

УДК 621.396.9

АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ И ЗАПУСКА ДЕТЕКТОРА КМД-3

В. М. Аульченко^{1,2}, Д. А. Епифанов^{1,4}, А. Н. Козырев^{1,3},
И. Б. Логашенко^{1,2}, А. С. Попов^{1,2}, А. А. Рубан^{1,2}, А. Н. Селиванов¹,
А. А. Тальшев^{1,2}, В. М. Титов¹, Ю. В. Юдин¹, Л. Б. Эпштейн^{1,3}

¹Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН,
630090, Россия, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

²Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2

³Новосибирский государственный технический университет,
630073, Россия, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20

⁴University of Tokyo, Department of Physics,
7-3-1 Hongo Bunkyo-ku Tokyo, 113-0033, Japan
E-mail: AKozyrev@inp.nsk.su

Для проведения прецизионных экспериментов с детектором КМД-3 ускорительно-накопительного комплекса ВЭПП-2000 в Институте ядерной физики СО РАН была спроектирована, разработана и произведена специализированная электроника сбора данных. Представлена структура аппаратных средств электроники.

Ключевые слова: физика высоких энергий, детекторы, системы сбора данных, обработка сигналов.

Введение. В 2010 году в Институте ядерной физики (ИЯФ) СО РАН начались эксперименты на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-2000 [1] в области энергий до 2 ГэВ в системе центра масс (с.ц.м.). Для проведения экспериментов в 2000–2010 гг. был спроектирован и создан универсальный детектор элементарных частиц КМД-3 [2, 3], в состав которого входят магнитный спектрометр и электромагнитный калориметр. Физическая программа экспериментов на ВЭПП-2000 включает в себя изучение сильных взаимодействий в доступной области энергий. Одной из основных задач КМД-3 является прецизионное измерение сечений рождения адронов в электрон-позитронной аннигиляции [4], что чрезвычайно важно для выяснения вклада адронной поляризации вакуума в аномальный магнитный момент мюона [5].

Цель данной работы — представить созданную специализированную электронику системы сбора данных (ССД) для проведения прецизионных экспериментов с детектором КМД-3 на комплексе ВЭПП-2000.

Общие требования к электронике нового детектора КМД-3. Система сбора данных детектора КМД-3 [6] должна решать несколько задач одновременно, как то: сбор и доставка данных для систем первичного триггера, обеспечение сигналов синхронизации для измерителей времени, запуск измерений, сбор оцифрованных данных, взаимодействие с системами ускорителя, калибровка коэффициентов и эффективности, контроль статуса.

При создании ССД для детектора КМД-3 аппаратная часть разработана заново, так как состав и параметры новой электроники должны были соответствовать структуре нового детектора. В табл. 1 перечислены основные системы детектора КМД-3 и указаны число и тип регистрируемых данных. Всего система должна обслуживать около 15000 независимых каналов электроники.

Таблица 1

Система	Число каналов/разрешение, бит		
	Заряд	Время	Загрузка
Дрейфовая камера (ДК)	2436/14	1218/14	1218/16
Z-камера (ZK)	48/14	48/14	48/16
	512/12	512/8	512/16
Калориметр на основе кристаллов CsI	1152/12	80/12	80/16
Калориметр на основе кристаллов LXe	2376/12	264/12	80/16
Калориметр на основе кристаллов BGO	680/12	48/12	48/16
Времяпролётная система TOF (Time of Flight)	32/14	32/14	48/16
μ -система (мюонная система)	96/14	96/14	96/16

Ожидаемая светимость комплекса ВЭПП-2000 составляет порядка $3 \cdot 10^{31} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ при энергиях 1 ГэВ в с.ц.м. и $10^{32} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ при энергиях 2 ГэВ в с.ц.м. Ожидаемая частота событий при такой светимости примерно 1000 Гц. При допустимом уровне просчётов событий в несколько процентов «мёртвое» время электроники не должно превышать 50–70 мкс.

Поскольку предполагаемое временное разрешение измерительной электроники должно составлять 150–200 пс, то джиттер системы синхронизации должен быть не более 50 пс.

