



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2010-10
ОЭФ

А.В. Ивашин¹, В.Д. Матвеев¹, Ю.А. Хохлов^{1,2}

МОДЕРНИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА СБОРА ДАННЫХ УСТАНОВКИ ВЕС. ТЕХНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

¹ ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, Протвино

² Московский физико-технический институт (ГУ), Долгопрудный

Протвино 2010

Аннотация

А.В. Ивашин, В.Д. Матвеев, Ю.А. Хохлов. Модернизированная система сбора данных установки ВЕС. Технические аспекты: Препринт ИФВЭ 2010-10. – Протвино, 2010. – 20 с., 8 рис., 1 табл., библиогр.: 9.

Описывается развитие во времени аппаратуры системы сбора данных (ССД) установки ВЕС (Вершинный Спектрометр) и ее последняя модернизация на базе шины USB2.0. Дано краткое описание модуля AC-USB, разработанного для связи автономных контроллеров подсистем ССД с шиной USB, и программного обеспечения модернизированной ССД. Приведены полученные характеристики ССД по скорости приема данных, надежности и некоторые другие.

Abstract

A. Ivashin, V. Matveev, Yu. Khokhlov. Upgraded data acquisition system of VES facility. Technical aspects: IHEP Preprint 2010-10. – Protvino, 2010. – p. 20, figs. 8, tables 1, refs.: 9.

Progress in the time of VES facility data acquisition system (DAQ) and its recent upgrade using USB2.0 bus are described. The preprint contains brief description of AC-USB module which was developed to connect autonomous controllers of the DAQ subsystems with USB bus, and overview of software of the upgraded DAQ. Some characteristics of the new DAQ (such as readout speed, reliability etc) are presented.

1. Введение. Ретроспективный взгляд на развитие ССД установки ВЕС

Полномасштабная ССД в составе установки ВЕС функционирует с начала 1988 г.[1]. Она создавалась в тесном сотрудничестве с ОЭА ИФВЭ на базе нового для того времени стандарта высокоскоростной электроники МИСС [2], разработанного с использованием ЭСЛ-технологии. Система сбора данных установки ВЕС была одной из первых, если не первой, в которой были реализованы основные принципы архитектуры МИСС: программное управление секторами электроники через инструментальные компьютеры (сначала «Электроника-60», а позже IBM-PC); сбор данных, их идентификация и форматирование с возможной обработкой с помощью автономных контроллеров секторов; аппаратное объединение потоков данных с секторов и таким образом построение событий в пирамидальной (с несколькими уровнями) системе буферизации данных. Установка ВЕС была и заказчиком новых способов обработки, и полигоном для испытания и обкатки новых идей, технических решений и аппаратуры в стандарте МИСС.

Система сбора данных установки ВЕС с самого начала была реализована как трехуровневая. Верхний уровень сборки и временного хранения событий, накопленных за цикл ускорителя У-70, выполнялся в специализированном ОЗУ большой емкости с дополнительными функциями формирования сводной информации по циклу (разделитель-идентификатор циклов, номер цикла, длина в байтах, количество событий) и заголовков событий (разделитель-идентификатор событий, номер события, длина события). По мере развития и увеличения производительности установки ВЕС в качестве ЭВМ ССД последовательно использовались: «Электроника-79» с операционной системой (ОС) RSX-11M/PLUS и штатными накопителями на магнитных лентах (1988 г.); ТРА-11/580 (аналог VAX-11/780) с ОС VMS V5.4, тремя дисковыми накопителями по 800 Мбайт и кассетными накопителями Exabyte-8200 (2.5 Гбайт, 240 Кбайт/с) (1992 г.) и Exabyte-8500С (5 Гбайт, 500 Кбайт/с) (1996 г.); Alpha Station 200 4/233 и далее Digital Personal Workstation 600au с ОС OpenVMS V7.2 и накопителем Tandberg DLT 7000 (35 Гбайт, 5 Мбайт/с) (2000 г.). В процессе обновления ЭВМ ССД для приема данных в разное время использовались MASSBUS CHANNEL [3], стандартная шина ISA с модулем RDO [5], ускоренная шина ISA в моде блочных передач по каналу DMA с программируемым модулем RDO2.

Параллельно этому несколько стадий обновления с целью ускорения ССД и увеличения её надежности (при сохранении общей архитектуры) претерпели модули буферизации данных первого и второго уровней: от ЛЭ-33 (емкость 512 байт, скорость 7,5 Мбайт/с), ЛЭ-56/ЛЭ-56Н/ЛЭ-56F (4 Кбайт, 4.5/5.4/6.1 Мбайт/с, соответственно), ЛЭ-64 (до 16 Кбайт, 8.9 Мбайт/с) [4] до ЛЭ-89 (4 Кбайт, 6.5 Мбайт/с, реализация на ПЛИС ALTERA EP1K50QC208).

Емкость ОЗУ третьего уровня ССД последовательно увеличивалась с 2 Мбайт (В-2М) до 8 Мбайт (В-8М), 16 Мбайт (В-16М) и 32 Мбайт (ЛЭ-85М). Модули В-2М и В-8М были реализованы на микросхемах динамической памяти HM50256 емкостью 256 Кбит, В-16М – на линейках EDO памяти 8 Мбайт для IBM-PC. Модуль ЛЭ-85М разработан на основе схемотехники ЛЭ-85 со статической памятью 32 Мбайт и полной переработкой логики проекта под совместимость с предшествующей версией ОЗУ В-16М по выходному интерфейсу, форматам данных и служебной информации (заголовкам цикла и событий). Наименьшие изменения за годы работы установки ВЕС коснулись линии передачи данных из ОЗУ третьего уровня в ЭВМ ССД. Данные передавались на расстояние 15 м по многопроводному телефонному кабелю парафазными ЭСЛ-сигналами [3] с Hand-shake протоколом МИСС кабельного интерфейса [2]. В процессе ускорения ССД для сокращения длительности Hand-shake на середине транспортного кабеля был встроены регистр буферизации на одно слово, позволивший почти вдвое сократить цикл передачи слова до величины, соответствующей скоростным возможностям приема в ЭВМ. В последних версиях ССД обеспечивались прием данных в буферное ОЗУ со скоростью около 9 Мбайт/с и передача из буферного ОЗУ в компьютер со скоростью 2-3 Мбайт/с (с последней версией модуля RDO2 максимальная скорость приема была доведена до 6 Мбайт/с). В этой конфигурации ССД установки ВЕС обеспечивала возможность приема до 16 Мбайт за цикл ускорителя, значение, близкое к пределу при принятой архитектуре.

С 1988 по 2008 гг. ССД успешно отработала в 25 сеансах, и принятая МИСС архитектура с аппаратным построением событий очень долго была важным достоинством, определившим высокую производительность ССД в условиях ограниченной мощности используемых ЭВМ и компенсирующим все ее недостатки, которые будут отмечены в следующем разделе.

2. Необходимость модернизации ССД ВЕС

На рис. 1 представлена структура ССД ВЕС до модернизации, описанной в данной работе. Система представляет собой множество секторов регистрирующей электроники в стандарте МИСС. Считывание сектора производится автономным контроллером (АК) сектора. Несмотря на то что существует несколько типов автономных контроллеров, с точки зрения их взаимодействия с внешним миром все они имеют одинаковый интерфейс:

- входной сигнал START;
- входной сигнал CR (common reset, общий сброс)¹;
- выходной сигнал BUSY;
- кабельный интерфейс МИСС.

¹Иногда сигнал CR заводится прямо на магистраль МИСС через специальный модуль.

