

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

А В Т О М Е Т Р И Я

---

2008, том 44, № 2

УДК 621.317, 622.831.24

**МЕХАНИЗМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕДИНОГО ВРЕМЕНИ  
В РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ  
ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ГОРНЫХ ПОРОД**

**Д. А. Куликов, Е. У. Чье, К. О. Харитонов**

*Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск*

*E-mail: denis@redcom.ru*

Представлена структура программно-аппаратных средств и механизмов обеспечения единого времени в сейсмоакустической системе геомеханического мониторинга горных пород, апробированная на одном из рудников Читинской области. Проведен анализ и расчет погрешности ведения единого времени.

**Введение.** Наиболее важной проблемой при проведении подземных горных работ на больших глубинах и в сложных горно-геологических условиях является прогнозирование и предотвращение опасных проявлений горного давления, которые нередко приводят к катастрофическим последствиям. На основании современных тенденций построения измерительно-вычислительных комплексов была разработана автоматизированная сейсмоакустическая система геомеханического мониторинга (АССГМ) горных пород «УДАР» [1]. АССГМ использует геоакустический метод оценки и контроля состояния массива горных пород, который базируется на экспериментально наблюдаемом и теоретически изученном явлении акустической эмиссии (АЭ). АЭ возникает в горных породах вследствие концентрации в них механического напряжения. АССГМ состоит из подземной и наземной частей. Подземную часть составляет сеть распределенных цифровых приемников. В состав наземной части входят станция управления, сбора и анализа данных и блок питания цифровых приемников. Все вспомогательные функции цифрового приемника в АССГМ: обмен данными с наземной частью [2], ведение единого времени, обновление программ микроконтроллеров и тестирование датчика – реализуются отдельным коммуникационным микроконтроллером (КМК). Такое разделение задач позволяет полностью задействовать все вычислительные ресурсы сигнального микроконтроллера (СМК) цифрового приемника при обнаружении и цифровой обработке сигналов АЭ.

Создание системы поддержания и ведения единого времени в АССГМ при локации сигналов АЭ (по вычисленным разностям времен прихода) является основной задачей предлагаемой работы. От точной и скоординированной фиксации времени прихода сигнала АЭ цифровыми приемниками

зависят результаты работы АССГМ в целом, при этом требуется, чтобы погрешность отсчета единого времени не превышала 83 мс. Под точной и скоординированной фиксацией следует понимать: если сигнал АЭ поступает на датчики группы цифровых приемников одновременно, то зафиксированное время его прихода должно иметь одинаковое значение во всей группе цифровых приемников.

Существует ряд аппаратных решений, которые позволяют обеспечивать синхронизацию между устройствами, выполняющими передачу данных в телекоммуникациях [3], или поддерживать с высокой точностью синхронность работы цифровых сетей связи [4]. В то же время у родственных задач обеспечения единого времени в асинхронных по своей природе сетях передачи данных меньше решений, которые чаще имеют программную [5] и реже – аппаратно-программную реализацию.

Структура разработанной аппаратно-программной системы обеспечения единого времени (СОЕВ) представлена на рис. 1. Задача СОЕВ заключается в установке и поддержании единого времени в сети цифровых приемников с заданной точностью, при этом синхронизация с всеобщим скоординированным временем не требуется.

**Программная часть системы обеспечения единого времени** решает следующие задачи: ведение, коррекцию и загрузку начальных значений единого времени в сети цифровых приемников.

Внутреннее единое время в АССГМ измеряется количеством интервалов длительностью 500 нс от начала текущих суток. Указанное значение разрешения внутренних часов  $t_{разр}$  выбрано в соответствии с особенностями аппаратной реализации КМК. КМК каждого цифрового приемника имеет пятибайтный счетчик единого времени (СЕВ), который реализует внутренние часы. СЕВ инкрементируется с частотой  $f_m = 2$  МГц по прерыванию от 16-разрядного таймера КМК. Прерывание от данного таймера имеет высший приоритет в КМК, т. е. может останавливать исполнение другого прерывания.

СЕВ разделен на две части: старшую (трехбайтную) и младшую (двухбайтную). Время переполнения младшей части СЕВ  $T_2$  рассчитывается по формуле  $T_2 = 65535 t_{разр}$  и происходит каждые 32767,5 мкс.