Структура системы сбора данных КМД-3. Электроника спроектирована в соответствии с современными тенденциями разработки радиоэлектронной аппаратуры с использованием коммерчески доступной элементной базы. Предназначенная для проведения прецизионных экспериментов с детектором КМД-3 на ускорительно-накопительном комплексе ВЭПП-2000 в ИЯФ СО РАН электроника удовлетворяет всем основным требованиям специфики экспериментов, а также дополнительным требованиям, связанным с размещением в экспериментальном зале, особенностями инфраструктуры и эксплуатации. Функциональная блок-схема электроники ССД детектора КМД-3 представлена на рис. 1.

Система сбора данных КМД-3 принимает от ускорителя сигналы блокировки на время операций с пучком и сигнал синхронизации к моменту столкновения пучков в детекторе. Кроме того, ССД принимает сигнал частоты ВЧ-резонатора накопительного кольца для обеспечения высокой точности измерения времени.

Для электроники КМД-3 не вводятся жёсткие требования на конструктивное исполнение отдельных модулей, а единство системы достигается введением общих требований на интерфейсы систем обмена информацией. Единые требования охватывают потоки экспериментальных данных, команд запусков, блокировки и синхронизации работы модулей. Для этого был специально создан единый тип интерфейса C-Link (Chronopher-Link). Каждый блок ССД оснащён не менее чем одним таким интерфейсом.

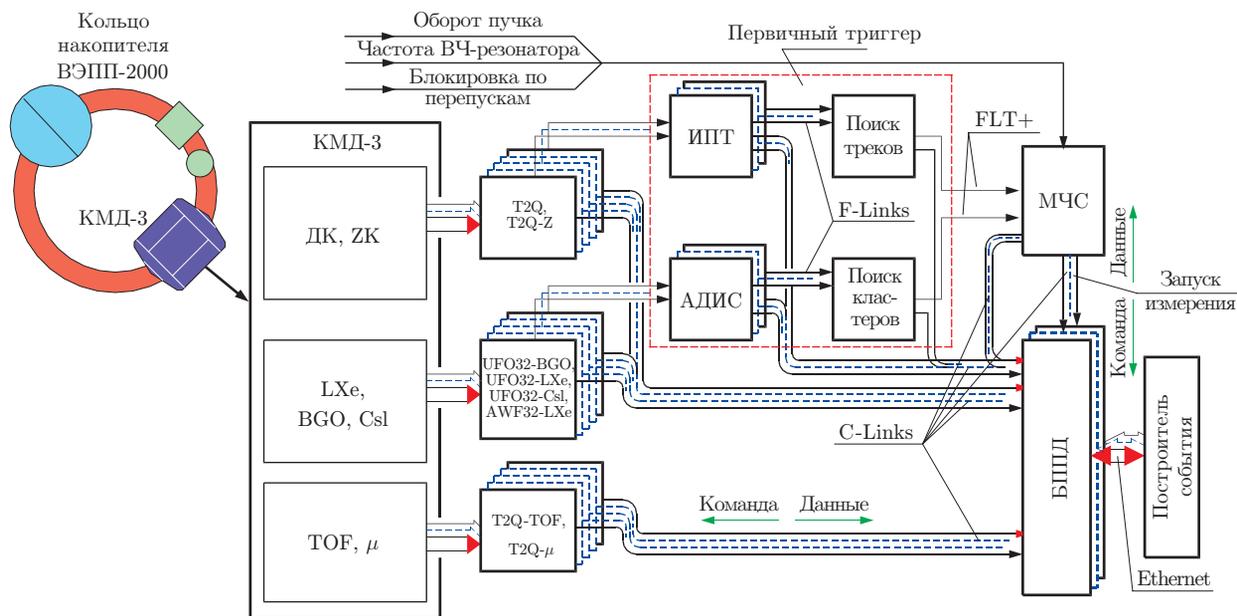


Рис. 1

Модуль частот и синхронизации (МЧС) принимает сигналы первичного триггера, синхронизирует их с моментом столкновения пучков и генерирует команды на запуск измерения. Команды распространяются по интерфейсу C-Link к блокам приёма—передачи данных (БППД), а оттуда — к каждому блоку ССД детектора.