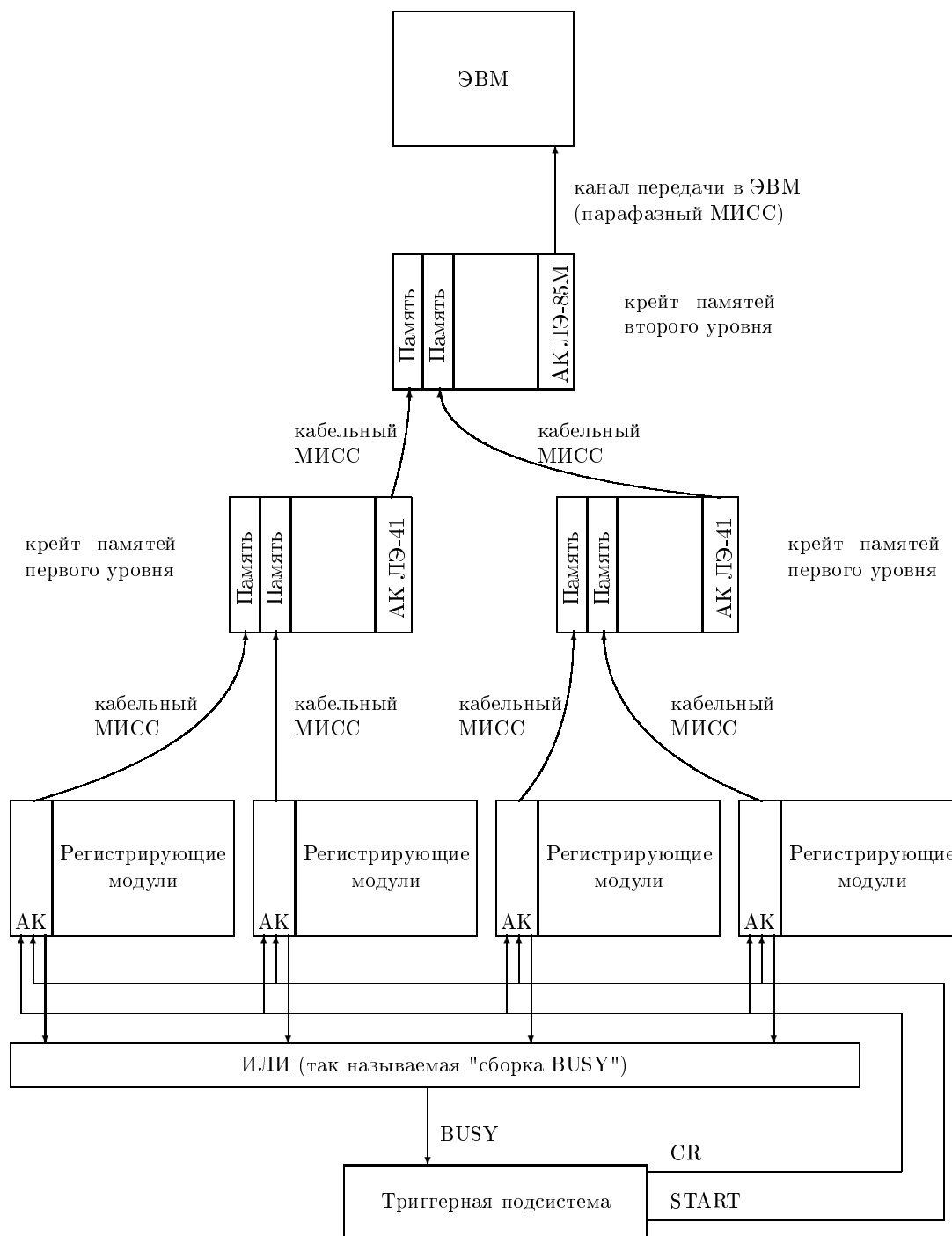


Рис. 1. Структура ССД ВЕС до модернизации. Сигналы START, CR, BUSY также заведены на АК памяти (ЛЭ-41 и ЛЭ-85М), но не показаны, чтобы не загромождать рисунок. На модуль ЛЭ-85М также заведены сигналы BS (begin of spill) и ES (end of spill), не показанные на рисунке.

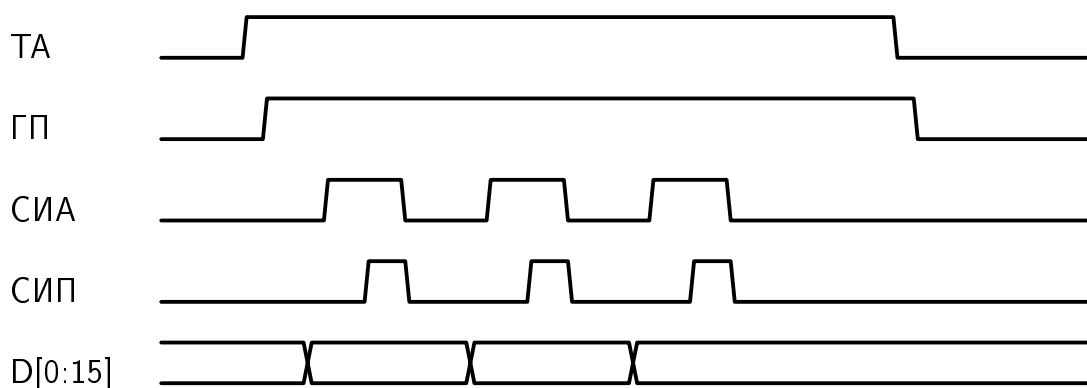


Рис. 2. Временная диаграмма работы кабельного интерфейса МИСС.

Кабельный интерфейс МИСС [2] представляет из себя 20-сигнальный интерфейс с однофазными сигналами в уровнях ЭСЛ. Интерфейс предназначен для однонаправленной передачи информации от автономного контроллера в модуль памяти. На рис. 2 приведена временная диаграмма работы интерфейса. При передаче события автономный контроллер (АК) устанавливает сигнал ТА («требование активного»). В ответ на него модуль памяти должен установить сигнал ГП («готов пассивный») как только будет готов к приему. Далее АК выставляет данные D[0:15] и устанавливает сигнал CIA («синхросигнал активного»). Модуль памяти по сигналу CIA производит запись данных в память и после записи данных выставляет сигнал СИП («синхросигнал пассивного»). Высокий уровень сигнала СИП заставляет АК сбросить CIA. В свою очередь, сброс CIA вызывает немедленный сброс СИП модулем памяти. Далее цикл повторяется, пока АК не передаст все данные. После передачи события АК снимает ТА, что приводит к снятию ГП модулем памяти.

Все управляющие сигналы (START, CR, BUSY) имеют уровни NIM. Сигналы START и CR вырабатываются триггерной подсистемой. Сигнал START запускает считывание регистрирующих модулей автономным контроллером (то есть прием события). Сигнал CR приводит к сбросу всего сектора в исходное состояние. Сигнал BUSY вырабатывается АК и устанавливается на все время обработки события. Сигналы BUSY от всех АК объединяются логическим ИЛИ и поступают на триггерную подсистему для блокирования сигналов START. В случае, если объединенный сигнал BUSY не снимается в течении 1 мс (что означает «зависание» системы), триггерная подсистема вырабатывает по тайм-ауту сигнал CR и приводит ССД в исходное состояние. Регулярное присутствие сбросов по тайм-ауту свидетельствует о неисправностях в ССД.

В ССД ВЕС использовалось 2 типа АК. Первый тип не снимал BUSY до окончания передачи события по кабельному интерфейсу (типичная временная диаграмма приема события показана на рис. 3). Второй тип (две модификации ЛЭ-68) имеет внутреннюю буферную память и снимал BUSY сразу после записи события в вышеупомянутую внутреннюю память. Выдача содержимого внутренней памяти в кабельный интерфейс происходила асинхронно относительно прихода сигналов START. Типичная временная диаграмма работы АК второго типа представлена на рис. 4. В связи с модернизацией системы (по причинам, которые будут приведены в разделах 3, 4) потребовалось избавиться от контроллеров второго типа, что и было сделано путем модификации «прошивки» ЛЭ-68 их разработчиком.

