

код із відносною швидкістю $\frac{3}{4}$, то для передавання всіх українських програм зайнято таку смугу частот:

$$F = 81 \cdot 4 \cdot \frac{3}{4} \alpha = 330 \text{ МГц},$$

де $\alpha = 1,2 \dots 1,35$ — прийнятий у стандарті коефіцієнт розширення смуги частот.

Вважатимемо, що з 2002 року в ССМ діють тарифи близько 4,2 тис. дол. за 1 МГц смуги частот [5]. Тоді можна оцінити загальний обсяг виплат стороннім операторам супутникового зв'язку тільки за поточний рік. Дістанемо, що тільки в ССМ через виплати за річну оренду економіка України втратить близько $S_{\text{ССМ}} = 330 \cdot 4,2 \cdot 12 = 16\,600$ тис. дол. Відштовхуючись від дати (2000 рік) початку запланованого функціонування НССЗ із ретранслятором «Либідь» з урахуванням коефіцієнта приросту потреб у супутникових каналах [5], доходимо висновку, що до кінця 2007 року втрати економіки України мали становити близько в 50 млн дол., тобто до кінця 2008 року за оренду довелося сплатити суму, що досягає 25–30% вартості створення НССЗ. Навіть якщо надалі попит українських користувачів на супутникові канали не зростатимуть (а це неможливо), то й тоді за період гарантованої роботи супутника (15 років) виплати стороннім операторам за користування каналами досягнуть 250 млн дол., що вдвічі перевищує вартість (із запуском) малого КА. Додамо, що експлуатація національного КА забезпечує певний прибуток на тлі тільки втрат за користування сторонніми ресурсами.

* * *

Супутниковий зв'язок у світі планомірно розвивається, збільшується кількість телекомунікаційних КА, з'являються нові ССЗ, нові оператори. Перелік країн, що мають НССЗ, поповнюється.

Супутниковий зв'язок загалом і, особливо, супутникове мовлення є прибутковою галуззю телекомунікацій із високим рівнем проросту доходів.

Ступінь використання супутникових каналів українськими операторами та провайдерами досягла вже тієї межі, що потребує впровадження НССЗ, як це зумовлено завданнями, що їм поставлено державними актами.

Створення НССЗ економічно більш доцільне, ніж оренда ресурсів супутникових каналів.

При побудові НССЗ необхідно орієнтуватися на сучасні технології формування сигналів (DVB-S2) та принципи побудови мереж. Обладнання національного ретранслятора та земної інфраструктури має розроблятися з урахуванням вимог новітніх технологій до параметрів.

Література

1. Мельник А. М. Современный уровень развития спутниковых систем телекоммуникаций и внедрение их в Украине // Зв'язок. — 2001. — № 4–6.
2. Про заходи щодо дальшого розвитку космічної галузі України // Указ Президента України від 10.06.05 № 993/2005.
3. Про заходи щодо створення національної супутникової системи зв'язку // Постанова КМ України від 03.05.07 № 696.
4. Про схвалення Концепції Загальнодержавної космічної програми на 2007–2011 роки // Розпорядження КМ України від 31.05.2006 № 306-р.
5. Мельник А. М., Михайлов Н. К., Макаров А. Л., Дзюин В. К. Нужна ли Украине национальная система спутниковой связи? // Зв'язок. — 2005. — № 5.
6. Мельник А. М., Михайлов Н. К. Состояние и перспективы внедрения новых технологий спутникового вещания // Зв'язок. — 2006. — № 8.
7. Мельник А. М., Голощапов В. А., Півнюк О. В., Богданов О. М. Принципы построения сетей цифрового вещания из использованием технологий спутниковых телекоммуникаций // Праці УНДІРТ. — 2008. — № 2 (54)–3 (55).
8. Быструшкин К., Степаненко Л. Мы ждем перемен // Салон Audio Video. — 2006. — № 3.
9. Мельник А. М. Технологии та методи побудови систем доступу з використанням супутникових каналів // Праці УНДІРТ. — 2006. — № 1 (45) – 2 (46).
10. Річний звіт Національної комісії регулювання зв'язку. — Київ, 2008.
11. Горбач И. В., Макаров А. А. Национальная система спутниковой связи в информационном пространстве Украины // Праці УНДІРТ. — 2008. — № 2 (54)–3 (55).

