

**К.т.н. Л.И. Ананьев, д.т.н., проф. С.В. Семенихин**

(ЗАО «МЦСТ», ПАО «ИНЭУМ им. И.С. Брука)

**L. Ananiev, S. Semenikhin**

## **МЕТОДЫ РЕАЛИЗАЦИИ ТОЧНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ ВРЕМЕНИ В ОС «ЭЛЬБРУС»**

### **PRECISION TIME SYNCRONISATION METHODS IN OS «ELBRUS»**

*Статья посвящена проблеме точной синхронизации времени в операционной системе ЭВМ по внешним ежесекундным импульсам и по протоколу IEEE 1588. Приведены программно-аппаратные методы повышения точности синхронизации времени в системе «Эльбрус»: корректирующие счетчики в устройстве ввода-вывода, локальные счетчики времени в процессорах и устройствах ввода-вывода ЭВМ, работающие от внешнего или единого внутреннего синхронизатора.*

*Problems of precise time synchronization in operating systems by external pulse per second and Precision Time Protocol IEEE 1588 are discussed. Elbrus system hardware/software methods for time synchronization accuracy improving are described: correcting counters in IO devices, local clock in processors and IO devices which function under the control of external or system-wide internal synchronizer.*

*Ключевые слова: точное время, единое время, системные часы, синхронизация времени, ежесекундный импульс, протокол точного времени IEEE 1588.*

*Keywords: precise time, universal time, system clock, time synchronization, pulse per second, timestamp, Precision Time Protocol, IEEE 1588.*

**Введение**

Точная синхронизация времени в вычислительном комплексе (ВК) является основой для правильного поведения системы реального времени. Операционная система (ОС) «Эльбрус» обеспечивает работу двух режимов синхронизации времени: 1) получение точного времени от станции точного времени (СТВ), являющейся приемником спутниковой системы навигации ГЛОНАСС/GPS; 2) раздачу и получение времени по каналу Ethernet с использованием протокола NTP (Network Time Protocol). Этими двумя способами можно создать замкнутую подсистему точного времени ВК. Проблема заключается в гарантированном получении точности синхронизации: 15 мкс при использовании системы ГЛОНАСС и 100 мкс по каналу Ethernet. При программной реализации таких показателей невозможно достичь за ограниченное время, т.к. длительность процесса синхронизации в первом режиме растягивается на сотни секунд, во втором – на десятки минут. В статье описывается успешное решение этой проблемы, которое было получено при введении аппаратной поддержки процесса синхронизации.

## **1. Общие принципы процесса синхронизации времени в операционной системе**

При инициализации ОС время считывается из CMOS-часов, работающих на батарейке, до того как будет получено время в режиме ГЛОНАСС или NTP; в Linux эти часы называются RTC (Real Time Clock). В дальнейшем ОС «Эльбрус» корректирует скорость хода своих часов, опираясь на ежесекундные сигналы в сервере времени (режим ГЛОНАСС) или на пакеты NTP, пересылаемые по сети Ethernet.

Регулирование хода часов выполняется следующим образом. Текущее время ОС продвигается на целое число микросекунд при каждом прерывании по таймеру. Если, например, частота прерываний равна 100 Гц, время ОС продвигается на 10000 мкс. Но это правильно только в том случае, когда задающий генератор и преобразователи частоты настроены абсолютно точно. Чтобы сгладить неточность, к текущему времени

операционной системы прибавляется не 10000 мкс, а значение ее параметра tick. Для повышения точности к нему добавляется дробная часть, равная  $frequency/6553600$ . Значение знаменателя в этой формуле выбрано в Linux произвольно для удобства вычислений.

Таким образом, для регулирования хода часов надо вычислить параметры tick и frequency. Это возлагается на службу ядра PPS (Pulse-per-second), если время корректируется по ежесекундным импульсам в режиме ГЛОНАСС, или службу NTP, если время получается по каналу Ethernet.

## **2. Синхронизация по ежесекундным импульсам**

Сервер времени получает время со спутникового приемника по двум каналам: по каналу передачи байтовой информации (например, через интерфейс RS-422) передается дата и время с точностью до секунды, по импульсному каналу передается сигнал, соответствующий началу каждой секунды. В силу того что его выдают многие спутниковые приемники или атомные часы, в ОС Linux возникла служба и драйвер PPS. Служба PPS сравнивает время ОС с моментом прихода секундного сигнала – отклонение от нуля дробной части показателя секунд это и есть ошибка, которую надо скорректировать.