Событие, выдаваемое АК в кабельный интерфейс, представляет из себя блок 16-битных слов, в котором все слова, кроме последнего, имеют нулевой старший бит. Последнее слово с установленным старшим битом является разделителем событий на данном уровне буферизации данных.

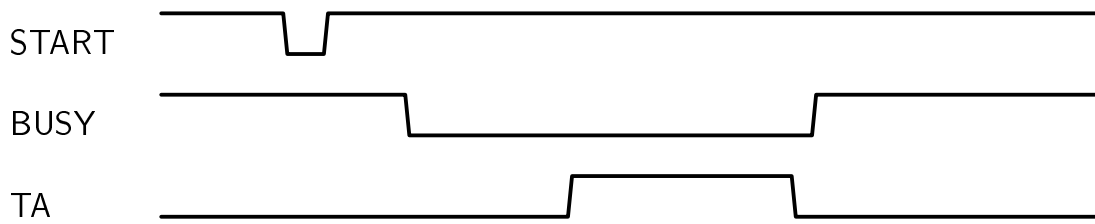


Рис. 3. Типичная временная диаграмма работы АК первого типа.

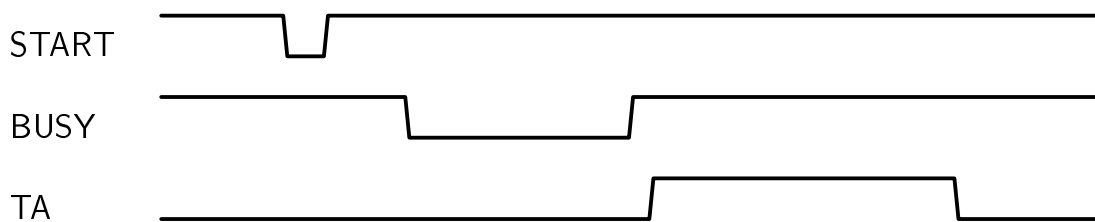


Рис. 4. Типичная временная диаграмма работы АК второго типа.

Собственно буферные памяти, к которым подключались АК, тоже являлись модулями МИСС, стоящими в отдельном секторе (или секторах) и считываемые по магистрали сектора контроллером ЛЭ-41. В отличие от АК регистрирующих модулей, ЛЭ-41 интерпретирует сигналы START несколько по-другому (по сути считает разность между числом поступивших START и числом считанных по магистрали сектора событий и если это число превышает 15, то вырабатывает сигнал BUSY, чтобы исключить переполнение памяти). Так сделано потому, что после выдачи события автономным контроллером регистрирующей электроники в кабельный интерфейс дальнейшая его обработка происходит асинхронно с соответствующим этому событию сигналом START. Подобное решение позволяет повысить пропускную способность системы, поскольку последующая обработка событий может в таком случае происходить параллельно с их регистрацией. Вернемся к ЛЭ-41. Модуль ЛЭ-41 запускается в действительности сигналом ГТ (сигнал готовности на магистрали МИСС), который вырабатывается, когда во всех памятих крейта есть событие. События в памятих разделяются тем самым старшим битом, что упомянут выше. После считывания события ЛЭ-41 добавляет дополнительное слово с установленным старшим битом. Таким образом, после операции сборки в крейте памяти первого уровня событие заканчивается двумя словами с установленными старшими битами и передается посредством кабельного интерфейса в память второго уровня.

Крейт памяти второго уровня работает аналогично, за исключением того, что разделителем событий является пара подряд идущих слов с установленным старшим битом. На втором уровне в качестве автономного контроллера использовался либо ЛЭ-41, который работал на буфер третьего уровня В-16М, либо ЛЭ-85М, который объединял в себе функ-

ции автономного контроллера и буфера третьего уровня. Из буфера третьего уровня данные между сбросами частиц ускорителем У-70 передавались в ЭВМ. Обычно длительность сброса не превышает 2 с, оставшиеся 7.5 с доступны для передачи содержимого буфера третьего уровня в ЭВМ (полный цикл У-70 занимает 9.5 с).

Описанная выше система обладает следующими недостатками:

- Весь поток данных проходит через магистраль МИСС сектора памяти второго уровня, что отрицательно сказывается на масштабируемости системы.
- Диагностические возможности системы очень слабы. Допустим, что по каким-либо причинам (из-за неисправности) стал постоянно зависать прием данных от одного из АК. В результате система памяти ожидает данные от этого АК, чтобы завершить построение события. Через 1 мс триггерная подсистема вырабатывает сброс по таймауту, что вызывает сброс содержимого всех памяти, кроме буфера третьего уровня. Таким образом, в буфер третьего уровня ничего не попадает, и до ЭВМ ничего не доходит, сбор данных полностью останавливается. Единственный способ найти неисправный крейт – последовательное физическое отключение подсистем ССД, что занимает довольно много времени. Другим примером может служить ситуация, когда на разные подсистемы поступает различное число сигналов START (либо из-за ошибок в системе разводки этих сигналов, либо из-за плохого разъема/кабеля). В этом случае перемешиваются фрагменты от различных событий. Хотя данные в этой ситуации и поступают в ЭВМ, часть из них все же теряется и точная диагностика проблемы довольно сложна и часто не обходится без физического вмешательства в ССД.
- В качестве разделителя событий используется единственный бит (старший бит контрольных слов АК), что отрицательно сказывается на надежности процедуры сборки событий.

Указанные выше недостатки и неоднократно выявлявшиеся проблемы с надежностью работы системы памяти в сложных режимах конвейеризации данных, когда все памяти почти постоянно заполнены, привели к проработке радикальных мер по модернизации ССД. К модернизированной системе сбора данных были выдвинуты следующие требования:

- хорошая масштабируемость;
- мощные диагностические возможности;
- более надежная сборка событий (а именно радикальное снижение вероятности неконтролируемого перемешивания фрагментов различных событий);
- удобство в эксплуатации.

В настоящее время высокая производительность персональных компьютеров, а также дешевизна и компактность больших объемов памяти делает возможным переход к одноуровневой системе, где каждый крейт считывается в свой независимый большой буфер (размером несколько мегабайт), а потом все эти буферы считываются в ЭВМ (или кластер ЭВМ), где и происходит сборка информации от различных крейтов в законченные события. Очевидно, что система подобного рода обладает отличной масштабируемостью, а

также потенциально хорошими диагностическими возможностями, поскольку сборка событий происходит полностью программно.

Одним из возможных решений могло быть использование относительно недавней разработки ОЭА [9]: объединенные шлейфом автономные контроллеры ЛЭ-74/ЛЭ-85 и модуль сопряжения ЛЭ-75 для подключения системы АК к ЭВМ с использованием интерфейсной платы ADLink PCI-7200, которая устанавливается на шину PCI. Модуль ЛЭ-75 подключается к ADLink PCI-7200 посредством 32-битной параллельной шины. Подобное решение, обеспечивающее скорость передачи данных в ЭВМ до 12 Мбайт/с (в расчете на одну ветвь, обслуживаемую одной платой ADLink PCI-7200), используется на ряде более поздних установок ИФВЭ.

Однако на установке ВЕС существует ряд подсистем, которые несовместимы с ЛЭ-85 (главным образом модули ВЦП ЛЭ-37, требующие подачи дополнительного тактового сигнала через разъем на передней панели в момент считывания с них информации). Поэтому внедрение ЛЭ-85, как минимум, потребовало бы изготовления для него нескольких вариантов «прошивок» для обслуживания различных регистрирующих модулей, и, возможно, доработки печатной платы с целью увеличить количество NIM сигналов на передней панели. Также в ЛЭ-85 отсутствуют механизмы управления и аппаратного формирования содержательных заголовков циклов и событий (см. раздел 4), хорошо зарекомендовавших себя в ССД ВЕС. Кроме того, существенным недостатком, с точки зрения удобства эксплуатации, является широкое использование громоздких параллельных интерфейсов, а также использование специализированной платы ADLink PCI-7200 с нестандартным интерфейсом.