А. В. САВЧУК

СИНХРОНИЗАЦИЯ В СЕТЯХ NGN: «ТУННЕЛЬНЫЙ ПЕРЕХОД» ТАКТОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ ЧЕРЕЗ СЕТИ С КОММУТАЦИЕЙ ПАКЕТОВ

Развитие традиционных сетей электросвязи, основой которых служит транспортная сеть SDH, в направлении сетей следующего поколения (NGN) обусловило необходимость пересмотра международных нормативных документов по синхронизации [1]. Далее предложено углубленное рассмотрение темы серии статей [2–4], предназначенных для инженеров электросвязи.

В период замены транспортной среды SDH на NGN операторы сетей электросвязи и провайдеры услуг стремятся сохранить традиционное качество обслуживания, оцениваемое эксплуатационной готовностью в 99,999%. Проблема состоит в том, что NGN работают на основе протокола

IP, а он обеспечивает лишь «по возможности наилучшее» («best effort») качество обслуживания, когда о «пяти девятках» речь не идет. Главное преимущество сетей с коммутацией пакетов по сравнению с коммутацией каналов — более высокая производительность. Кроме того, для целостности и непрерывности передачи информации в транспортной среде с коммутацией пакетов не нужна сеть тактовой синхронизации. Однако эту особенность преимуществом уже не называют. Несколько лет назад сети ATM так и не получили статус сетей общего пользования, в частности потому, что не удалось обеспечить приемлемое качество предоставления услуг реального времени. Причина — разрушение тактовой синхронизации в транспортной среде с коммутацией пакетов. Чтобы такого не произошло на следующем

витке розвитку сетей с коммутацией пакетов, международные органы стандартизации решают задачу синхронизации на новом уровне. Производители оборудования, операторы сетей электро-связи и специалисты по синхронизации пришли к общему выводу о том, что для сохранения традиционного качества обслуживания *синхронизация* в NGN жизненно необходима, причем синхронизация не только *частоты*, но и *времени* [5]. В Рекомендации G.8261 ITU-T перечислены известные способы решения этих задач в отдельности, но вопрос о том, как их скомбинировать на практике, чтобы одновременно удовлетворить разработчиков оборудования, операторов сетей и абонентов, остается открытым.

Способы синхронизации, рассмотренные в Рекомендации ITU-T G.8261

Для синхронизации частоты и времени в NGN предназначены «синхронный» (на физическом уровне) Ethernet и протокол сетевого времени операторского класса (сNTP). Вместе с протоколом прецизионного времени (PTPv2) стандарта IEEE 1588 они служат основой разрабатываемых международных рекомендаций по синхронизации NGN, которые должны составить нормативную базу для промышленности средств связи [1; 7]. В сетях с коммутацией пакетов в принципе возможны три способа синхронизации времени и частоты:

1) в виде отдельных сети тактовой синхронизации и системы сличения времени (частота и время равноправны);

2) сличение времени на основе тактовой частоты существующей сети синхронизации (частота первична, время вторично);

3) подстройка частоты на основе системы сличения времени (время первично, частота вторична).

Далее рассмотрен третий способ. Его называют «*туннельным переходом*» тактовой частоты через сеть с коммутацией пакетов, подчеркивая, что нет необходимости передавать ее на физическом уровне информационного сигнала. Неопределенность сличения времени по протоколу IEEE 1588 достаточно мала для того, чтобы использовать его для подстройки частоты с неопределенностью, сравнимой с долговременной точностью частоты в «классической» сети синхронизации [4].

Локальная природа времени — причина синхронизации компьютерных часов

Каждый элемент сети содержит специализированный компьютер, предназначенный для выполнения конкретных функций. Компьютер ождествляют с вычислительным процессом,

понимаемым как последовательность событий, причем полагают, что событие — это наименьшее возможное изменение состояния компьютера. Время определяют как *непространственную* непрерывность, измеряемую событиями, которые следуют друг за другом из прошлого в будущее.

