

СВЕТОДИОДНАЯ МОНИТОРНАЯ СИСТЕМА ФОТОННОГО
СПЕКТРОМЕТРА PHOS В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ALICE НА БОЛЬШОМ
АДРОННОМ КОЛЛАЙДЕРЕ© 2012 г. М. Ю. Боголюбский, Д. И. Паталаха, В. С. Петров, Б. В. Полищук,
А. С. Соловьев, С. А. Садовский, В. А. Сенько, Ю. В. Харлов

ГНЦ РФ “Институт физики высоких энергий”

Россия, 142281, Протвино Московской обл., ул. Победы, 1

Поступила в редакцию 21.04.2011 г.

Описана светодиодная мониторинговая система фотонного спектрометра PHOS в эксперименте ALICE на Большом адронном коллайдере в CERN. Спектрометр включает в себя три модуля в виде матриц 64×56 из кристаллов вольфрамата свинца (PWO). В качестве источников тестовых световых сигналов используются сверхяркие зеленые светодиоды Kingbright L934SGC с индивидуальной аппаратной регулировкой интенсивности световых вспышек в каждом канале спектрометра. Система обеспечивает настройку и контроль электроники на стадии подготовки к физическому запуску модулей PHOS, а также позволяет проводить специальные тестовые измерения со спектрометром без использования частиц высоких энергий. Кроме того, в ходе эксперимента она позволяет оперативно вести мониторинг каждого канала спектрометра, а также отслеживать температурные вариации световых кристаллов PWO. Долговременная относительная стабильность мониторинга каналов обеспечивается при этом на уровне $1.2 \cdot 10^{-3}$.

1. ВВЕДЕНИЕ

Описываемая ниже светодиодная мониторинговая система (м.с.) была создана для работы с фотонным спектрометром PHOS (Photon Spectrometer), который используется в эксперименте ALICE [1] на Большом адронном коллайдере LHC (Large Hadron Collider) в CERN для регистрации и прецизионного измерения параметров фотонов в широком диапазоне энергий и в условиях большой множественности вторичных частиц, характерной для центральных столкновений тяжелых ионов при энергиях LHC. Спектрометр PHOS является электромагнитным калориметром сцинтилляционного типа, состоящим в начальном варианте из пяти модулей в виде матриц 64×56 кристаллов вольфрамата свинца $PbWO_4$ (PWO) [2] производства компании “Северные кристаллы” (г. Апатиты Мурманской обл., Россия) [3]. Соответственно каждый модуль спектрометра имеет по 3584 канала считывания данных. Геометрические размеры кристаллов были выбраны равными $2.2 \times 2.2 \times 18$ см, чтобы по возможности уменьшить эффекты перекрытия ливней в событиях с большой множественностью.

Для регистрации световых сигналов от электромагнитных ливней к заднему торцу кристаллов приклеены лавинные фотодиоды Hamamatsu S8148/S8664-55 с площадью чувствительной поверхности каждого 5×5 мм², квантовой эффективностью 60–80% и максимумом чувствительности, соответствующим длине волны 600 нм. Сигнал с фо-

тодиодов поступает на вход низкошумящего интегрирующего (зарядочувствительного) предусилителя с нагрузкой на псевдогауссов фильтр. Оцифровка временного профиля выходных сигналов осуществляется электроникой ALTRO [4] с частотой 10 МГц.

Каждый канал предусилителя имеет два выхода, соответствующие большому и малому коэффициентам усиления, что обеспечивает два разных диапазона измерения энерговыделения в кристалле: 5 МэВ–5 ГэВ и 80 МэВ–80 ГэВ. В каждом диапазоне амплитуда измеряется аналого-цифровым преобразователем с дискретностью 10 бит. В результате эффективный динамический диапазон измерения амплитуд составляет 14 бит. Функционально вся электроника одного модуля PHOS разбита на 4 идентичных блока, каждый из которых обслуживает 1/4 часть модуля. Для обработки данных используются алгоритмы, описанные в работе [5].