Исходя из перечисленных выше соображений, было решено разработать для ССД ВЕС собственную архитектуру верхнего уровня.

3. Архитектура модернизированной ССД ВЕС

Концептуально новая система представляет собой набор независимых узлов регистрации информации с детекторов экспериментальной установки. Каждый узел имеет:

- 2 входных сигнала START и GATE;
- 1 выходной сигнал BUSY (опционально);
- высокоскоростной последовательный интерфейс для подключения к ССД (например USB2.0 (480 Мбит/с), Fast Ethernet (100 Мбит/с), Gigabit Ethernet (1000 Мбит/с) или любой другой, который удобен в данном конкретном случае);
- при необходимости другие сигналы (по возможности их следует избегать);
- буферную память большого объема для запоминания всей информации, получаемой за один цикл ускорителя У-70.

Работа системы происходит следующим образом. События регистрируются и записываются в буферную память во время низкого уровня сигнала GATE. Во время высокого уровня GATE (между сбросами ускорителя) содержимое буферной памяти выдается через высокоскоростной последовательный интерфейс.

В момент низкого уровня сигнала GATE передний фронт сигнала START вызывает регистрацию события. Узел регистрации опционально может выдавать сигнал BUSY в течение всего процесса регистрации события для блокирования выработки сигналов START триггерной подсистемой. Альтернативным решением является создание узлов с очень низким максимально возможным временем регистрации события (1–2 мкс). Тогда в триггерной подсистеме можно ввести фиксированное ограничение на минимальный временной интервал между сигналами START. Последнее решение предпочтительно для узлов регистрации, расположенных прямо на детекторах установки, поскольку позволяет отказаться от прокладки кабельной сети для сигналов BUSY, упрощая тем самым эксплуатацию системы. Более того, если узлы расположены на расстояниях далее 50 метров от триггерной подсистемы, то из-за задержек, вносимых кабельной системой, сигнал BUSY не может появиться ранее, чем через 500 нс (предполагается типичная кабельная задержка 5 нс/м). Поэтому при длительности сигнала BUSY порядка 1 мкс использование этого сигнала для электроники, расположенной вблизи детекторов, теряет смысл.

Событие от каждого узла регистрации (точнее, фрагмент события) обязательно должно содержать временной штамп: длительность временного интервала между передним фронтом сигнала GATE и передним фронтом сигнала START, соответствующего данному событию. Временной штамп вырабатывается при помощи внутреннего кварцевого генератора, что позволяет при дополнительной калибровке частот генераторов, исходя из равенства длительностей сигнала GATE во всех подсистемах, получить точность измерения времени не хуже 0.5 мкс на интервале 1 с при использовании обычных кварцевых генераторов с точностью настройки и температурной нестабильностью 10^{-4} .

На основе временного штампа производится шивка фрагментов событий от различных узлов регистрации. Использование временного штампа существенно надежнее, чем использование простого номера события, в том смысле, что штамп однозначно связан с временем прихода сигнала START. Последнее свойство позволяет легко диагностировать различные неисправности, связанные с доставкой сигнала START до узлов регистрации.

Кроме временного штампа, заголовок события обязан также содержать длительность сигнала BUSY для данного события.

Заголовок или хвостовик сброса (набора событий, полученных за один цикл ускорителя) должен содержать длительность сигнала GATE, а также флаг, указывающий на наличие сигналов START в момент установленного узлом регистрации сигнала BUSY.

Высокоскоростной последовательный интерфейс применяется для подключения узла регистрации к ЭВМ или кластеру ЭВМ. Использование стандартных последовательных интерфейсов позволяет для подключения узлов регистрации к ЭВМ обойтись стандартным коммутационным оборудованием, доступным на рынке, без разработки специализированных устройств сопряжения.

Сборка событий полностью возлагается на ЭВМ. На форматы данных не налагается никаких жестких требований. Единственное требование — данные должны содержать в каком-либо виде упомянутую выше информацию (временные штампы, длительность BUSY и т.п.). При необходимости формат потока данных преобразуется программой-конвертором в некоторый стандартный формат для конкретной реализации ССД.

Кроме того, что описанная архитектура удовлетворяет требованиям из раздела 2, она еще обладает тем свойством, что не накладывает жестких ограничений на используемые последовательные интерфейсы, что позволяет расширять уже существующую реализацию

ССД, употребляя не используемые ранее в ССД интерфейсы. Например, описанная в данной работе модернизированная ССД установки ВЕС на основе USB2.0 может в дальнейшем расширяться с использованием какой-либо разновидности Ethernet.

4. Модуль AC-USB

Система сбора данных, описанная в разделе 2, может быть довольно легко преобразована так, чтобы соответствовать архитектуре из раздела 3. Достаточно сделать крейты с регистрирующими модулями узлами регистрации (в смысле определения из раздела 3). Здесь возможны 2 пути:

- Создание нового автономного контроллера с внутренней памятью большого размера и каким-либо скоростным последовательным интерфейсом.
- Создание модуля памяти со скоростным последовательным интерфейсом и интерфейсом кабельного канала МИСС для сопряжения с существующими автономными контроллерами.

Первый путь неудобен по тем же причинам, что и применение универсального контроллера ЛЭ-85 (см. раздел 2). Поэтому был выбран второй путь. В качестве кандидатов на роль скоростного последовательного интерфейса рассматривались USB2.0 (480 Мбит/с) и Fast Ethernet (100 Мбит/с). Оба интерфейса являются промышленными стандартами с широким спектром применений и хорошей перспективой развития с сохранением совместимости. Выбор был сделан в пользу USB2.0, поскольку максимальное расстояние между крейтами МИСС в существовавшей на тот момент ССД не превышало 20 метров, а с точки зрения создания устройства интерфейс USB в определенном смысле проще в силу наличия на рынке микросхем аппаратно реализующих протокол USB. Несмотря на то, что длина кабеля USB не может быть больше 5 метров, шина USB допускает каскадирование с помощью USB-коммутаторов (USB-хабов). Используя USB-хабы, можно обеспечить подключение устройств к ЭВМ в радиусе до 30 м. В качестве эксперимента были разработаны тестовый модуль сопряжения буфера третьего уровня ЛЭ-85М с шиной USB2.0 и упрощенная версия программы сбора данных на PC под управлением ОС GNU/Linux. На этой конфигурации в сеансе 2008 года были получены ответы на вопросы о реализуемой скорости и надежности передачи данных по USB2.0. Была достигнута скорость около 29 Мбайт/с. Также была проверена возможность каскадирования и удлинения шины USB при помощи хабов. По результатам испытаний было принято решение о разработке модуля памяти с интерфейсом кабельного канала МИСС и интерфейсом USB2.0 для передачи данных в ЭВМ. Модуль получил название AC-USB (Autonomous Controller – USB).

AC-USB представляет собой модуль конструктива МИСС единичной ширины, устанавливаемый в непосредственной близости к обслуживаемому АК для сокращения длин кабельных связей между ними. Модуль имеет несколько входных и выходных управляющих сигналов в уровнях NIM, интерфейс кабельного канала МИСС в однофазных уровнях ЭСЛ и интерфейс USB. В табл. 1 приведено функциональное назначение разъемов для подключения управляющих сигналов в уровнях NIM. Под режимами G и B имеется в виду способ обозначения циклов ускорителя либо одним сигналом GATE, либо парой BS/ES; выбор

Таблица 1. Управляющие сигналы модуля AC-USB.