В этом определении подчеркивают, что измерение времени и измерение пространства по своей природе различны. В отличие от твердых тел, геометрические размеры которых сохраняются в пространстве, время хранить нельзя. Возможен лишь счет времени для того, чтобы проследить причинную связь событий. Математической интерпретацией обычного представления о ходе времени служат числа натурального ряда. А это означает, что события в отдельном компьютере можно упорядочить полностью с помощью *локальных* часов в виде простого счетчика событий без привязки к глобальному времени.

Вся сеть — это распределенная система в виде множества отдельных вычислительных процессов, которые разнесены в пространстве, протекают независимо друг от друга, но обмениваются между собой сообщениями. При этом важно, что прием и передача сообщения в отдельном элементе сети подпадают под определение события. Пары событий, которые представляют собой прием и передачу одного и того же сообщения, объединяют отдельные процессы в целостную систему. Рассмотрим пространственно-временную диаграмму асинхронной распределенной системы, где в каждом отдельном вычислительном процессе P_1 , P_2 или P_3 применяют собственные часы в виде счетчика событий (рис. 1). Содержимое счетчика образует местную шкалу времени соответственно t_1 , t_2 или t_3 . Так как время имеет локальную природу, то в такой системе иногда невозможно определить, какое из двух событий произошло первым. Например, при передаче сообщений M_{32} и M_{21} нарушения принципа причинности не происходит, так как время приема каждого из них больше времени передачи. А вот о сообщении M_{12} этого сказать нельзя: отправлено оно из узла P_1 на 10-й секунде, а принято в узле P_2 на 9-й секунде. Поскольку в нашем мире невозможно принять сообщение раньше, чем оно было передано, то оператору (или компьютеру) узла P_2 ничего не остается, как признать его недействительным. Это же относится к сообщению M_{23} , в котором метка времени приема свидетельствует о том, что принято сообщение (на 7-й секунде) раньше, чем было передано (на 10-й секунде). В результате происходит разрушение целостности распределенной системы.

К чему это приведет на практике, можно увидеть на примере системы управления сетью. Оператор работает с сообщениями, причем делит

всю их совокупность на пары событий: причина и следствие, а на основании причинных связей на множестве событий может, например, локализовать аварию в сети. Но если целостность системы нарушена, то по меткам времени, проставленным на сообщении при передаче и приеме, может оказаться, что оно принято до того, как было передано. В результате оператор не в состоянии восстановить причинную связь событий. Подобное нарушение принципа причинности — сущее бедствие для распределенных вычислительных систем. **Поэтому прикладные программы в компьютерах распределенных вычислительных систем работают в глобальном времени, т. е. локальные часы во всех компьютерах синхронизированы. Синхронизация времени не самоцель, а средство сохранения причинно-следственных связей в распределенных вычислительных системах.**

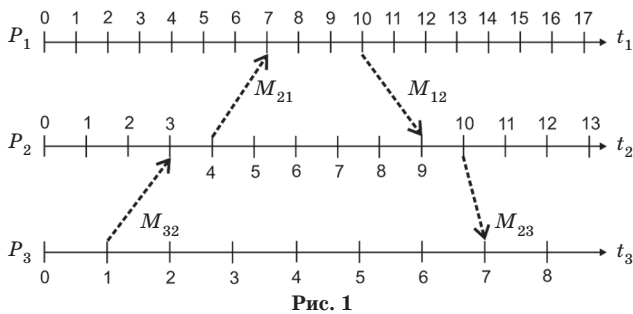


Рис. 1

Счет времени в распределенных вычислительных системах: логическое время и физические часы

Протоколы сетевого и прецизионного времени NTP [7] и RTP [8] позволяют обеспечить сличение времени с точностью, которая зависит от масштаба сети (WAN, MAN или LAN) [4]. Так как этого достигают ценой немалых затрат, то возникает вопрос: можно ли сохранить причинно-следственные связи в таких системах без синхронизации локальных часов? Ответ может показаться неожиданным: то, что все процессы должны быть точно согласованы во времени, — несущественно. **Важно, чтобы они были согласованы с порядком, в котором происходят события.**

Распределенная вычислительная система — это компьютеры, соединенные каналами связи. И поскольку не существует систем передачи, задержкой распространения в которых можно было бы пренебречь по сравнению со временем, разделяющим события, всегда можно утверждать, что **передано сообщение безусловно раньше, чем оно было принято, — как минимум на значение задержки распространения.** На этом основании Лампорт [9] предложил логические часы, что при всей своей простоте оказалось важным этапом в понимании природы времени.

