкал времени.

Две шкалы N и H времени разнесены в пространстве часов с индивидуальным началом отсчета для каждой из них (соответственно n и h) показаны на рис. 6.

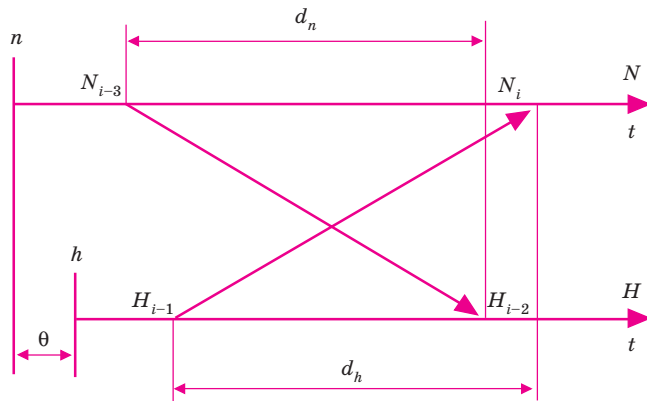


Рис. 6

Пусть шкала N времени будет номинальной, а ее начало n — общим для системы сличения времени, т. е. часы в этом пункте считаем образцовыми. В данном случае местные часы отстают от образцовых:

$$n = h + \theta. \tag{11}$$

При реализации встречного метода сличения времени происходит обмен метками времени по двустороннему каналу связи между пунктами сличения [4], в результате чего в пункте размещения часов со шкалой H времени становятся известны четыре метки времени:

- N_{i-3}, N_i — показания образцовых часов в «номинальной» шкале времени в момент соответственно передачи прямого и приема встречного сообщения;

- H_{i-2}, H_{i-1} — показания местных часов в момент соответственно приема прямого и передачи встречного сообщения.

Наличие четырех меток времени в пункте размещения местных часов позволяет составить систему из двух уравнений:

$$\begin{cases} H_{i-2} = N_{i-3} - \theta + \frac{d}{2}; \\ N_i = H_{i-1} + \theta + \frac{d}{2}, \end{cases} \tag{12}$$

где неизвестными являются расхождение шкал θ времени и двусторонняя задержка передачи d .

Важно отметить, что в (12) принято предположение о том, что односторонние задержки прямой и обратной передачи одинаковы.

Решение системы уравнений (12) позволяет вычислить:

расхождение шкал времени

$$\theta = \frac{(N_i + N_{i-3}) - (H_{i-1} + H_{i-2})}{2}; \tag{13}$$

двустороннюю задержку передачи

$$d = (N_i - N_{i-3}) - (H_{i-1} - H_{i-2}). \tag{14}$$

Если ход местных часов должен быть согласован с номинальной шкалой времени от удаленного источника, следует предусмотреть определенные средства поправок времени и подстроек частоты местных часов, регулярных настолько, чтобы значение расхождения θ не превышало допустимых пределов $\theta_- < \theta < \theta_+$. В принципе система сличения времени двух разнесенных в пространстве часов может работать по меньшей мере в трех режимах:

- **синхронизации времени** при условии, что генераторы часов синхронизированы по частоте ($v_H = v_{nom}$), как показано на рис. 7, а, где t_1, t_2, \dots — моменты регулярного сличения времени; θ_0 — начальное расхождение часов; $\theta_1, \theta_2, \dots$ — расхождения часов после последовательных сличений; τ_R — интервал регулировки местных часов, выбираемый исходя из условия выполнения **требования монотонности** (с целью гарантировать монотонное увеличение времени в показаниях местных часов, чтобы они никогда не «пошли назад»);

- **синхронизации времени** при условии, что частота генератора местных часов не равна номинальной ($v_H \neq v_{nom}$) (на рис. 7, б показан случай, когда $v_H > v_{nom}$);

- **синхронизации часов**, т. е. сличения шкал времени с одновременной подстройкой частоты генератора местных часов.

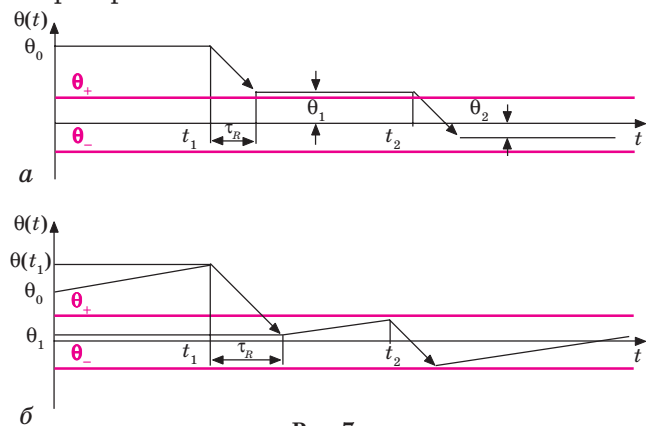


Рис. 7

Первый режим может быть реализован в узлах транспортной сети SDH на основе существующей тактовой синхронизации, которая обеспечивает в каждом узле среднюю относительную частоту $1 \cdot 10^{-11}$ [14]. Погрешность сличений време-

ни, проведенных с помощью специально разработанной аппаратуры на магистральной сети ЗАО «Компания ТрансТелеКом», составила не более 4,4 нс на расстояниях свыше 18 000 км [15]. Этот результат значительно превосходит точность синхронизации сетевого времени на основе наиболее распространенных протоколов (работающих, как правило, во втором режиме) для сетей с коммутацией пакетов. Это протоколы сетевого и прецизионного времени — NTP и PTP (см. таблицу).