Согласно техническому проекту, спектрометр PHOS должен работать при температуре кристаллов -25°C , стабилизированной с точностью 0.1°C . Допускается его работа и в условиях стандартной температуры $+18^\circ\text{C}$, поддерживаемой на глубине 100 м в шахте эксперимента ALICE. Для надежной работы спектрометра предусмотрен тщательный контроль как внешних условий, так и критических параметров спектрометра и электроники в процессе измерений. Задачу комплексного контроля работы всех составляющих элементов спектрометра решает система медленного контроля

DCS спектрометра PHOS, частью которой является описываемая в данной работе мониторинговая система спектрометра. Мониторинг каналов спектрометра осуществляется при помощи световых импульсов от соответствующих светодиодов LED (Light-Emitting Diodes) с регулировкой амплитуды и частоты повторения импульсов в широких диапазонах.

Применение светодиодов для мониторинга уже было апробировано ранее в некоторых аналогичных системах [6–11]. При этом использование светодиодов имеет ряд преимуществ перед другими возможными источниками световых импульсов, например лазерами [12–14]. В частности, в такой системе подбором типа фотодиода и режима его работы легко добиться, чтобы при заданной длине волны излучаемого света форма и длительность световых импульсов имитировали световые вспышки в кристаллах, возникающие при развитии в них электромагнитных ливней. К другим особенностям данной м.с. относятся: независимое управление каждым светодиодом с возможностью регулировки амплитуды световой вспышки в каждом канале спектрометра, полное отсутствие оптико-механических коммутаторов, аттенуаторов и распределителей света.

Описываемая м.с. на стадии сборки модулей PHOS является эффективным инструментом контроля как прозрачности кристаллов PWO и оптических контактов между кристаллами и лавинными фотодиодами, так и коэффициентов усиления электронного тракта, его линейности и стабильности, включая сами фотодиоды, предусилители и электронику амплитудного анализа. Одновременно эта система оказалась очень эффективной при запуске спектрометра в шахте эксперимента, а также в процессе его эксплуатации для комплексного контроля функционирования спектрометра в целом. Результаты испытаний прототипа мониторинговой системы были опубликованы ранее [15]. В данной статье описан окончательный вариант системы, работающей в условиях реального эксперимента начиная с 2009 г.

В статье приведены предъявляемые к м.с. требования, описаны ее конструкция, принципы построения и электроника управления системой, результаты использования м.с. для настройки и контроля модулей PHOS, а также для мониторинга работы отдельных каналов спектрометра. Описываемая м.с. может быть использована и для калибровки спектрометра, но этот материал выходит за рамки данной статьи и будет представлен в других работах, как и программное обеспечение мониторинговой системы.

2. ТРЕБОВАНИЯ К МОНИТОРНОЙ СИСТЕМЕ СПЕКТРОМЕТРА

2.1. Функциональные требования к м.с.

Функциональные параметры м.с. определяются требованиями, предъявляемыми к спектрометру PHOS в эксперименте ALICE во время экспозиции установки на сталкивающихся *pp*- и *PbPb*-пучках коллайдера LHC, а также на стадии запуска и настройки спектрометра в составе эксперимента ALICE. При подготовке технического проекта спектрометра PHOS [2] в качестве основных были сформулированы следующие требования к мониторинговой системе:

- возможность быстрого контроля работоспособности системы считывания данных со спектрометра DAQ (Data Acquisition) на стадии подготовки установки к запуску;

- возможность оперативной проверки таблицы соответствия каналов электроники и кристаллов спектрометра;

- возможность быстрого измерения параметров временного профиля выходных сигналов для каждого канала спектрометра;

- индивидуальное мониторингирование каждого канала спектрометра во всем динамическом диапазоне по амплитуде сигналов;

- возможность измерения отношения коэффициентов усиления каждого канала спектрометра с целью калибровки каналов электроники с низким усилением по данным с каналов высокого усиления;

- возможность предварительной калибровки каналов спектрометра с использованием паспортных данных кристаллов PWO по их световыходу без экспозиции спектрометра на пучке;

- точность мониторингирования временной вариации отношения калибровочных коэффициентов для различных каналов спектрометра должна быть не хуже $3 \cdot 10^{-3}$.

2.2. Функциональные и конструктивные особенности м.с.