В ответ на команду каждый блок ССД детектора выдаёт порцию информации, которая возвращается по C-Link в БППД. Здесь эти данные буферизуются в ОЗУ, упаковываются и пересылаются в построитель события по интерфейсу Ethernet.

Регистрирующая электроника представлена тремя унифицированными семействами блоков (T2Q, UFO32 и AWF32 [7]), предназначенными для различных типов измерений. В рамках каждого семейства имеется по несколько модификаций, унифицированных по элементной базе, основным внутренним архитектурным решениям и конструктивному исполнению.

Семейство плат T2Q осуществляет регистрацию заряда и времени поступления коротких импульсов наносекундного диапазона и применяется на детекторе для работы с проволочными камерами и быстрыми сцинтилляционными счётчиками. Имеется несколько модификаций, удовлетворяющих особенностям систем: ДК, ЗК, μ -система, TOF.

Семейство плат UFO32 служит для измерения заряда и энерговыделения в калориметрах. Плата производит формирование входного сигнала в микросекундном диапазоне и измеряет амплитуду сформированных сигналов с помощью пикового детектора. Эти платы имеют несколько модификаций, удовлетворяющих особенностям систем: CsI-, BGO- и жидкоксеноновый (LXe) калориметры.

Семейство плат AWF32 предназначено для измерения заряда и времени в калориметрических системах. В отличие от UFO32, которая работает в режиме «Старт/Стоп» и производит аналоговую обработку сигналов, плата AWF32 непрерывно оцифровывает сигналы, вычисляет их характеристики алгоритмами цифровой обработки сигналов (ЦОС) и применяется в LXe-калориметре и Z-камере.

Система первичного триггера состоит из интерфейсных блоков (ИПТ, АДИС), осуществляющих подготовку аргументов для решающих блоков (устройства поиска треков и кластеров). Для передачи аргументов из интерфейсных блоков в решающие применяется

F-Link (Fast-Link) — последовательная линия передачи данных со скоростью 375 Мбит/с. Работа триггерной электроники использует конвейерный метод обработки данных. Это позволяет исключить зависимость эффективности триггера от загрузки, что критически важно для прецизионных измерений. Систему первичного триггера условно можно разделить на «заряженную» и «нейтральную» части для камер и калориметров соответственно. Поток данных на входе в систему заряженного триггера одноступенчатый и составляет примерно 5 Гбит/с, а в системе нейтрального триггера — двухступенчатый: на первой ступени после аналого-цифрового преобразования составляет 224 Гбит/с, а на второй ступени после обработки алгоритмами ЦОС — 5,5 Гбит/с.

Новая электроника ССД КМД-3 имеет модульную структуру. Блоки приёма—передачи данных можно каскадировать, за счёт чего увеличивается число подключённых каналов электроники. Интерфейс C-Link позволяет поддерживать синхронность всей системы независимо от числа каналов и даже независимо от скоростей обмена между отдельными блоками.

Единый Скелетный проект. При разработке ССД особое внимание уделено вопросу унификации строения внутренних узлов электроники. Для этого был специально разработан Скелетный проект для программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) структуры FPGA, используемой в логической части всех блоков.

Основная идея разработки Скелетного проекта заключается в применении одних и тех же решений в разных устройствах и их версиях. Проект представляет собой набор функционально выделенных, законченных и отлаженных модулей, обладающих унифицированными интерфейсами и общими методами их реализации. Данный проект выполнен в виде кода на языке AHDL в полностью синхронном стиле, т. е. в проекте не используются ни вентиляльные задержки, ни асинхронные входы управления, ни схемы контроля тактового сигнала. Это позволяет переносить его на новые устройства, не требуя дополнительной отладки и верификации. Структурная схема Скелетного проекта приведена на рис. 2.