При необходимости получения текущего значения СЕВ МКМ вырабатывает импульс на одном из своих выходов, который непосредственно подключен к КМК. По прерыванию, вырабатываемому в результате прихода данного

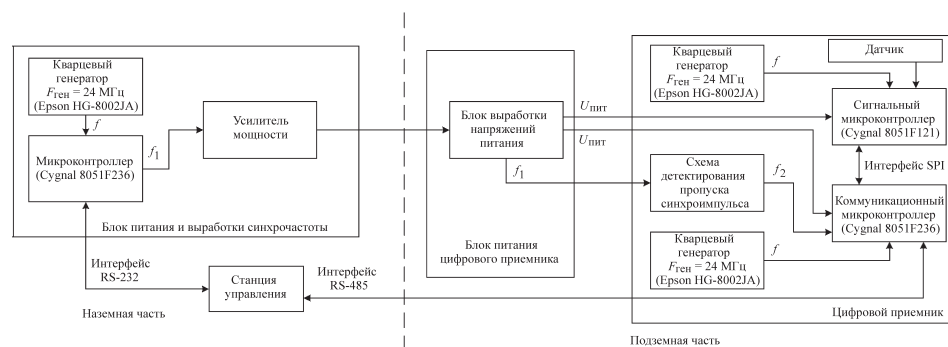


Рис. 1. Структура системы обеспечения единого времени «УДАР» в АССГМ

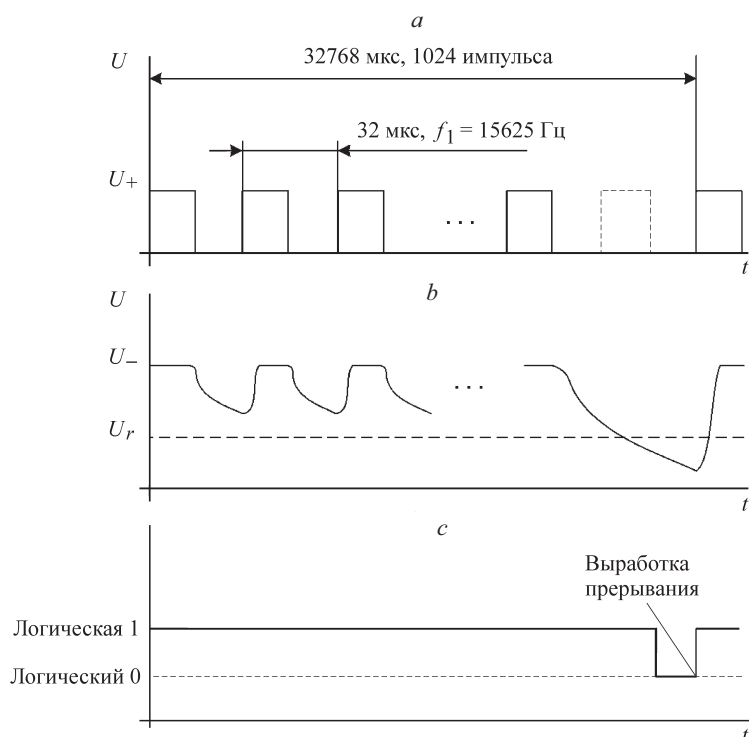


Рис. 2. Управление СОЕВ: структура синхроимпульсов (а), графики работы схемы детектирования пропуска импульса (b) и выхода компаратора (с)

импульса КМК, фиксируется текущее значение СЕВ и затем передается в СМК по интерфейсу SPI в формате реализованного протокола обмена.

**Аппаратная часть системы обеспечения единого времени.** Задачами, решаемыми аппаратной частью СОЕВ, являются одновременный сброс и установка значений единого времени в сети цифровых приемников АССГМ.

Микроконтроллеры блока питания и выработки синхрос частоты (БПВС) и цифрового приемника тактируются от прецизионных кварцевых генераторов Erson серии HG-8002JA с частотой  $F_{\text{ген}} = 24$  МГц.