Разъем	Режим	Сигнал	Тип	Назначение
GATE/BS	G	GATE	вход	Сигнал для обозначения временного интервала для приема событий. Низкий уровень сигнала разрешает прием событий и запись их в память модуля. Сразу после перехода сигнала на высокий уровень происходит выдача по USB накопленных данных. Время, в течение которого сигнал остается на высоком уровне, должно быть достаточным для передачи всего массива данных по USB.
	B	BS	вход	Передний фронт сигнала обозначает начало временного интервала для приема событий.
STARTOUT/ES	G	STARTOUT	выход	Выход, на который без изменений транслируется сигнал STARTIN. Может использоваться для подачи сигнала START на подсоединенный к модулю АК.
	B	ES	вход	Передний фронт сигнала обозначает конец временного интервала для приема событий и запуск выдачи накопленных данных по USB. Время до прихода следующего сигнала BS должно быть достаточным для передачи всего массива данных по USB.
STARTIN	-	STARTIN	вход	Вход для подачи сигнала START от триггерной подсистемы. Передний фронт сигнала STARTIN запускает прием события. Длительность сигнала должна быть больше 80 нс.
RESIN	-	RESIN	вход	Вход для подачи сигнала общего сброса CR от триггерной подсистемы.
BUSYIN	-	BUSYIN	вход	Вход для подачи сигнала BUSY от АК.
RESOUT	-	RESOUT	выход	Выход для подачи сигнала CR на подсоединенный АК.
BUSYOUT	-	BUSYOUT	выход	Выход для подачи сигнала BUSY в глобальную сеть BUSY ССД.

между режимами G и В осуществляется джампером на печатной плате модуля. Прочерк в графе «Режим» означает, что режим не имеет значения.

На рис. 5 приведена типичная схема подключения модуля. Модуль AC-USB имеет свой собственный кварцевый генератор с частотой 40 МГц для выработки системных тактовых сигналов, в том числе сигнала с частотой 5 МГц, который используется для временных измерений (выработки временных штампов, измерения длительности сигнала BUSY и длительности сигнала GATE). Используемые кварцевые генераторы имеют отклонение частоты от номинальной не более 10^{-4} внутри температурного диапазона от 0 до 70°C и стабильность не хуже $5 \cdot 10^{-6}$ в год.

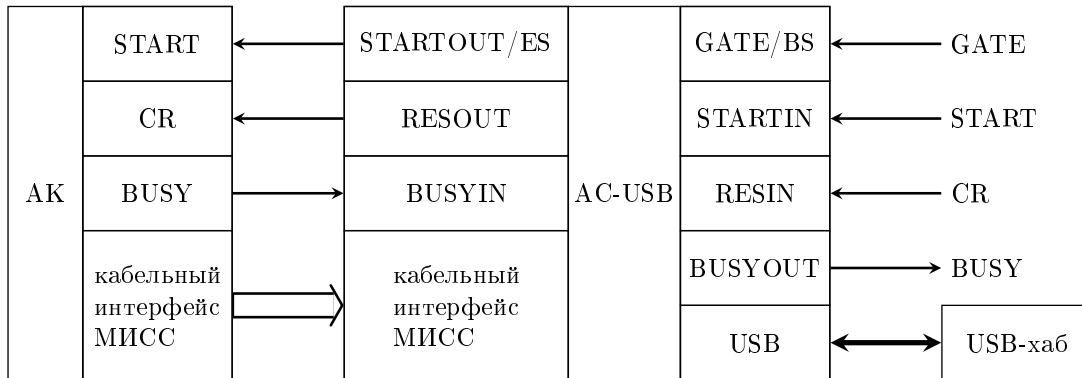


Рис. 5. Типичная схема подключения модуля AC-USB. Сигналы GATE, START, CR, которые заведены на модуль AC-USB — глобальные сигналы ССД, вырабатываемые триггерной подсистемой. Сигнал BUSY подсоединяется к одному из входов сборки BUSY (см. раздел 2).

По концу или началу сигнала GATE (в зависимости от положения специального ключа (джампера) на плате модуля) формируется идентификатор цикла, соответственно как концевик или как смещенный заголовок. Идентификатор состоит из двенадцати 16-разрядных слов:

FAFD	идентификатор конца/начала цикла (4 слова)
FBFE	
FFFC	
F9F1	
FTsph	F+длительность цикла (старшие 10 разрядов)
FLsph	F+длина данных цикла в 16-разрядных словах (старшие 10 разрядов)
Tspl	длительность цикла (младшие 16 разрядов)
Lspl	длина данных цикла в 16-разрядных словах (младшие 16 разрядов)
ST	слово состояния, включающее в себя следующую информацию:
	индикатор ошибки — старший разряд
	тип ветви BR — следующие 7 разрядов
	значение внутреннего тайм-аута (TOUT) — младшие 8 разрядов
Nsp	номер цикла по модулю 2^{16}
Nst	количество сигналов START за цикл
Nres	количество сбросов за цикл

В рабочей версии AC-USB индикатор ошибки приема цикла (15-й разряд ST, здесь и далее при нумерации разрядов в слове или функциональной группе (например BR) младший номер всегда 0) устанавливается в двух случаях:

- Установленный джампером режим задания цикла (по сигналу GATE или по BS+ES) не соответствует используемым сигналам.
- Сигнал START для нового события приходит до окончания приема предыдущего.

Индикация ошибки выведена на светодиод на передней панели модуля.

BR – это кодовое слово, определяющее текущий режим работы AC-USB, часть которого устанавливается программно по USB, а часть – ключами (джамперами) на плате модуля.

По сигналу START или фронту сигнала TA (в зависимости от режима работы) формируется заголовок события из восьми 16-разрядных слов:

F1FD	идентификатор начала события (2 слова)
F7FC	
FTevh	F + относительное (от начала GATE) время прихода сигнала START (старшие 10 разрядов)
Tevl	относительное время прихода сигнала START (младшие 16 разрядов)
Nst	номер последнего прошедшего старта
Nev	номер текущего события ¹
Nres	текущее состояние счетчика сбросов
Tbusy	длительность обработки предыдущего события (длительность сигнала BUSY)

Наличие двойных идентификаторов события в его заголовке (временной метки–штампа Tevh и номера Nev) позволяет иметь надежный механизм идентификации событий при их программной сборке (сшивке). Заголовки цикла и событий встраиваются в поток принимаемых данных и записываются вместе с ними в буферную память AC-USB для выдачи в USB между сбросами ускорителя. Память AC-USB реализована на одном стандартном для IBM-PC модуле динамической SDRAM памяти формата DIMM-168 типа PC-100 или PC-133 емкостью 32, 64 или 128 Мбайт.

Для выдачи данных в шину USB 2.0 и управления по USB используется USB микроконтроллер CY7C68001 [6] в его предустановленной конфигурации, реализующей BULK моду обмена по шине USB и сдвоенные по 512 байт буферы обмена для обоих направлений (передачи данных в USB по ENDPOINT6 и приема команд из USB по ENDPOINT2). Сдвоенные буферы обмена позволяют совместить во времени запись данных в буфер микроконтроллера и чтение данных из буфера для достижения максимально возможной скорости обмена.

Вся логика управления интерфейсами, обращениями к динамической буферной памяти, режимами AC-USB, формированием заголовков и самотестированием модуля реализуется в ПЛИС ALTERA EP1K100QC208-3 (семейство ACEX1K).

¹В режиме формирования заголовка по сигналу START значения Nst и Nev совпадают и Tbusy дает время от сигнала START до окончания BUSY. В режиме формирования заголовка по фронту TA значения Nst и Nev могут не совпадать, а Tbusy дает длительность сигнала TA.

Контроллер AC-USB имеет три режима работы:

- режим тестирования;
- рабочий локальный;
- рабочий глобальный.

В любой момент в AC-USB по USB можно записать до четырех семиразрядных параметров:

ID	логический номер контроллера
BR	код режима модуля AC-USB
TOUT	значение локального тайм-аута на прием события
LTEV	длину тестового события для режима тестирования

Параметры могут записываться как отдельными байтовыми посылками, так и пакетом байтов или слов. Тайм-аут TOUT устанавливается для ограничения времени приема данных события из АК и действует только в локальном рабочем режиме.

Текущий код режима работы BR и величина TOUT всегда читаются в статусном слове ST заголовка цикла. Длина тестовых событий задается в блоках по 8 16-разрядных слов в диапазоне до 1024 слов. По умолчанию при включении питания записываются значения TOUT=6.5 мс, LTEV=128 слов, а в BR – рабочий локальный режим контроллера.