Аппаратная часть проекта описана в виде изолированных модулей, ориентированных на конкретные задачи, выполняемые блоком. Основой Скелетного проекта являются

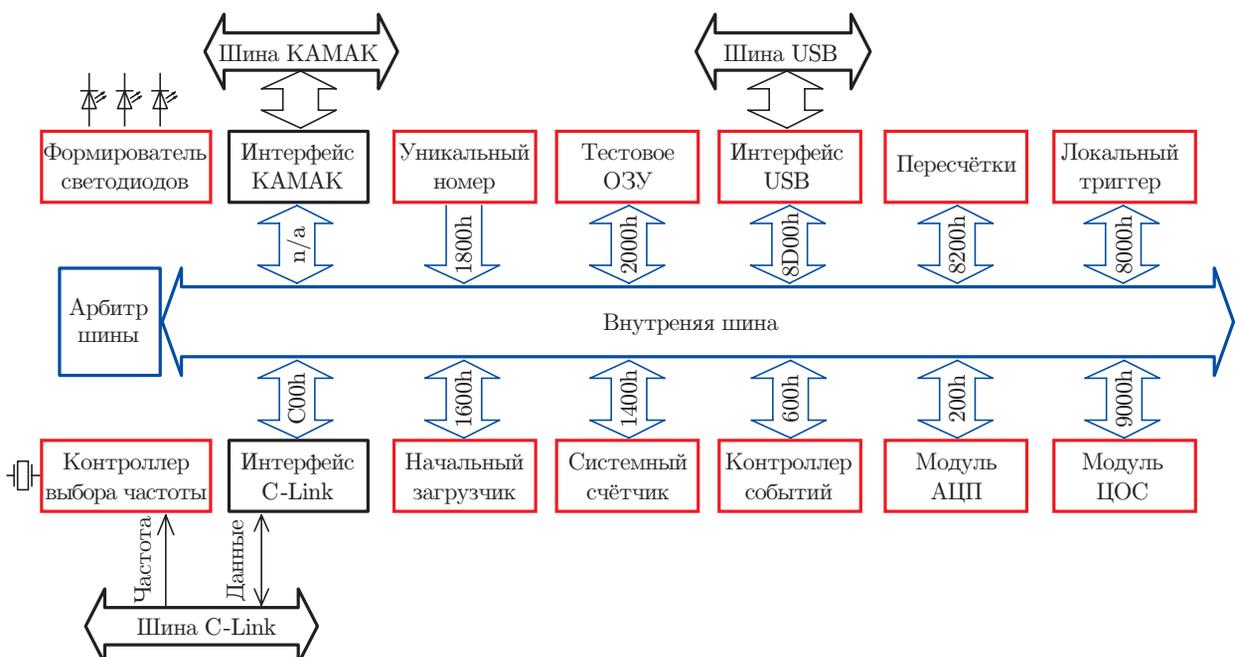


Рис. 2

внутренняя шина и модуль арбитр шины. Все модули подключаются к внутренней шине проекта стандартным образом, что позволяет упростить подключение новых модулей и их размещение в адресном пространстве. Эта шина имеет 16-битную ширину как для данных, так и для адресов модулей, к ней подключённых.

Шина предусматривает подключение модулей двух типов — ведущего и ведомого. Ведущий модуль способен запрашивать доступ на шину, захватывать шину и производить обмен данными. Ведомый модуль только отвечает на запросы, принимая либо отдавая данные. Как правило, модуль, способный быть ведущим, может быть и ведомым. Ведущий модуль, получив управление шиной, выставляет адрес устройства, обмен с которым он будет производить, задаёт направление обмена данными. Арбитр шины разрешает конфликты и обеспечивает разделение обращений различных модулей на шину.

Цикл обращения по шине занимает несколько тактов. Хотя каждое изменение состояния сигналов на шине происходит синхронно с тактовым генератором, сам цикл доступа не фиксирован во времени, а базируется на сигнале подтверждения готовности. На рис. 3 показана последовательность изменения состояний сигналов во время цикла обмена.