Управляющие синхроимпульсы (рис. 2, а) с частотой  $f_1 = 15625$  Гц вырабатываются микроконтроллером в БПВС, затем они усиливаются и по отдельной линии подаются в блок питания цифрового приемника. Синхроимпульсы управляют сбросом и установкой СЕВ, а также используются для электропитания цифрового приемника. Для обеспечения синхронизации (путем сброса) СЕВ в сети цифровых приемников через каждые 1023 синхроимпульса происходит пропуск одного импульса (см. рис. 2, а, пунктирная линия). После детектирования пропуска импульса синхроимпульсы направляются на встроенный в КМК компаратор напряжения, сравнивающий величину подаваемого на него напряжения  $U_+$  с величиной опорного напряжения  $U_r$ . При  $U_+ < U_r$  в КМК по заднему фронту сигнала (рис. 2, б) вырабатывается прерывание, показанное на рис. 2, с.

Детектирование пропуска синхроимпульса показано на рис. 3. Постоянная времени для схемы детектирования пропуска импульса выбирается таким образом, чтобы разряд конденсатора до значений, меньших  $U_r$ , происхо-

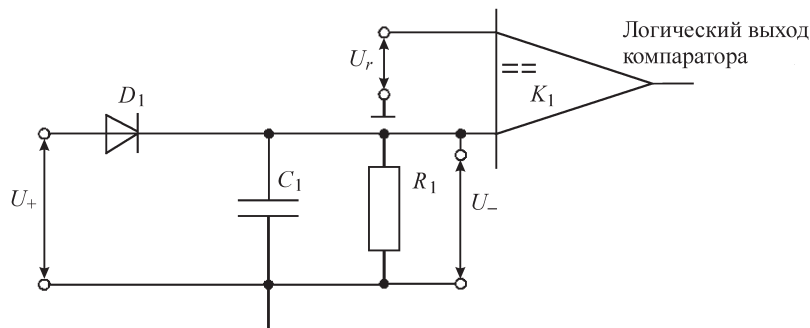


Рис. 3. Схема детектирования пропуска импульса

дил в середине пропускаемого импульса и время до начала заряда конденсатора превышало время реакции компаратора на изменение входного сигнала, которое составляет 4 мкс. Диод в схеме детектирования используется для ускоренного восстановления заряда конденсатора.

**Работа системы обеспечения единого времени.** Для корректной установки единого времени в сети цифровых приемников необходимо, чтобы начальное значение времени  $T_n$ , записываемое в СЕВ, было получено КМК в интервале между приходами синхроимпульсов сброса. При инициализации системы после включения питания это требование обеспечивается следующим образом: запуск БПВС производится со станции управления с использованием упрощенной модификации протокола обмена путем отправки команды по интерфейсу RS-232. В команде передается откорректированное (с учетом времени запуска) значение  $T_n$ , которое записывается в СЕВ БПВС как  $T_1 = 32768$  мкс. Параллельно этой команде во все цифровые приемники при помощи широковещательной команды отправляется откорректированное значение  $T_n$ . Затем по прерыванию от компаратора проверяется флаг, указывающий на необходимость запуска СЕВ с предварительно загруженным значением  $T_n$ . Если флаг установлен, происходит запуск СЕВ с заданным ранее значением  $T_n$ . Алгоритмы начальной установки единого времени в различных элементах АССГМ приведены на рис. 4, 5.

При установлении в младшей части СЕВ максимального значения, равного 65535, по прошествии 32767,5 мкс отсчет останавливается, инкрементируется старшая часть и обнуляется младшая часть СЕВ. Затем по прерыванию, вызываемому первым после пропуска синхроимпульсом, СЕВ запускается вновь. Вследствие того что точность кварцевых генераторов, тактирующих КМК в цифровых приемниках, может различаться, возможна ситуация, когда к моменту вызова прерывания младшая часть СЕВ еще не достигла максимального значения. При возникновении такой ситуации происходит остановка СЕВ, принудительное инкрементирование старшей части, обнуление младшей части и запуск СЕВ.

Для получения текущего значения СЕВ БПВС используется управляющая команда «Контроль времени», ответ на которую отправляется на станцию управления одновременно с выработкой пропуска синхроимпульса. В сети цифровых приемников значения единого времени контролируются с помощью широковещательной команды «Зафиксировать время», при получении которой цифровой приемник сохраняет в своем ОЗУ текущее значение СЕВ и отправляет его на станцию управления при последующем опросе.