**Точность синхронизации сетевого времени
протоколами NTP и PTP IEEE 1588**

Протокол	Сеть с коммутацией пакетов	Точность синхронизации, с
NTP	Локальная	$(1...10)10^{-3}$
	Региональная	$(1...20)10^{-3}$
	Глобальная (Интернет)	$(10...100)10^{-3}$
	Производственная *	$(1...25)10^{-6}$
PTP IEEE 1588	Локальная (Ethernet)	$(20...100)10^{-9}$

* Результаты получены в экспериментальной корпоративной сети Ethernet, состоящей из единственного специализированного коммутатора со встроенным сервером времени, синхронизированным от GPS, и аппаратными функциями предоставления меток времени при обработке протоколов нижнего уровня в контроллере Ethernet. Кроме того, в коммутаторе был задействован механизм присвоения приоритетов IEEE 802.1p пакетам NTP для обеспечения гарантированного значения задержки при передаче данных в реальном времени. Контроллер Ethernet клиента также был оборудован аппаратными функциями предоставления меток времени [16].

Приведенные в таблице данные можно использовать при оценке пригодности протоколов в их современном состоянии для того, чтобы в третьем режиме подстраивать тактовую частоту элементов сети NGN на основе дистанционного сличения шкал времени. Оценить достижимую точность восстановленной тактовой частоты можно с помощью (8). Результаты расчетов показаны на рис. 8. Очевидно, что *реализовать синхронизацию тактовой частоты в сетях с коммутацией пакетов, используя NTP, на практике не удастся, так как даже на интервале усреднения $\tau > 10$ сут невозможно получить нестабильность частоты на уровне качества первичного устройства синхронизации (PRC) — $1 \cdot 10^{-11}$. В то же время PTP позволяет достичь этого на интервале усреднения $\tau < 1$ сут. Такое решение в сочетании с рубидиевым стандартом частоты (суточный дрейф которого не превышает $1 \cdot 10^{-11}$) может оказаться экономически оправданной альтернативой современному оборудованию PRC в сетях NGN.*

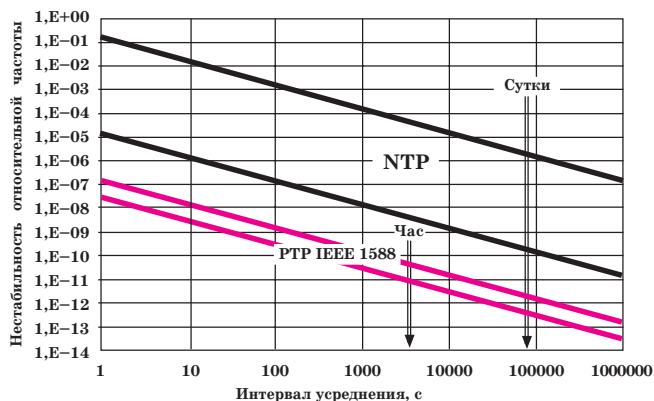


Рис. 8

Литература

1. *The Science of Timekeeping. HP Application Note 1289. www.symmetric.com.*
2. Савчук А. Вначале было... время // Телеком. Коммуникации и сети.— 2004.— № 3.— С. 46–52.
3. Benson M. Just Hand on a Second // *The New York Times*.— 2005.— November, 5.
4. Брени С. Синхронизация цифровых сетей связи.— М.: Мир, 2003.
5. Концепція побудови та структурна схема мережі синхронізації України/ УНДІЗ-ДКЗІУ.— Київ, 03.12.01. Затверджено та введено в дію 2 вересня 2002 р.
6. ITU-T Recommendation G.810 (08/96). *Definitions and terminology for synchronization networks.*
7. Кащеев Б. Л., Коваль Ю. О., Горбач В. И., Бондарь Б. Г. *Метеоры сегодня*.— К.: Техника, 1996.
8. Одуан К., Гино Б. *Измерение времени. Основы GPS*.— М.: Техносфера, 2002.
9. Гайдаманчук В. А., Савчук А. В. Особенности синхронизации сетей следующего поколения: новые проблемы и новые достижения // *Зв'язок*.— 2006.— № 4.— С. 4–11.
10. *The Vital Role of Timing and Synchronization in Next Generation Networks//ATIS TechThink Webinar*.— 2006.— November, 9.
11. Mills D. L. *Modeling and analysis of computer network clocks//Electrical Engineering Department Report 92-5-2, University of Delaware, May 1992*.— 29 p.
12. ITU Handbook. *Selection and Use of Precise Frequency and Time Systems/Radiocommunication Bureau*, 1997.
13. Petley B. W. *Time and frequency in fundamental metrology//Proceedings of the IEEE*.— 1991.— Vol. 79, № 7.— P. 1070–1076.
14. Рыжков А. В. *Частота и время в инфокоммуникациях XXI века*.— М.: Международная академия связи, 2006.
15. Новое в технике электросвязи. Волоконно-оптические линии на службе времени // *Connect*.— 2005.— №1.— С. 2.
16. *Время то же, но место другое. Точная синхронизация времени для задач автоматизации //АБВ Ревю*.— 2003.— № 2.— С. 9–14.