Логическое время — это способ, позволяющий сохранить причинность событий в распределенных системах на основании метки времени в принятом сообщении. Правило поведения логических часов иллюстрирует рис. 2: если метка времени передачи сообщения M_{21} (4) меньше метки времени последнего события в процессе P_1 (6), то логические часы получают приращение на 1 ($6 + 1 = 7$). В противном случае, например при передаче сообщения M_{12} , часы процесса P_2 (10) подводят (**только вперед!**) до значения, превышающего на 1 метку времени передачи ($10 + 1 = 11$). Логические часы — это просто асинхронные счетчики событий. Речь идет не о синхронизации, а о прямом упорядочении событий.

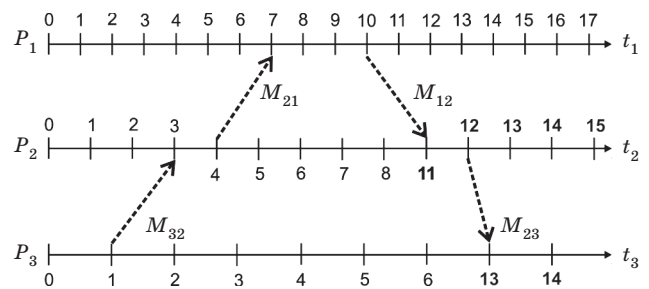


Рис. 2

Понятие логического времени подсказывает идею «туннельного перехода»: оказывается **часы можно подводить, не думая о частоте их генератора.** И если разность показаний удаленных (ведущих) и местных (ведомых) часов $\theta(t)$ — дифференцируемая функция времени, то на приеме можно обойтись без передачи тактовой частоты на физическом уровне. Достаточно подстраивать ее на величину $y(t)$, равную производной расхождения времени $\theta(t)$ [2; 4]:

$$y(t) = \frac{d\theta(t)}{d(t)}$$

Однако **дифференцируемость — свойство не логического, а физического времени** [6]. Основой непрерывного сличения времени **физических** компьютерных часов служит система подстройки частоты их генератора, которая не имеет отношения к логике RTP и остается вне области применения стандарта IEEE 1588. Целесообразно разграничить логику протокола для оценки неопределенности сличения времени и параметры системы подстройки для оценки неопределенности частоты.

Неопределенность сличения времени по протоколу RTP

По протоколу RTP на **интервале синхронизации** $\tau_{\text{и}} = 2$ с ведущие часы передают сообщения Sync и Follow_Up в режиме массовой рассылки (multicast). Как показано на рис. 3 (где t_{UTS} —

всемирное скоординированное время), передача этих регулярных сообщений занимает $\frac{3}{2}\Delta\tau$ секунд в начале 2-секундного интервала τ_n , причем $\Delta\tau = \frac{\tau_n}{18} = \frac{2}{18} \text{ с} \cong 111 \text{ мс}$. На основании времени T_{1n} приема сообщения Sync и времени его передачи T_{2n} , которое содержится в сообщении Follow_Up, ведомые часы вычисляют **расхождение времени** $\theta(n\tau_n)$ [4] с точностью до задержки передачи d :

$$\theta(n\tau_n) = (T_{2n} - T_{1n}) - d, \quad (1)$$

где n — порядковый номер интервала синхронизации. Вычислительная нагрузка ведущих часов при обработке пары сообщений Sync и Follow_Up, предназначенных всем ведомым часам, не зависит от их числа.