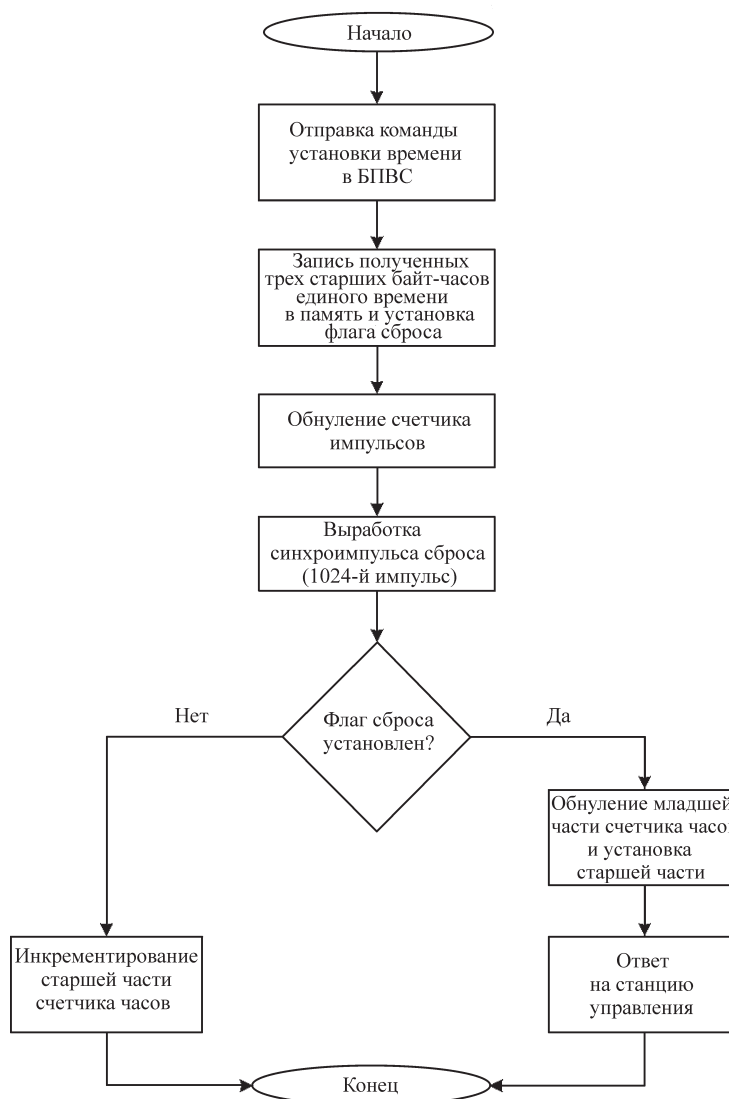


Рис. 4. Алгоритм начальной установки единого времени в БПВС

**Расчет погрешностей.** Под погрешностью ведения единого времени в разработанной АССГМ понимается максимально допустимая абсолютная величина разности значений СЕВ в цифровых приемниках системы, которая определяется из следующего условия: для расчета координат источника возникновения сигнала АЭ при равенстве расстояний  $r$  от источника АЭ до датчика каждого цифрового приемника требуется, чтобы величина  $\Delta r$ , возникающая из-за разности хода СЕВ, находилась в интервале  $[0; 0,5]$  м. Учитывая, что скорость распространения продольной волны в массиве горных пород в среднем составляет 6000 м/с, получаем интервал  $[0; 83]$  мкс, в котором должна находиться погрешность ведения единого времени в АССГМ.

Максимальное расстояние между первым (ближним) и последним (наиболее удаленным) цифровыми приемниками 1200 м, оно определяется используемой технологией передачи данных физического уровня (RS-485).