Для того чтобы произвести обмен по шине, модуль, способный быть ведущим, выставляет сигнал «Запрос доступа». Этот сигнал поступает к арбитру шины. Если одновременно поступает несколько запросов, арбитр использует приоритетную схему для выбора устройства, запрос которого будет обработан в первую очередь. Выбранному ведущему модулю от арбитра возвращается сигнал «Доступ разрешён», и он может выставить на шину адрес ведомого модуля, с которым необходимо произвести обмен. После этого устанавливается сигнал «Адрес верен», чтобы ведомый модуль начал дешифрацию адреса. Если выставленный адрес соответствует данному ведомому модулю и он готов ответить на обращение, то арбитра передаётся сигнал готовности «Ведомый готов». В ответ арбитр выставляет сигнал «Строб данных» на один период тактового генератора. Этот сигнал не только позволяет модулю-приёмнику защёлкнуть данные с шины, но и служит сигналом окончания цикла обмена на шине. Если возникает ситуация, когда ни один из модулей не ответил, то по истечении таймаута цикл будет завершён принудительно и арбитром будет выставлен сигнал ошибки. Далее может быть начат следующий цикл обмена на шине.

На рис. 2 прямоугольниками показаны служебные модули, реализованные в большинстве плат электроники ССД КМД-3. Цифрами внутри стрелок обозначены базовые адреса модулей при доступе к ним по шине проекта. Модули интерфейсов КАМАК, USB и C-Link могут быть как ведущими, так и ведомыми и обеспечивают взаимодействие с внешними стандартными шинами КАМАК, USB и C-Link соответственно.

Каждый модуль может содержать внутренний набор адресов. При обращении к какому-либо адресу внутри модуля надо сложить величины базового адреса модуля и адрес

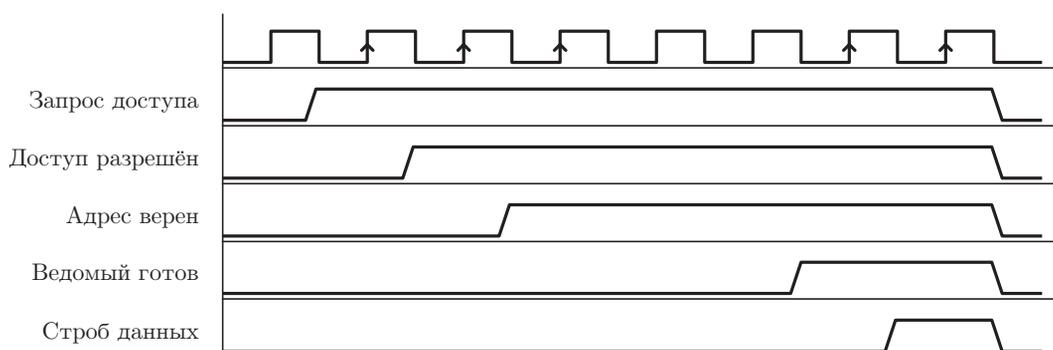


Рис. 3

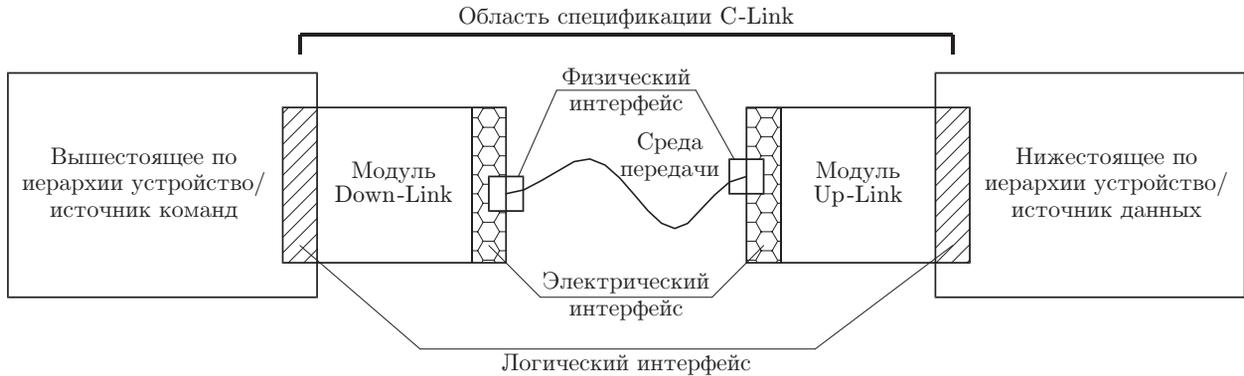


Рис. 4

ресурса внутри модуля. Определённый таким образом адрес используется при доступах как с шины USB, так и с шины КАМАК или шины C-Link.