Этого нельзя сказать о паре сообщений Delay_Req и Delay_Resp, содержащих метки времени T_{3n} и T_{4n} , необходимые для вычисления поправки на задержку передачи d :

$$d = \frac{(T_{2n} - T_{1n}) + (T_{4n} - T_{3n})}{2}. \quad (2)$$

Связанная с этим вычислительная нагрузка прямо пропорциональна числу ведомых часов и в течение оставшихся $(\tau_n - \frac{3}{2}\Delta\tau)$ секунд на том же интервале τ_n процессор ведущих часов не в состоянии обменяться сообщениями Delay_Req и Delay_Resp со всеми ведомыми часами в отдельности. Чтобы не перегружать процессор, вводят **процедуру рандомизации**, которая позволяет ведомым часам обращаться к ведущим с запросом Delay_Req не на каждом интервале τ_n . Интервал рандомизации τ_{R_j} охватывает несколько интервалов синхронизации:

$$\tau_{R_j} = R_j \tau_n,$$

где R_j — случайное целое число, выбранное из множества $2 < R_j < 30$. Другими словами, ведомые часы обращаются к ведущим с запросом Delay_Req самое меньшее через 2 и самое большее — через 30 интервалов τ_n . На последнем из них остается подынтервал $\tau_n - \frac{3}{2}\Delta\tau = 2 - 66 = 1,834 \text{ с}$,

который свободен после пары регулярных сообщений Sync и Follow_Up. Его распределяют также случайным образом между ведомыми часами, которым пришло время обратиться к процессору ведущих часов. Как показано на рис. 3, по завершении интервала рандомизации τ_{R_j} ведомые часы отправляют запрос Delay_Req спустя $Q_j\Delta\tau$ с после приема первого очередного сообщения Sync, где Q_j — случайное целое число, выбранное для τ_{R_j} из множества $2 < Q_j < 18$. Эффект рандомизации достигается благодаря тому, что случайные числа R_j и Q_j выбирают отдельно и независимо для всех ведомых часов. Для того чтобы получить оценку неопределенности сличения времени по протоколу РТР, воспользуемся качественной иллюстрацией в виде диаграммы двумерного времени (рис. 4), где t — «истинное» время; $C(t)$ — показания часов. Идеальным часам соответствует прямая $dC(t)/dt = 1$, в то время как физические часы, допуск на частоту генератора которых составляет y_0 , будут «расходиться» с идеальными на $\pm \arctg y_0$. Для конкретности на рис. 4 показан случай, когда их частота меньше частоты идеальных часов.

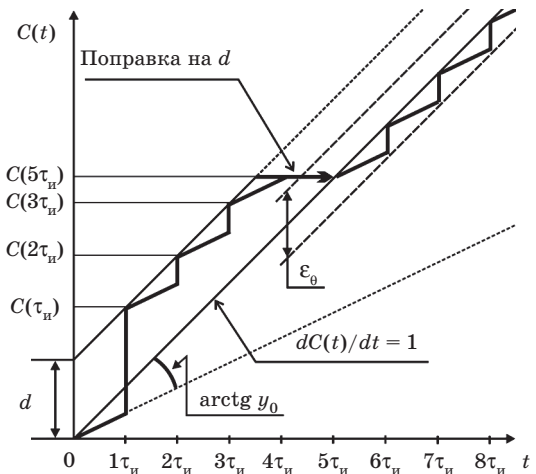


Рис. 4

После обработки сообщений Sync и Follow_Up на первом интервале τ_n вычисляют расхождение времени по формуле (1) и подводят ведомые часы на величину $(T_{21} - T_{11}) = \theta(\tau_n) + d$ так,