Для получения ежесекундного сигнала в Linux используется вход Data Carrier Detect через интерфейс RS-232. Это решение можно отнести к кустарным по той причине, что от входа в компьютер до процедуры на центральном процессоре, которая модифицирует время ОС, этот сигнал проходит через ряд недетерминированных аппаратных и программных задержек, которые искажают время его фиксации. Сигнал может быть задержан из-за занятости шины PCI, закрытых внешних прерываний в процессоре, очередности обработки прерывания с тем же номером от других устройств, занятости

оперативной памяти при чтении данных и команд программы. Разработанный в ЗАО «МЦСТ» модуль приема времени (МПВ) решает проблему таких задержек введением специального корректирующего счетчика времени, который аппаратура запускает в момент поступления сигнала на его вход. В зависимости от модификации, МПВ имеет от 3 до 20 входов, которые могут использоваться для приема не только импульсов PPS, но и любых других импульсных или потенциальных сигналов.

Максимально возможная точность, с которой регистрируется время поступления сигнала на вход МПВ, обеспечивается следующим образом. Операционная система, начав обработку прерывания, выработанного по приходу ежесекундного сигнала, считывает показание корректирующего счетчика, после чего вычитает это значение из текущего времени ОС, уже получившего приращение с момента прихода сигнала. Таким образом, фиксируется значение времени ОС в момент поступления сигнала отсчета времени на вход вычислительной машины. Дробная часть этого значения показывает, насколько время ОС отличается от времени СТВ. На ее основе вычисляются параметры *tick* и *frequency*, так чтобы отклонение времени ОС в ближайшее время стало равным нулю.

На рис. 1 показано влияние корректирующего счетчика на ошибку времени ОС. С введением корректирующего счетчика максимальное отклонение времени ОС уменьшилось с 23 до 12 мкс.

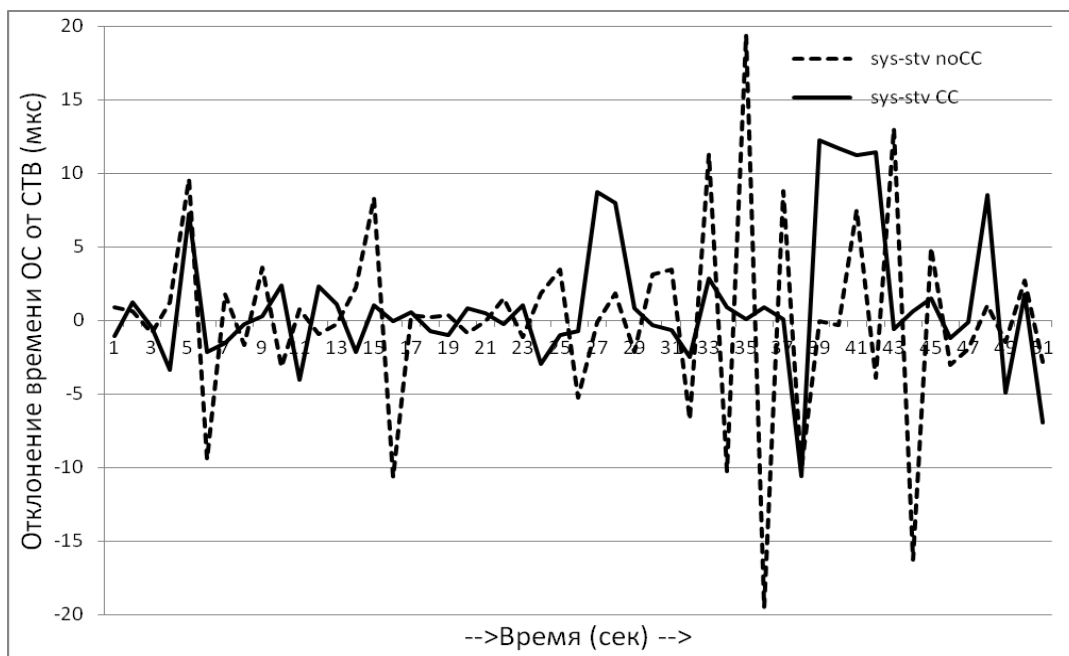


Рис 1. Отклонения времени ОС от времени СТВ без использования (sys-stv noCC) и с использованием (sys-stv CC) корректирующего счетчика