Интерфейс C-Link — это набор сервисов, обеспечивающих взаимодействие всех блоков электроники ССД КМД-3 между собой и осуществляющих связь по принципу «точка—точка» (p2p). Так как посылка несимметрична, то выделяются модуль-инициатор Down-Link и модуль-ответчик Up-Link (рис. 4), которые могут входить в состав каждого блока электроники.

Модель C-Link состоит из четырёх уровней: физического, сигнального, уровня обмена и канального.

Физический уровень — нижний уровень модели, определяющий метод передачи данных, тип модуляции, электрические уровни сигналов, среду передачи и электрический соединитель. Основные технические параметры физического уровня C-Link приведены в табл. 2.

В интерфейсе C-Link по одной витой паре всегда передаётся тактовый сигнал от передатчика (Down-Link) к приёмнику (Up-Link) (рис. 5). Это меандр, частота которого равна 25 МГц. Он используется не для синхронизации данных, а для синхронизации измерителей времени. По второй витой паре передаются данные.

Сигнальный уровень отвечает за комбинацию битовых полей внутри посылки, скорость передачи и формирование избыточных кодов контроля целостности посылки. Любая посылка состоит из командной и ответной частей. Способ обмена между Down-Link и Up-Link происходит в два этапа. Сначала Down-Link отправляет командную посылку размером 152 бита. Она содержит в себе:

- 1) команду (код операции), т. е. задаёт операцию, исполняемую блоком электроники (размер 8 бит);
- 2) номер события — слово данных, имеющее различный смысл в разных командах (размер 16 бит);
- 3) 8 слов данных (размер 128 бит).

Таблица 2

Технические параметры C-Link	Значения
Модуляция	Два уровня: лог.0 = high, лог.1 = low
Скорость передачи	25 Мбит/с (возможно 50, 100 Мбит/с)
Уровни напряжения	LVDS, 4 мА, как в стандарте IEEE1394
Среда передачи	две витые пары
Электрический разъём	USB, тип А

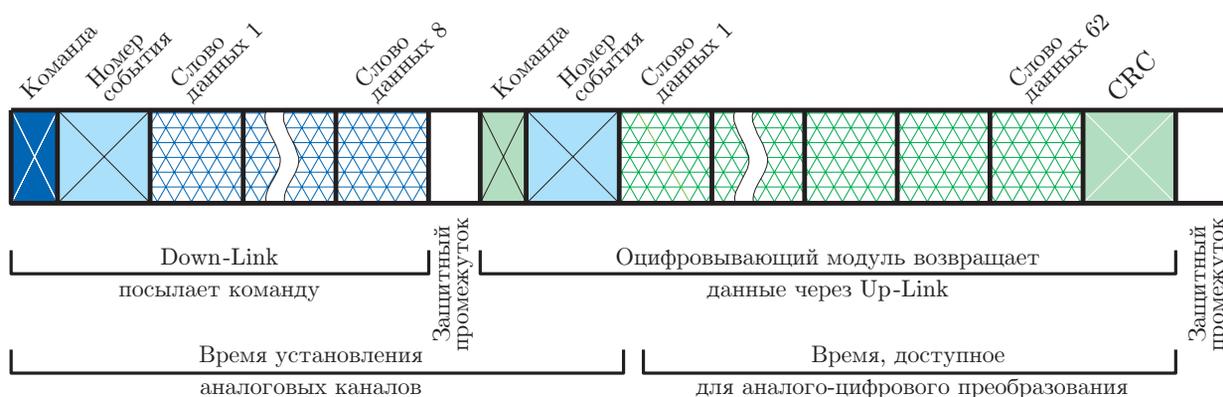


Рис. 5

Далее следует защитный промежуток (320 нс) для того, чтобы приёмопередатчики LVDS переключились с приёма на передачу в Up-Link и с передачи на приём в Down-Link. После чего Up-Link отправляет ответную посылку размером 1032 бита. Ответная посылка содержит в себе:

- 1) команду (код операции), т. е. повторяет команду, полученную в командной посылке (размер 8 бит);
- 2) номер события повторяет слово данных, полученное в командной посылке (размер 16 бит);
- 3) 62 слова данных (размер 992 бита);
- 4) CRC — циклический избыточный код посылки для контроля целостности (размер 16 бит).