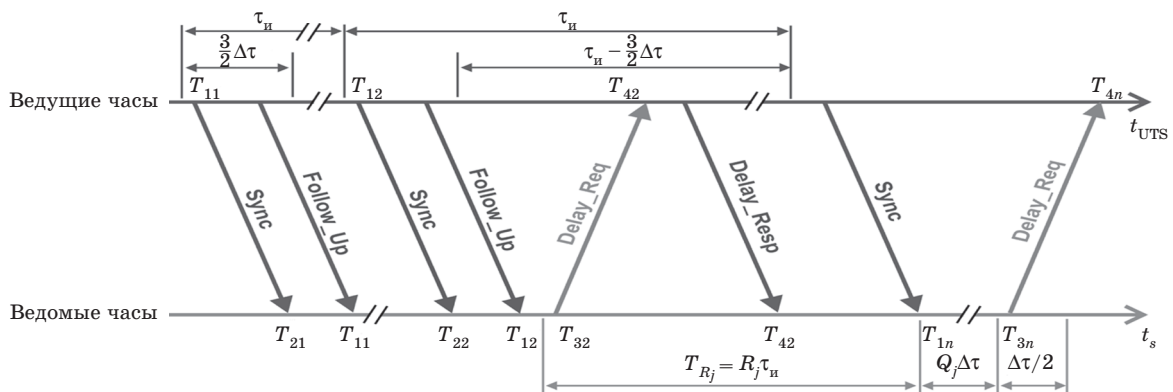


Рис. 3

чтобы они показывали время $C(\tau_n)$. Затем на интервале $2\tau_n$ ведомые часы отстают на $y_0\tau_n$, после чего их вновь подводят вперед. После завершения интервала рандомизации (в нашем случае $R_1 = 4$) на интервале $5\tau_n$ вводят поправку на одностороннюю задержку d , вычисленную по формуле (2). В результате ведомые часы показывают время $C(5\tau_n)$, которое приблизительно совпадает со временем идеальных часов. (Для простоты подведение времени показано скачкообразным. На самом деле для того, чтобы сохранить монотонность хода ведомых часов, его можно лишь ускорять или замедлять [7].)

После этого ведомые часы работают в установленном режиме с неопределенностью сличения времени ε_θ , которая будет иметь систематические и случайные составляющие. Случайные составляющие — это флуктуации и несимметрия задержек в транспортной среде с коммутацией пакетов, а также долговременные блуждания частоты генератора. К систематическим составляющим относятся конечная разрешающая способность часов ρ (полагаем, что частота f_C генератора у ведомых и ведущих часов одинакова, и тогда

$\rho = \frac{1}{f_C}$) и относительная частота генератора ведомых часов. Заметим, что ведущие часы можно считать идеальными с относительной частотой, равной нулю, так как их обычно синхронизируют по UTC. В любом случае они задают системное время с неопределенностью частоты своего генератора. Если воспользоваться методикой [7] оценки систематических составляющих применительно к РТР, то можно показать, что максимальная неопределенность сличения времени

$$\varepsilon_\theta = \rho + \frac{1}{2}y_0R_{\max}\tau_n, \quad (3)$$

где ρ — разрешающая способность часов; y_0 — относительная частота генератора ведомых часов; $R_{\max} = 30$ — максимальное значение R_j ; τ_n — интервал синхронизации.

Неопределенность подстройки частоты

Один из возможных вариантов подстройки частоты рассмотрен в [4]. Система автоматической подстройки частоты ведомых часов (рис. 5), предложенная в [8], содержит пропорциональное (P) и интегрирующее (I) звенья, схему выборки/хранения (S/H) и собственно ведомые часы.

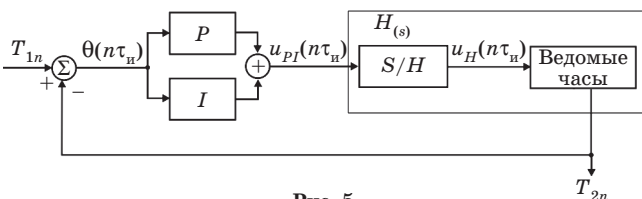


Рис. 5

Работает эта система в дискретном времени с интервалом дискретизации, равным τ_n . На каждом интервале τ_n ведомые часы вычисляют **расхождение времени** $\theta(n\tau_n)$ по формуле (1). Сигнал на выходе пропорционально-интегрирующего фильтра имеет вид

$$u_{PI}(n\tau_n) = K_P(n\tau_n) + K_I \frac{1}{T_I} \int_{n\tau_n - T_I}^{n\tau_n} \theta(t) dt, \quad (4)$$