В режиме тестирования AC-USB по сигналам START формируются и записываются в память AC-USB тестовые события заданной в LTEV длины. Генерируемые 16-разрядные слова данных представляют собой побайтно инкрементируемые коды. Как и в рабочих режимах, в режиме тестирования формируются полноценные форматы циклов с заголовками циклов и событий. В этом режиме игнорируется интерфейс AC-USB с АК; AC-USB не обрабатывает установленный TOUT, игнорирует сигналы RESIN, BUSYIN и не выдает сигналы RESOUT, BUSYOUT. Указанные особенности режима тестирования позволяют реализовать проверку модулей AC-USB в автоматизированной процедуре фактически без остановки ССД.

В двух рабочих режимах данные принимаются от АК; обработка сигналов RESIN, RESOUT, BUSYIN, BUSYOUT и обработка локального TOUT определяются записанным в BR кодом режима.

В реализованной версии контроллера AC-USB только 4 из 7 разрядов кода BR программируются по USB:

разряд 2	– начало обработки события по сигналу START (1) или TA от АК (0) этот разряд устанавливается в ноль только для отладочных целей
разряд 4	– тестовый (1) или рабочий (0) режим
разряд 5	– локальный (1) или глобальный (0) рабочий режим
разряд 6	– выдача (1) или невыдача (0) внутреннего BUSY на выход BUSYOUT в локальном рабочем режиме

Изменение остальных 3 разрядов кода BR разрешено только ключами (джамперами) на плате модуля:

- разряд 0 – физический ключ-индикатор¹
- разряд 1 – ключ сброса (1) или сохранения (0) нумерации событий при сбросе по локальному или глобальному тайм-ауту
- разряд 3 – ключ формирования идентификатора цикла как концевика или смещенного заголовка

Глобальный рабочий режим модуля AC-USB характеризуется тем, что:

- Модуль включен в схему формирования глобального BUSY ССД, выдавая сигнал BUSY от АК на выход BUSYOUT.
- Модуль обрабатывает глобальный тайм-аут, пропуская поступающие на вход RESIN общие сбросы во время цикла (сбросы по тайм-ауту) на связанный с ним АК через выход RESOUT. Внутренний тайм-аут по установленному TOUT в этом режиме выключен.

Глобальный режим является основным режимом ССД. С помощью статистической обработки Tbusy событий от AC-USB, включенных в ССД, можно легко обнаружить «зависающие» секторы ССД, приводящие к глобальным тайм-аутам и снижению скорости работы, и исключить их из ССД, переводя соответствующие контроллеры AC-USB в локальный режим.

Локальный режим AC-USB характеризуется тем, что:

- Модуль не выдает наружу сигнал BUSY от АК.
- Модуль не обрабатывает глобальный тайм-аут, то есть не пропускает общие сбросы внутри цикла на АК.
- Модуль сбрасывает связанный с ним АК по истечению установленного локального тайм-аута TOUT на длительность сигнала BUSY от АК.

Локальный рабочий режим AC-USB может использоваться как в отладке оборудования ССД, так и в некоторых других специальных режимах.

5. Программное обеспечение модернизированной ССД ВЕС

Для управления модулями AC-USB и считывания с них данных был разработан драйвер для ядра Linux 2.6.26. Драйвер предоставляет пользовательским программам интерфейс символического устройства для считывания данных и набор файлов в файловой системе sysfs для управления режимами работы модуля AC-USB (по одной копии набора необходимых файлов на каждый подключенный к ЭВМ в данный момент модуль AC-USB). Кроме того, некоторые параметры самого драйвера (например размер блока для чтения данных) тоже настраиваются через sysfs. Чтение данных осуществляется в синхронном режиме и только блоками фиксированной длины, при этом реальное число прочитанных байт может

¹Физический ключ-индикатор – это переключатель на лицевой панели модуля AC-USB, включая который в тестовых целях, можно при неработоспособном АК по статусному слову ST идентифицировать модуль и связанный с ним сектор ССД среди объектов на USB-шине.

отличаться от запрошенного. Синхронный режим чтения означает, что драйвер сам по себе не инициирует операции чтения (bulk in запросы) на шине USB. Операции чтения на шине USB инициируются только после выполнения пользовательским процессом системного вызова read, и возврат из read происходит после получения необходимой порции данных. Данный механизм работы является не очень эффективным с точки зрения загрузки шины USB, поскольку в те моменты, когда читающий процесс обрабатывает полученные данные и формирует запросы на новые порции данных, шина USB простаивает.

Во время испытаний удалось достигнуть скорости чтения 29 Мбайт/с, в то время как физическая пропускная способность шины USB2.0 составляет 60 Мбайт/с. В реальной системе считывание осуществляют сразу несколько потоков (threads), запущенных на четырехъядерном процессоре Intel Q6600, в результате чего достигается суммарная скорость 40 Мбайт/с.

Для динамического создания файлов устройств, соответствующих подключенным в данный момент модулям AC-USB, используется система udev [7]. Также udev отвечает за автоматическое добавление вновь подключившихся модулей AC-USB в систему сбора данных (на протяжении всего этого раздела под системой сбора данных понимается только ее программная часть).

Система сбора данных построена в виде набора процессов, взаимодействующих через разделяемую память и именованные каналы. Основным процессом является построитель событий onl-evbd, представляющий из себя многопоточный процесс (по одному потоку на каждый AC-USB и еще 2 потока для служебных нужд). Построитель событий на основе анализа временных штампов собирает события от различных потоков данных. На данный момент реализованы 2 алгоритма сшивки:

- Сшивка по абсолютным временным меткам, требующая, чтобы для каждого события выполнялось неравенство $\max_{ij} |t_i - t_j| < \delta$, где i и j пробегают множество сшиваемых фрагментов событий.
- Сшивка по относительным относительно предыдущего фрагмента события временным меткам, требующая $\max_{ij} |\Delta t_i - \Delta t_j| / \Delta t < \delta$, где Δt есть среднее по Δt_i .

В обоих случаях производится калибровка частот генераторов AC-USB (см. раздел 3). Оба алгоритма продемонстрировали свою работоспособность. С точки зрения надежности первый предпочтительнее, если стабильность задающих генераторов модулей AC-USB позволяет его использование. В нашем случае стабильность генераторов оказалась вполне достаточной для использования первого алгоритма.

Сборка событий считается успешно прошедшей, если данные от всех AC-USB за один цикл ускорителя содержат одинаковое число событий и для всех событий выполняется описанное выше ограничение на временные штампы. В случае неуспешной сборки на диске сохраняются полные дампы информации от всех AC-USB и текстовый файл, который содержит описание причины неудачной сборки и номер последнего успешно собранного события. Дампы являются мощным диагностическим инструментом, с помощью которого был найден ряд весьма тонких и редко проявляющихся ошибок в «прошивке» модуля AC-USB на этапе его отладки.

Свое текущее состояние, а также статистическую информацию по последнему циклу сбора построитель событий регулярно обновляет в текстовом файле. Периодическая выдача этого файла на экран терминала позволяет оператору отслеживать текущее состояние

ССД. Файл содержит диагностическую информацию для каждого AC-USB (число стартов, число общих сбросов, среднее и максимальное времена BUSY, объем данных), скорость и время приема данных, а также процент так называемых «плохих» циклов с начала запуска постороителя — циклов, по которым нет 100%-ной сшивки событий. Эта информация позволяет сразу идентифицировать неисправные подсистемы (например, довольно легко обнаруживаются такие распространенные неисправности, как пропадание сигналов START, GATE, CR, неодинаковое число сигналов START на разных подсистемах, аномально большие длительности BUSY).