Для выполнения указанных выше требований в м.с. предусмотрена возможность программным путем регулировать частоту световых вспышек светодиодов, фиксировать или варьировать от события к событию их яркость, а также формировать перед кристаллами спектрометра светящиеся образы различных статических или движущихся объектов в виде, например, линий различной длины из светящихся светодиодов, “шахматной доски” или просто одной “точки”, т.е. одного светодиода с заданными координатами в модуле. Обычно конфигурация активных светодиодов выбиралась в виде набора динамических полос из двух смежных рядов типа “зебра”, двигающихся по поверх-

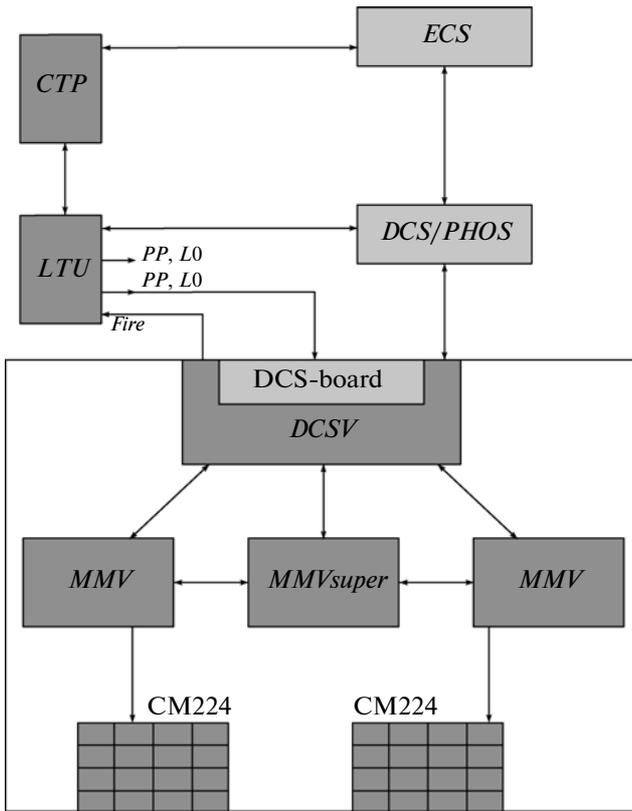


Рис. 1. Общая блок-схема м.с. и ее интегрирование в инфраструктуру спектрометра PHOS в эксперименте ALICE. *ECS* – система управления экспериментом; *DCS/PHOS* – система медленного контроля спектрометра PHOS; *CTP* – центральный триггерный процессор; *LTU* – локальное триггерное устройство; *DCSV* – контроллер мониторинговой системы; *DCS-board* – одноплатный компьютер; *MMV* – мастер-модуль мониторинговой системы (для упрощения на рисунке показаны только два мастер-модуля *MMV* с соответствующими наборами светодиодных плат *CM224*); *MMVsuper* – мастер-модуль с функцией обеспечения синхронизации работы всей м.с. при самозапуске; *CM224* – светодиодный модуль; *PP, L0* – оптические сигналы, используемые для синхронизации; *Fire* – сигнал м.с., сопровождающий поджиг светодиодов.

ности модулей спектрометра от события к событию также на два ряда.

Мода функционирования м.с. с фиксированной яркостью вспышек светодиодов используется для контроля работы электроники спектрометра и мониторинга работоспособности каналов спектрометра между физическими измерениями. Мода работы м.с. с варьируемой амплитудой, в которой яркость всех светодиодов меняется от события к событию, применяется для калибровки отношения коэффициентов усиления каналов спектрометра с низким и высоким усилением, для быстрой предварительной калибровки каналов спектрометра по измеряемой зависимости дисперсии *LED*-пиков от их средней амплитуды, а также для мониторинга всех каналов на стадии запуска

модулей спектрометра, когда еще не проведено выравнивание каналов спектрометра по усилению лавинных фотодиодов посредством индивидуальной подстройки подаваемого на них высокого напряжения.