Ожидалось более существенное улучшение точности синхронизации – ведь корректирующий счетчик измеряет время с точностью 120 нс. Проблема в том, что продолжительность чтения счетчика из-за возможной занятости шины PCI колеблется от 2 до 20 мкс на ВК «Эльбрус-3М1» (тактовая частота процессора 300 МГц). Повторное чтение, рассчитанное на то, что шина освободится, и чтение займет меньше времени, как правило, не приводило к успеху: занятость шины может продолжаться долго. Поэтому было решено просто отфильтровывать те сигналы, применительно к которым время чтения корректирующего счетчика недопустимо велико. В результате в машинах с процессорами «Эльбрус-2С+» (500 МГц) и R1000 (1000 МГц) разброс времени чтения корректирующего счетчика уменьшился до 1 мкс.

Чтобы уменьшить эту ошибку, в последней версии устройства МПВ введен единый для всех входов счетчик времени. Он работает без остановки, а для каждого входа введен регистр, на котором запоминается значение этого счетчика при поступлении сигнала.

Поскольку до следующего сигнала оно не меняется, вариации в продолжительности чтения уже не влияют на точность фиксации времени. Еще одно достоинство такого решения состоит в повышении точности измерения разницы во времени между приходом сигналов на два разных входа МПВ – если использовать общий счетчик, она просто равна отличию зафиксированных в двух регистрах значений.

Погрешность измерения времени может вноситься и из-за нестабильности частоты генератора шины PCI, на котором работают счетчики. В МПВ она компенсируется вследствие того, что в момент прихода на вход сигнала значение корректирующего счетчика переписывается в регистр предыдущего значения счетчика. Таким образом, в регистре предыдущего значения корректирующего счетчика, относящемся к входу ежесекундного сигнала, лежит точное значение частоты генератора, измеренное за предыдущую секунду.

Особенно полезен общий для всех входов счетчик времени в тех системах реального времени, где наряду с синхронизацией по ГЛОНАСС используется свой общесистемный генератор синхронизации. Сервер времени получает как ежесекундный сигнал, так и сигнал от этого генератора. Ко всем остальным машинам сигнал поступает только от общесистемного генератора, но, в то же время, они могут получить данные о сдвиге этого сигнала относительно ежесекундного с точностью 120 нс. Без общего счетчика времени разброс времени составил бы десятки микросекунд.

В табл. 1 приведен пример выдачи команды *mpv\_stv*. Она служит для наблюдения за процессом синхронизации времени по ежесекундным импульсам. В первой колонке задано время ОС, отсчитанное от 1970 г.; в колонке *sys-stv(mcs)* – разница времени ОС и СТВ 14Б769М. В следующих двух колонках выдаются текущие параметры операционной системы – *tick* и *frequency*. В последней колонке *corr.cnt* приведено значение

корректирующего счетчика времени МПВ в микросекундах. Этот короткий фрагмент измерений выбран потому, что в нем видно, как был скорректирован параметр `frequency` для уменьшения разницы величины `sys-stv`. Кроме того, видно, как повлиял выброс значения корректирующего счетчика `corr.cnt` на точность хода времени и как прошло сглаживание выброса.

Таблица 1

Пример процесса коррекции времени по секундным сигналам

Time, s	sys-stv, mcs	Adjtimex tick	Adjtimex frequency	corr.cnt, mcs
1415805383	0,895	10000	-988134	10,30
1415805384	0,03	10000	-988134	10,05
1415805385	-2,384	10000	-988134	8,36
1415805386	-0,595	10000	-988134	7,51
1415805387	1,635	10000	-988134	8,96
1415805388	-1,564	10000	-988134	7,15
1415805389	-0,699	10000	-988134	6,30
1415805390	1,027	10000	-988134	7,99
1415805391	5,035	10000	-988134	12,60
1415805392	-3,453	10000	-988134	8,96
1415805393	-2,432	10000	-988134	6,66
1415805394	0,827	10000	-988134	7,27
1415805395	2,545	10000	-988134	10,05
1415805396	-0,469	10000	-990848	9,33
1415805397	1,762	10000	-990848	11,39
1415805398	0,195	10000	-990848	11,51
1415805399	-1,929	10000	-990848	9,33
1415805400	-0,634	10000	-990848	9,45

Описанный выше механизм коррекции времени ОС непосредственно в ее ядре является эффективным по использованию ресурсов процессора. Но пользователь может получить всю необходимую информацию о времени поступления сигнала из буфера чтения операции `read(mpv)` и после статистической обработки корректировать часы ОС, используя системный вызов `adjtimex`, как это делает служба NTP.