где τ_n — интервал синхронизации; K_P — коэффициент передачи пропорционального звена; $\theta(n\tau_n)$ — расхождение времени ведомых часов по отношению к ведущим; K_I — коэффициент передачи интегрирующего звена; T_I — постоянная времени интегрирующего звена, связанная с интервалом дискретизации соотношением $\tau_n \leq 0,1T_I$. Из формулы (4) следует, что пропорциональное звено реагирует на текущее расхождение времени, а интегрирующее — на совокупность последних отсчетов, число которых определяется постоянной времени T_I . Преобразование Лапласа $P(s)$ объединенной передаточной функции схемы выборки/хранения и ведомых часов имеет вид

$$P(s) = \frac{1 - e^{s\tau_n}}{s} \frac{1}{s}. \quad (5)$$

Первый множитель правой части (5) описывает передаточную функцию схемы S/H . Ее поведение иллюстрирует рис. 6, а: в течение n -го интервала синхронизации τ_n она поддерживает постоянным значение сигнала $u_{PI}(n\tau_n)$, отсчитанное на ее входе в начале этого интервала. Так как в системе автоматической подстройки измеряют расхождение времени $\theta(n\tau_n)$, а подстраивают частоту, то происходит интегрирование — математической интерпретацией часов служит интеграл, преобразование Лапласа которого имеет вид $\frac{1}{s}$ в (5). Это означает, что в течение n -го интервала τ_n относительная частота $y(n\tau_n)$ генератора часов остается постоянной (рис. 6, б).

Качественной иллюстрацией поведения ведомых часов служит диаграмма двумерного времени, приведенная на рис. 7 в виде непрерывной и монотонной функции. В отличие от характеристики ведомых часов на рис. 4 относительная частота их генератора на каждом интервале синхронизации $y(n\tau_n) \neq y_0$, а зависит от сигнала рассогласования, вычисленного по текущему расхождению времени $\theta(n\tau_n)$. Для того чтобы приблизительно оценить неопределенность расхождения времени $\varepsilon_{\theta F}$, можно аппроксимировать передаточную функцию замкнутой системы автоматической подстройки генератора однополюсным фильтром нижних частот [11], преобразование Лапласа которого имеет вид $H(s) = \frac{1}{1 + sT_I}$. Поскольку опорный сигнал на входе системы автоматической

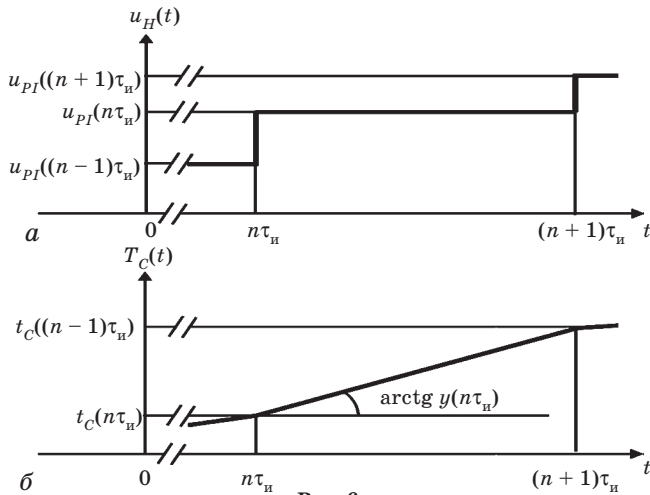


Рис. 6

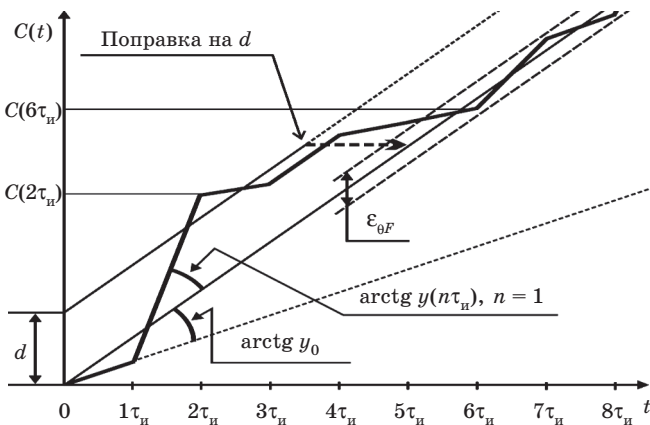


Рис. 7

подстройки представляет собой скачок времени, то описанием переходных процессов на ее выходе служит соответствующая переходная характеристика