Кроме onl-evbd, существует также ряд вспомогательных процессов:

- onl-writed — запись данных на диск;
- onl-getd — выдача данных мониторирующим программам;
- onl-hist — гистограмматор (интерактивный процесс, может быть запущен в нескольких экземплярах);
- onl-flushd — передача данных на CASTOR (хранилище информации на магнитных лентах с сетевым доступом [8]).

Для отладочных целей существуют также программы дампа сырых данных.

6. Модернизированная ССД установки ВЕС и некоторые ее характеристики

Реализованная и испытанная в 2009 году ССД представлена на рис. 6. Система успешно отработала в двух методических сеансах в 2009 и 2010 году, и показала существенно более высокую надежность и удобство в управлении и диагностике неисправностей. Построитель событий обеспечил оператора ССД информацией о текущем состоянии ССД и основных статистических характеристиках по сбору данных за цикл У-70 (см. раздел 5).

Ниже приведены характеристики, полученные в пучковой экспозиции весной 2010 года на 30000 циклах У-70¹:

- количество событий, принимаемых за цикл — 40000;
- объем данных с каждого контроллера AC-USB — 1–2 Мбайт;
- доля плохих циклов — 0.3%;
- суммарная скорость приема данных по USB при приеме через один USB хост-контроллер — 40 Мбайт/с (не зависит от топологии шины USB, под топологией понимается порядок подсоединения конечных абонентов шины с помощью системы хабов);

¹Измерения проведены в условиях: интенсивность неблокированных (то есть при отключенном сигнале BUSY на триггерной системе) триггеров 120000/цикл, в ССД включено пятнадцать секторов МИСС, во всех секторах АЦП на аппаратном уровне вычитаются «пьедесталы».

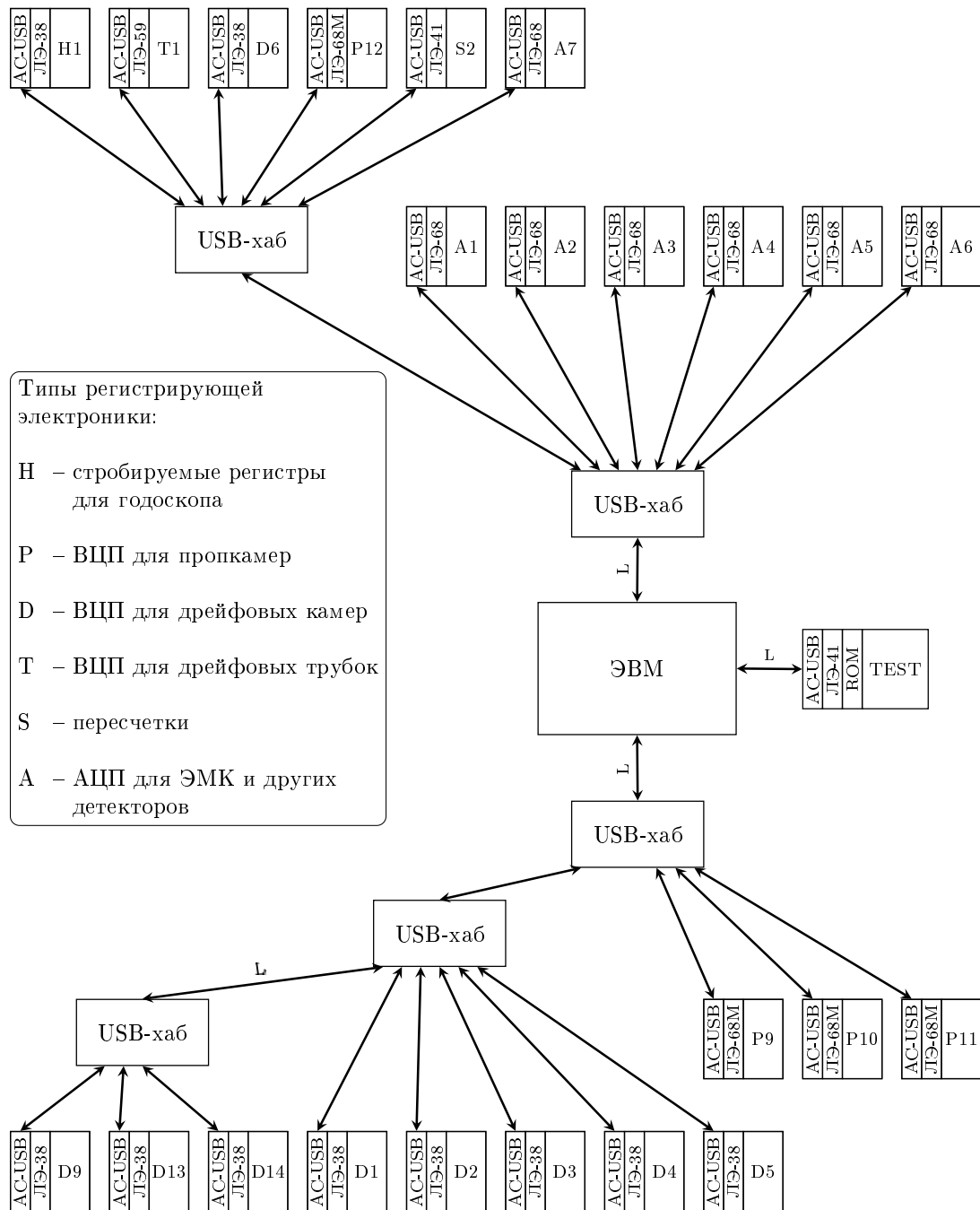


Рис. 6. Модернизированная ССД установки ВЕС. Буквой L обозначены «длинные» USB-кабели длиной 3 м. В остальных случаях употребляются «короткие» USB-кабели длиной 1.8 м. В качестве USB-хабов используются семипортовые DLink DUB-H7. Тестовая подсистема TEST представляет из себя крейт МИСС в котором установлены модуль ПЗУ (ROM), читающий его по магистрали МИСС АК ЛЭ-41, и модуль AC-USB, принимающий данные от ЛЭ-41. Тестовая подсистема используется для проверки на исправность модулей AC-USB.

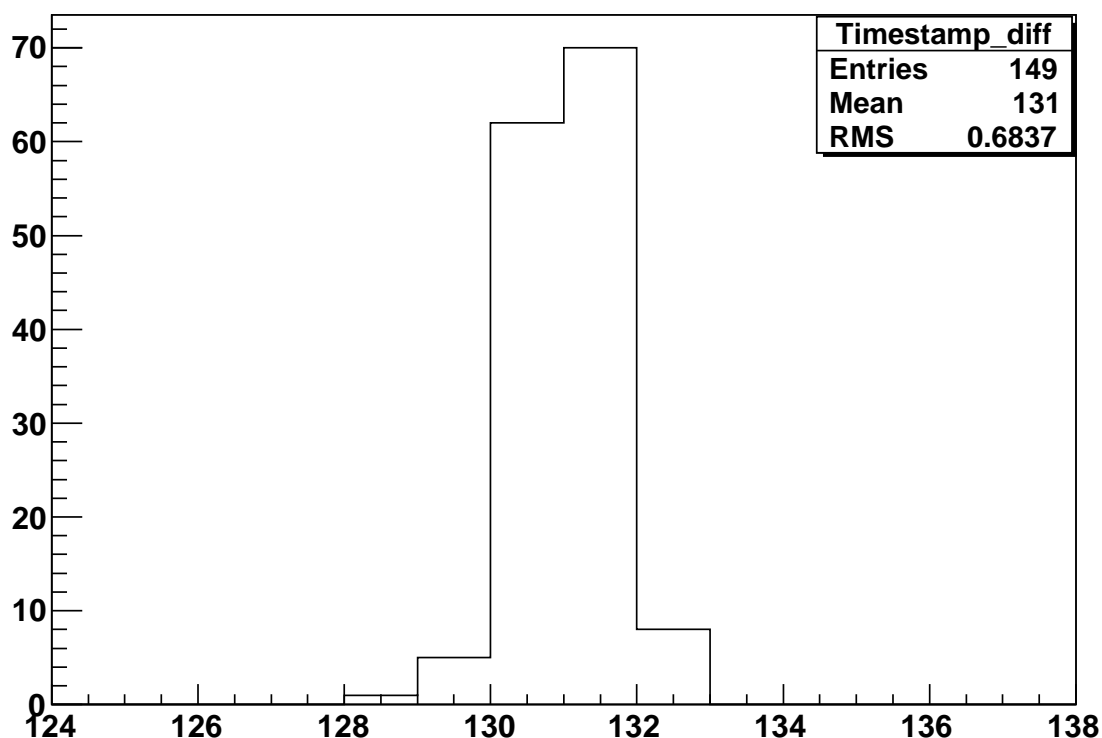


Рис. 7. Распределение максимального временного разбега сырых временных штампов.