Отличие интерфейса МПВ от интерфейса GPIO (General-purpose input/output) [1] состоит в том, что пользовательский интерфейс МПВ больше похож на интерфейс семейства системных функций timer\_fd. Напомним, что функции семейства timer\_fd были добавлены в Linux как альтернатива принципиально медлительным таймерам в POSIX. И хотя read() не должен был возвращать никакой информации в буфере, а только ожидать таймера и завершать свое выполнение при его срабатывании, кто-то догадался возвращать в буфере обмена информацию о времени срабатывания таймера. Также и в буфере чтения МПВ – возвращается не только время прихода сигнала, но другие характеристики, в частности, значение корректирующего счетчика и продолжительность его чтения, общее количество прерываний, которое было получено МПВ, и количество прерываний, обработанных драйвером МПВ.

### **3. Проблемы точной синхронизации времени по каналу Ethernet**

Хотя протокол NTP может обеспечить точность синхронизации 10 мс [2], но это не гарантируется, и реальное значение точности составляет 100 мс. Только постоянный мониторинг времени службой NTP избавляет от накопления ошибки и сглаживает флуктуации. Наряду с этим в последние годы получил широкое распространение более совершенный протокол синхронизации времени PTP (Precision Time Protocol) по стандарту IEEE 1588 [3], который базируется на аппаратной регистрации времен поступления пакета Ethernet в контроллер и его отправки из контроллера. Суть протокола заключается в том, что система, посылающая пакет синхронизации времени, фиксирует, когда он покинул контроллер, и в следующем пакете сообщает клиенту это время, чтобы тот мог внести коррекцию.

Компания Intel уже выпустила несколько Ethernet-контроллеров (82574, 82576, 82580, 82599) с поддержкой IEEE 1588. В этих контроллерах есть блок GPIO, который



можно использовать для получения секундных импульсов. Драйвер может прочитать из регистра Ethernet-контроллера время, когда поступил или вышел пакет, если тип этого пакета относится к IEEE 1588. Время не только для пакетов, но и для программ на процессоре берется из часов Ethernet-контроллера. Таким образом, хранителем времени (clocksource) в данной вычислительной машине становится счетчик времени в Ethernet-контроллере, далекий от центрального процессора. Процессор же и исполняемые программы находятся по другую сторону шины PCI, буферов чтения и т.п., поэтому получают искаженное время.

В разработанном в ЗАО «МЦСТ» контроллере периферийных интерфейсов КПИ-2 [4] контроллер для поддержки протокола IEEE 1588 записывает в дескриптор обмена для любого типа пакета время его поступления в контроллер и отправки из контроллера, точнее, записывается время, прошедшее от начала последней секунды. Для этого ежесекундный импульс передается из контроллера МПВ непосредственно в Ethernet-контроллер, который по каждому такому сигналу перезапускает свой счетчик времени. Согласование времени ОС на процессоре и времени МПВ было описано выше. В результате нет необходимости переносить источник времени в Ethernet-контроллер.

Пользователю системы реального времени предпочтительнее получать время непосредственно из процессорного регистра без использования системного вызова, который к тому же может быть заблокирован межпроцессорной синхронизацией. Решение этой проблемы приведено ниже.

#### **4. Точный отсчет времени в процессоре**

Удобный, точный и быстро доступный счетчик времени в процессоре – это счетчик тактов, или клоков CLKR. Но в многопроцессорной системе частоты процессоров могут отличаться, хотя и ненамного, а в режиме экономии энергопотребления – довольно

существенно. Разработанный в ЗАО «МЦСТ» микропроцессор «Эльбрус-4С» 1891ВМ8Я имеет особый системный счетчик тактов SCLKR, который работает на стабильной, не зависящей от режима энергопотребления частоте. В дополнение к этому регистр SCLKR синхронизирован внешним ежесекундным сигналом, подаваемым на специальный вход микропроцессора. Не только ОС, но и пользователь может получить точное время из регистра SCLKR.