$$h(t) = \frac{1}{T_I} e^{-\frac{t}{T_I}} \quad (6)$$

По формуле (6) можно вычислить, что замкнутая петля подстройки практически сводит к нулю переходные процессы по истечении времени установления, равного приблизительно $3T_I$ после скачкообразного изменения опорного сигнала, так что $h(t)_{t=3T_I} \approx 0,05$ [11]. Однако эти скачки повторяются через интервал $\tau_n \approx \frac{1}{10} T_I$. Затухание переходного процесса на этом интервале составит

$$h(t)_{t=\tau_n} = \frac{1}{10\tau_n} e^{-\frac{t}{10\tau_n}} \quad (7)$$

* * *

Протокол прецизионного времени IEEE 1588, разработанный специально для систем промышленной автоматики [8], предназначен, в отличие от NTP, не только для сличения времени, но и для восстановления частоты в транспортной среде с коммутацией пакетов. Соотношения (3) и

(7) позволяют оценить потенциальную прецизионность РТР в виде неопределенности сличения времени и неопределенности подстройки частоты, обусловленной систематическими составляющими. Максимальная неопределенность сличения времени ϵ_θ (3) при частоте генератора 62,5 ($1 \pm 2,5 \cdot 10^{-6}$) МГц определяется нестабильностью кварцевых генераторов — ее вклад при $\tau_n = 2$ с составляет ± 75 мкс. Вклад разрешающей способности $\rho = \pm 16$ нс, т. е. значительно меньше. В стандарте IEEE 1588 нет упоминания о системе автоматической подстройки частоты ведомых часов, однако она существенно улучшает прецизионность сличения времени. Оценка затухания переходного процесса по формуле (7) показывает, что $y(n\tau_n) \approx \pm 8,8 \cdot 10^{-6}$, т. е. при $\tau_n = 2$ с неопределенность сличения времени $\epsilon_{\theta F}$ составляет **около 2 нс**. Этого достаточно, чтобы, усредняя результаты сличения времени на интервале **около 5 мин**, подстраивать частоту с неопределенностью $1 \cdot 10^{-11}$ [9]. Следовательно, потенциальная прецизионность протокола IEEE 1588 достаточна для восстановления тактовой частоты в транспортной среде с коммутацией пакетов на уровне PRC. Правда, в приведенной оценке не учтен существенный вклад случайных составляющих, особенно флуктуаций и несимметрии задержек пакетов. Пока неизвестно, возможно ли оценить их влияние аналитически, но уже предложены практические способы уменьшить это влияние, например проставление меток времени на аппаратном уровне, уменьшение интервала синхронизации, оснащение элементов сети «прозрачными» и «граничными» часами [8]. Однако исследование этих возможностей выходит за рамки данной статьи.

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., Шапошников В., Черняк И. Теоретические основы синхронизации текущего времени в телекоммуникациях // Зв'язок.— 2007.— № 3.— С. 1–5.
3. Савчук А., Шапошников В., Черняк И. Синхронизация текущего времени: протокол сетевого времени // Зв'язок.— 2007.— № 6.— С. 10–15.
4. Савчук А., Шапошников В., Черняк И. Синхронизация текущего времени: протокол прецизионного времени // Зв'язок.— 2008.— № 2.— С. 28–33.
5. Vital Role of Timing and Synchronization in the NGN // ATIS Techthink Webinar.— 2006.— November, 9.— www.atis.org.
6. Lamport L. Time, clocks and the ordering of events in distributed system // Commun. ACM.— 1978.— 21(7).— P. 558–565.
7. Mills D. L. Computer Network Time Synchronization: the Network Time Protocol.— CRC Press, 2006.— 304 p.
8. John C. Eidson. Measurement, Control, and Communication Using IEEE 1588.— Springer-Verlag New York, Inc.— 2006.— 283 p.
9. Одуан К., Гино Б. Измерение времени. Основы GPS.— М.: Техносфера, 2002.— 400 с.
10. Khotimsky D. A. Hierarchical vector clock // United States Patent US 6,574,665 B.— 2003.— Jun. 3.— 10 p.
11. Брени С. Синхронизация цифровых сетей связи: Пер с англ.— М.: Мир, 2003.— 456 с.