- суммарная скорость приема по USB при разбиении ССД на две части и использовании для их считывания двух различных USB хост-контроллеров — 52 Мбайт/с (скорость зависит от распределения числа устройств AC-USB между шинами — оптимальным является такое разбиение, которое обеспечивает равные объемы считываемых данных; однако мы ограничились неоптимальным разбиением на 11 и 4 устройства AC-USB);
- для тестовой подсистемы ССД (рис.6) с одним сектором МИСС (в аналогичных по количеству триггеров условиях) скорость приема по USB не превышает 29 Мбайт/с;
- общие сбросы ССД по тайм-ауту не зарегистрированы (до модернизации в ССД всегда присутствовало небольшое число сбросов по тайм-ауту, происхождение которых так и осталось непонятым).

Все данные были получены при оптимальном размере блока чтения данных в USB-драйвере (16384 байт). Уменьшение размера блока снижает скорость. В качестве ЭВМ использовался компьютер с четырехъядерным процессором Intel Core 2 Quad Q6600 с частотой 2.4 ГГц и четырьмя гигабайтами памяти DDR2-800 с ядром Linux версии 2.6.26.

В модернизированной ССД в качестве рабочего режима сшивки событий использована сшивка событий по абсолютным временным меткам событий (временным штампам). Для повышения надежности сшивки она выполняется не по сырым штампам, записанным в заголовках событий (Tev), а по калиброванным, с поправочными коэффициентами, вычисляемыми для каждого цикла по T_{sp} контроллеров AC-USB, включенных в ССД.

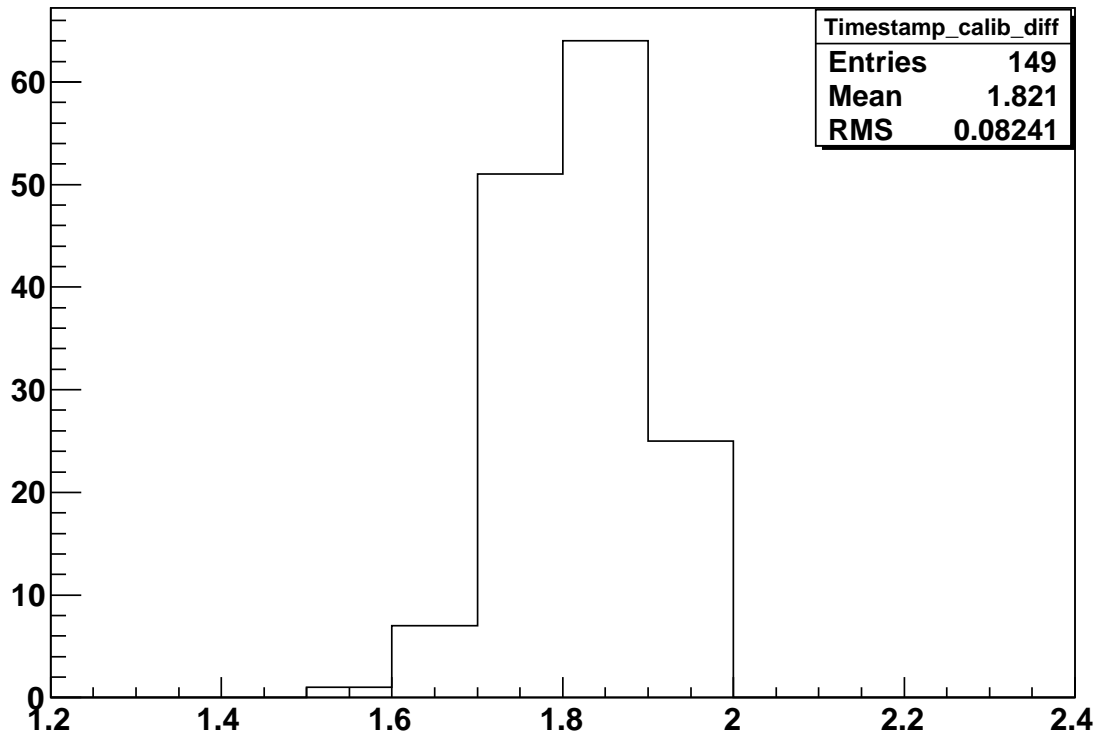


Рис. 8. Распределение максимального временного разбега калиброванных временных штампов.

На рис. 7 приведен пример распределения максимального временного разбега сырых штампов на 149 циклах ССД, а на рис. 8 максимального разбега соответствующих калиброванных штампов. В обеих гистограммах по X-координате отложено время в квантах счета времени в AC-USB (200 нс). Гистограммы демонстрируют высокую эффективность выравнивания штампов с помощью программной калибровки.

Ненулевое количество (0.3%) плохих циклов связано с потерей 512 байт из потока данных одного из считываемых AC-USB. Проблема изредка возникает во всех AC-USB и ее происхождение в данный момент не ясно. С точки зрения использования системы для физического эксперимента величина 0.3% достаточно мала, и система в настоящем виде может без каких-либо проблем использоваться для регистрации событий в физических сеансах.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект 10-02-00730.

Список литературы

- [1] Битюков С.И. и др. Система сбора данных установки ВЕРшинный Спектрометр ИФВЭ. — Препринт ИФВЭ 94-101, Протвино, 1994.
- [2] Бушнин Ю.Б. и др. Быстродействующая система регистрирующей и триггерной электроники для экспериментальных исследований в ИФВЭ (МИСС). — Препринт ИФВЭ 88-47, Серпухов, 1988.

- [3] Дзелядин Р.И. и др. Канал МИСС–MASSBUS в системе сбора данных установки ВЕС. — Препринт ИФВЭ 95–76, Протвино, 1995.
- [4] Исаев А.Н. и др. Аппаратура для буферизации данных в системе МИСС. — Препринт ИФВЭ 99–31, Протвино, 1999.
- [5] Копиков С.В. и др. Скоростной канал МИСС-ISA в системе сбора данных установки ВЕС. — Препринт ИФВЭ 98–86, Протвино, 1998.
- [6] CY7C68001 EZ-USB SX2 High-Speed USB Interface Device, Cypress Semiconductor Corporation, Document #:38-08013 Rev.D.
- [7] <http://www.kernel.org/pub/linux/utils/kernel/hotplug/udev.html>
- [8] <http://castor.web.cern.ch/castor/index.htm>
- [9] <http://www.oea.ihep.su/db.shtml>
См. также:
http://www.oea.ihep.su/cgi-bin/oea/getfile.pl?dirpath=proc_elec/sys_comp/add_contr&filename=4170.txt

Рукопись поступила 1 июля 2010 г.

А.В. Ивашин, В.Д. Матвеев, Ю.А. Хохлов
Модернизированная система сбора данных установки ВЕС. Технические аспекты.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы **ИТ_EX**.
Редактор Л.Ф. Васильева

Подписано к печати 12.07.2010. Формат 60 × 84/8. Офсетная печать.
Печ.л. 1,4. Уч.-изд.л. 2,2. Тираж 80. Заказ 53. Индекс 3649.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий
142281, Протвино Московской обл.