Счетчик SCLKR можно сравнить с PM-таймером (Power management timer) в машинах Интел, потому что его частота не зависит от изменения частоты процессора. В то же время SCLKR имеет ряд преимуществ, основным из которых можно считать его точность – он работает на частоте 125 МГц, т.е. счет ведется с шагом 8 нс, что много точнее, чем у PM-таймера. Надо также заметить, что частота PM-таймера (3 МГц) столь низка, и он расположен так далеко от процессора, что в ядре Linux его используют только при отсутствии других возможностей.

В старших 32 битах SCLKR\_H регистра подсчитываются секунды, в младших 32 битах SCLKR\_L – такты. Когда приходит ежесекундный импульс, к секундам в SCLKR\_H прибавляется 1, а предыдущее значение битов SCLKR\_L, равное числу тактов в секунде, сохраняется в регистре DIV, и они обнуляются. Таким образом, время в секундах равно  $SCLKR\_H + SCLKR\_L / DIV$ .

Внешний ежесекундный сигнал может исчезнуть вследствие неисправности. Также может возникнуть контактный дребезг – ложные импульсы. В таких случаях SCLKR переходит в режим самостоятельной генерации, базируясь на длительности последнего успешного интервала.

## **Заключение**

Вплоть до последнего времени подсистема синхронизации времени ОС «Эльбрус»

удовлетворяла выдвигаемым к ней требованиям с большим запасом. Уже сейчас необходимость в более точной синхронизации времени, чем обеспечивает NTP, испытывают электроэнергетика (единая энергетическая система), телекоммуникация (синхронизация базовых станций), робототехника, печатная промышленность, бумажная промышленность, протяженные автоматизированные линии. IP-датчики сопровождают данные, посылаемые по Ethernet или WiFi, точным временем, которому эти данные соответствуют [5]. Только отсутствие надежных высокоточных по времени технических средств ограничивает использование PTP.

Качественно новые инструменты откроют новые технологические возможности в сетевых системах. Например, передача Ethernet-пакетов в режиме множественного доступа с разделением времени (TDMA – Time Division Multiple Access) снимает конфликты входящих пакетов при недетерминированности момента их получения, что очень важно в системах реального времени. Во избежание столкновений пакетов, посланных с нарушением расписания, из-за неточности часов промежутки между пакетами увеличивают. Чтобы в полной мере использовать пропускную способность каналов связи, время на машинах должно быть согласовано с высокой точностью.

Чрезвычайно существенно влияние точности фиксации времени на эффективность систем управления, где для прогнозирования интегрируются малые приращения координат (или другого параметра) по малым приращениям времени и, соответственно, суммируются ошибки. Уменьшив ошибку фиксации времени, можно на более раннем шаге достоверно заключить, что поведение объекта изменилось вследствие его активного поведения, реже пересчитывать координаты или состояние объекта, следовательно, больше объектов можно отслеживать одновременно.

## Литература

1. GPIO [Электронный ресурс]. <http://wiki.openwrt.org/ru/doc/hardware/port.gpio>. Дата обращения 23.03.2015.

2. NTP and PTP (IEEE 1588) A Brief Comparison, Simmetricom 2010, [Электронный ресурс]. <http://www.en4tel.com/pdfs/NTPandPTP-A-Brief-Comparison.pdf>. Дата обращения 23.03.2015.

3. IEEE-1588-2002, «Standard for a Precision Clock Synchronization. Protocol for Networked Measurement and Control Systems».

4. Контроллер периферийных интерфейсов с пропускной способностью не менее 16 ГБайт/с, МЦСТ 2014 [Электронный ресурс]. <http://www.mcst.ru/kpi-dlya-perspektivnykh-vysokoproizvoditelnykh-mikroprocessorov>. Дата обращения: 23.03.2015.

5. Wireless energy harvesting native ip sensors., Сайт Watteco. URL: <http://www.watteco.com/ip-sensors-and-actuators>. Дата обращения: 23.03.2015.