Поле «Номер события» в зависимости от команды интерпретируется как адрес внутреннего ресурса блока электроники или используется как маркер события. Наличие такого маркера позволяет собирать все данные каждого события из отдельных посылок, поступающих от измерительных блоков, независимо от разницы задержек при передаче данных в ЭВМ.

Уровень обмена. На этом уровне принимается решение об успешности обмена. Здесь задаётся механизм управления потоками информации и гарантируется достоверность принятых данных.

Канальный уровень распределяет данные по внутренним ресурсам (ВР) блока электроники. Для этого используется узел, называемый редиректором, который размещается в специальном двухпортовом ОЗУ размером 1 Кбайт, разбитом на 16 страниц по 64 слова в каждой. Страницы объединены по парам (одна страница для адреса, другая для данных). Выбор исполняемой пары производится в соответствии с командой (кодом операции), пришедшей по C-Link. В первой странице пары лежат 16-битные слова (указатели), адреса ячеек ВР, к которым будет производиться доступ. Во второй странице пары лежат предустановленные данные для записи в ВР (при операциях чтения эта страница не используется). Наличие программируемого списка позволяет задавать структуру данных для событий разного типа. Например, в ответ на команду 193 («Запуск измерения») редиректор запрограммирован так, что блоки регистрирующей электроники возвращают результаты аналого-цифрового преобразования. На команду 210 блоки выставляют в ответ данные пересчётных схем, датчиков температуры и т. п. По команде 217 («Установка блокировки») блоки переводятся в режим блокировки на время перепуска ускорителя, для чего в ВР записываются соответствующие конфигурационные параметры (например, высокие значения порогов дискриминаторов). По команде 226 («Снятие блокировки») конфи-

гурация блоков возвращается в рабочее состояние. Наличие нескольких режимов работы блоков позволяет использовать единую инфраструктуру сбора информации как для чтения данных эксперимента, так и для чтения мониторирующей информации.

Заключение. Начиная с декабря 2010 года детектор КМД-3 ИЯФ СО РАН набирает данные на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-2000. Для проведения прецизионных экспериментов с детектором КМД-3 на ускорительно-накопительном комплексе ВЭПП-2000 была спроектирована, разработана и произведена специализированная электроника сбора данных. Отличительной особенностью электроники является совмещение средств синхронизации и передачи данных в единой среде (С-Link). Проектные параметры электроники достигнуты. На текущий момент в составе электроники детектора КМД-3 работает 316 блоков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Berkaev D., Kirpotin A., Koop I. et al.** VEPP-2000 operation with round beams in the energy range from 1 to 2 GeV // Nucl. Phys. B. Proc. Suppl. 2012. **225–227**. P. 303–308.
2. **Khazin B. I.** Physics and detectors for VEPP-2000 // Nucl. Phys. B. Proc. Suppl. 2008. **181–182**. P. 376–378.
3. **Fedotov G. V., CMD-3 Collaboration.** CMD-3 detector for VEPP-2000 // Nucl. Phys. B. Proc. Suppl. 2006. **162**. P. 332–338.
4. **Eidelman S.** Physics at VEPP-2000 // Nucl. Phys. B. Proc. Suppl. 2006. **162**. P. 323–326.
5. **Muon G-2 Collaboration (Bennett G. W., Bousquet B., Brown H. N. et al.)** Final report of the muon E821 anomalous magnetic moment measurement at BNL // Phys. Rev. D. 2006. **73**. 072003.
6. **Ruban A. A., Aulchenko V. M., Kozyrev A. N. et al.** The CMD-3 data acquisition and control system // Nucl. Instrum. Meth. A. 2009. **598**, N 1. P. 317–322.
7. **Kozyrev A. N., Aulchenko V. M., Epshteyn L. B. et al.** The CMD-3 TOMA DAQ infrastructure // Journ. Instrum. 2014. **9**. C10016.

Поступила в редакцию 21 октября 2014 г.