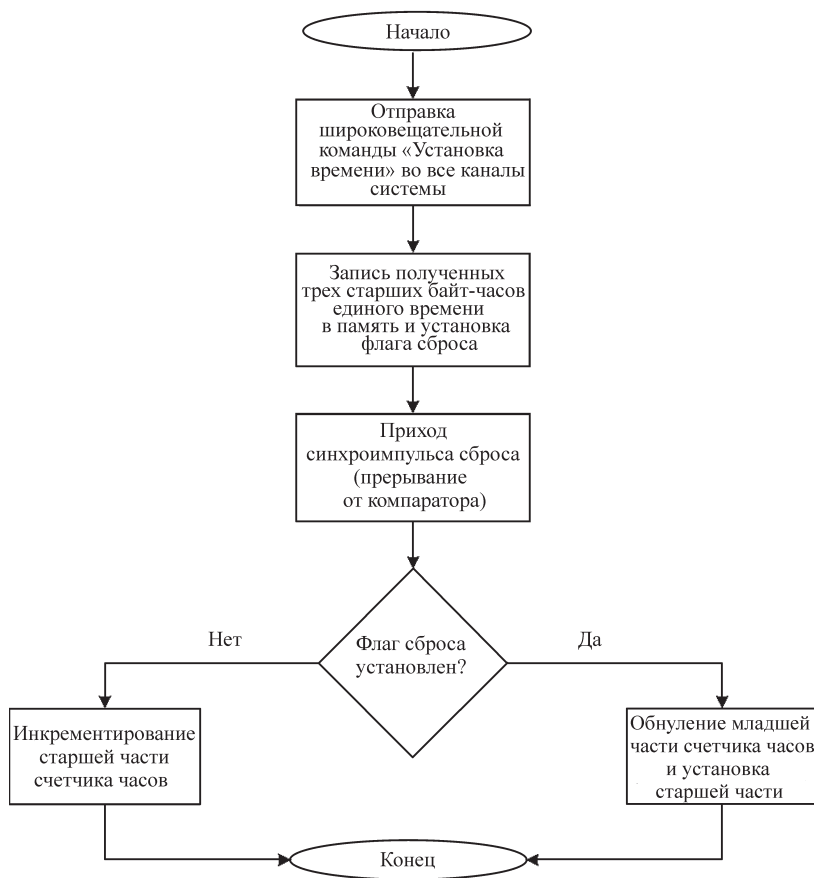


Рис. 5. Алгоритм начальной установки СЕВ цифрового приемника

Программное обеспечение цифровых приемников и БПВС разработано на языке программирования низкого уровня Ассемблер, что позволяет проводить расчет погрешностей установки и ведения единого времени с высокой степенью достоверности.

Влиянием температурных изменений в окружающей среде на элементную базу СОЕВ при расчетах погрешностей можно пренебречь по следующим причинам:

1) цифровые приемники установлены в шахтном поле, где текущее значение температуры окружающей среды несущественно отклоняется от среднегодового значения;

2) БПВС на поверхности находится в помещении, где постоянно поддерживается температура  $+(20 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$ ;

3) в подсистеме детектирования пропуска синхроимпульса используются конденсаторы, выполненные из малочувствительных к воздействию температур сплавов, ТКЕ которых находится в интервале  $[10; 30] \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ .

Основной вклад в суммарную погрешность отсчета единого времени  $\delta_{\text{сум}}$  вносят две составляющие.

1. Погрешность установки единого времени  $\delta_{\text{уст}}$  в АССГМ, которая вызвана следующими причинами:

а) синхроимпульсы распространяются по кабелю и поступают во все цифровые приемники в разные моменты времени;

б) если установка времени происходит в функционирующей в рабочем режиме системе, то заранее неизвестно, в какой подпрограмме или в каком прерывании будет находиться КМК цифрового приемника, и, следовательно, неизвестно, какое время будет затрачено на выход из выполняемой процедуры.

Величина  $\delta_{уст}$  рассчитывается по формуле

$$\delta_{уст} = t_{расп} + t_{уст},$$

где  $t_{расп}$  – время распространения синхросигнала сброса от ближнего до наиболее удаленного цифрового приемника;  $t_{уст}$  – время от срабатывания компаратора до запуска часов единого времени, рассчитанное по формуле

$$t_{уст} = t_{пер} + t_{вып}$$

(здесь  $t_{пер}$  – время вызова прерывания от компаратора, или интервал, в течение которого будет вызвано прерывание, информирующее цифровой приемник о том, что произошел пропуск импульса в синхросигнале; прерывание вызывается по заднему фронту сигнала, показанного на рис. 2, с, и имеет высший приоритет КМК;  $t_{вып}$  – время выполнения прерывания в КМК).

Для используемого типа кабеля КВСМв длиной 1200 м  $t_{расп}$  составляет 5,2 мкс. Величина  $t_{пер}$  является переменной, так как установка значения единого времени может происходить в любом режиме функционирования АССГМ, и для не функционирующей в рабочем режиме системы равна шести тактам, что при  $F_{ген} = 24$  МГц составляет 250 нс. Для системы, функционирующей в рабочем режиме,  $t_{пер}$  составляет 420 нс (10 тактов – время выполнения наиболее длительного прерывания высокого приоритета). Величина  $t_{вып} = 875$  нс (21 такт).

С учетом приведенных расчетов значение  $t_{уст} = 1,125$  мкс для режима начальной установки единого времени и  $t_{уст} = 1,3$  мкс для рабочего режима. Таким образом, максимальное значение  $\delta_{уст}$  при заданных параметрах составляет 6,5 мкс.

2. Погрешность ведения единого времени  $\delta_{вед}$  в АССГМ, которая определяется нестабильностью кварцевых генераторов в цифровых приемниках.

В цифровом приемнике используется кварцевый генератор Erson серии HG-8002JA со следующими характеристиками: точность настройки  $\Delta_n = \pm 2,5 \cdot 10^{-6}$ , для  $F_{ген} = 24$  МГц она составляет 60 Гц; температурная нестабильность  $\Delta_t = \pm 20 \cdot 10^{-6}$  для интервала рабочей температуры  $[-20; +70]$  °С; старение за год  $\Delta_{стар} = \pm 2 \cdot 10^{-6}$ .

Для заданного разрешения часов погрешность ведения единого времени рассчитывается по формуле

$$\delta_{вед} = |T_2 - T_1| + |T_2 - T_{2e}|,$$

где  $T_{2e}$  – период переполнения младшей части счетчика единого времени цифрового приемника с учетом погрешности, вносимой нестабильностью кварцевого генератора,  $T_{2e} = 65535 \frac{1}{f_{me}}$ . Здесь  $f_{me}$  – частота инкрементиро-

вания СЕВ в цифровом приемнике с учетом максимальной величины погрешности, которая определяется нестабильностью генератора и находится по формуле

$$f_{me} = \frac{2F_{ген} (|\Delta_n| + |\Delta_T| + |\Delta_{стар}|) + 1}{K}$$

( $K$  – константа, определяемая аппаратными особенностями КМК).

С учетом приведенных выше значений величина  $\delta_{вед}$  составляет 1,5 мкс для одного года работы.

Суммарная погрешность рассчитывается по формуле  $\delta_{сум} = \delta_{уст} + \delta_{вед}$  и составляет 8 мкс.

**Заключение.** Полученное в данной работе значение суммарной погрешности удовлетворяет предъявленным требованиям и согласуется с экспериментальными данными опытного внедрения АССГМ на одном из рудников Читинской области. Применение представленной СОВ не ограничивается разработанной АССГМ и аналогичными системами геомеханического мониторинга и допустимо в распределенных информационно-измерительных системах, где используется сеть датчиков, объединенных асинхронным интерфейсом передачи данных, и требуется высокая точность учета и измерений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куликов Д. А., Калинов Г. А., Рассказов И. Ю. и др. Акустический измерительно-вычислительный комплекс для геомеханического мониторинга массива пород при ведении горных работ // Сб. науч. тр. XVI сессии Российского акустического сообщества. М.: ГЕОС, 2005. Том 1. С. 351.
2. Kulikov D. A. Structure of data communication network and data communication protocol for geomechanical monitoring system // Proc. of the Korea-Russia Joint-Workshop "Signal Transmission, Proceeding, Sensor Monitoring System". Khabarovsk: PNU, 2006. P. 98.
3. Сухман С. М., Бернов А. В., Шевкопляс Б. В. Синхронизация в телекоммуникационных системах. М.: Эко-Трендз, 2003. С. 108.
4. Давыдкин П. Н., Колтунов М. Н., Рыжков А. В. Тактовая сетевая синхронизация. М.: Эко-Трендз, 2004. С. 28.
5. RFC1305, Network Time Protocol (Version 3) Specification, Implementation and Analysis // <ftp://ftp.rfc-editor.org/in-notes/rfc1305.txt>

*Поступила в редакцию 24 июля 2007 г.*