Основная конструктивная особенность рассматриваемой м.с. состоит в том, что матрицы светодиодов (один светодиод на кристалл спектрометра) расположены внутри холодного термостабилизированного объема модулей спектрометра так, что в передний торец каждого кристалла смотрит свой светодиод. Поскольку световыход кристаллов *PWO* зависит от их температуры (световыход возрастает в три раза при уменьшении температуры от комнатной до -25°C), то внутри термостабилизированного объема модуля не должно быть температурных искажений от тепловыделения при работе м.с. Как было показано еще на стадии испытания прототипа м.с. [15], это требование легко может быть выполнено, если в м.с. использовать сравнительно недорогие сверхяркие зеленые светодиоды Kingbright L934SGC [16], спектр свечения которых близок к спектру реальных сцинтилляционных вспышек в кристаллах *PWO* при развитии в них электромагнитных ливней, и учесть спектральную чувствительность лавинных фотодиодов S8148/S8664-55.

Отметим в связи с этим, что светодиоды не являются абсолютно температурно-стабильными источниками света, и имеющиеся в литературе данные [17] свидетельствуют о том, что диоды зеленого свечения, аналогичные L934SGC, при температурах выше 180 К показывают небольшое уменьшение квантовой эффективности высвечивания с ростом температуры. Однако, согласно техническим условиям эксплуатации спектрометра PHOS, температура в холодном объеме модулей, где расположены, в том числе, и светодиодные матрицы мониторинговой системы спектрометра, стабилизирована с точностью 0.1°C , в результате чего возможная температурная нестабильность светодиодов становится в нашем случае несущественной.

3. СТРУКТУРА М.С. И ЕЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ

Общая блок-схема м.с., включая ее интеграцию в инфраструктуру спектрометра PHOS и эксперимента ALICE, показана на рис. 1. Мониторная система управляется дистанционно (включение/выключение, подача питания, задание режимов работы и т.д.) через систему (медленного) контроля детектора *DCS* (Detector Control System) PHOS и систему контроля экспериментом *ECS* (Experiment Control System) ALICE. По командам оператора системы *ECS/DCS* с помощью разработанного матобеспечения *DCS/PHOS* задаются параметры работы м.с., а именно: частота поджига светодиодов, амплитуда световых вспышек и харак-

тер их изменения от события к событию, геометрическая конфигурация (“маска”) области поджигаемых светодиодов. Эти параметры транслируются в расположенные в шахте эксперимента управляющие модули м.с. спектрометра PHOS, которые непосредственно определяют и контролируют работу модулей светодиодных матриц внутри модулей PHOS. Управляющие и контрольные модули соединены между собой плоским многожильным кабелем длиной 35 м.

Управляющие модули м.с. конструктивно выполнены в стандарте Евромеханика 6U, установлены в специальной VME-корзине в одной из стоек триггерной электроники эксперимента ALICE. Корзина оснащена блоком программного управления, который осуществляет ее включение/выключение, задание номинальных напряжений питания и предельных токов потребления, а также контроль всех установленных значений. Для управления м.с. используются модули двух типов: модуль *DCSV*, выполняющий функции системного VME-контроллера мониторинговой системы и осуществляющий связь с *DCS* и *DAQ* системами эксперимента, и мастер-модули *MMV* для управления процессом поджига светодиодов. Количество модулей *MMV* равно числу используемых модулей спектрометра PHOS плюс один. Дополнительный *MMV*-модуль, называемый *MMVsuper*, служит для обеспечения синхронизации функционирования всех *MMV*-модулей в режиме самозапуска м.с.

Контрольные модули CM224 выполнены в виде печатных плат, на которых установлены светодиоды с необходимыми управляющими цепями. Каждая плата содержит матрицу из 16×14 светодиодов, расположенных с шагом 2.2×2.2 см, что определяется геометрическими размерами кристаллов спектрометра. Набор из 16-ти таких плат покрывает всю фронтальную поверхность модуля спектрометра так, что светодиоды смотрят на передние торцы соответствующих кристаллов. Передача данных и управление платами CM224 в каждом модуле PHOS осуществляется из соответствующего ему мастер-модуля *MMV* по плоскому кабелю с использованием последовательного протокола SPI [18]. Напряжение питания электроники плат CM224 формируется в модуле *MMV* и передается на платы с помощью того же кабеля. Контроллер *DCSV* является вновь разработанным блоком, мастер-модули *MMV* были существенно модернизированы по сравнению с используемыми в первом прототипе м.с. [15], а блоки CM224 остались в значительной степени такими же.

3.1. Режимы синхронизации м.с. с триггером ALICE

Синхронизация всех детекторов установки ALICE осуществляется стандартной серией триггерных сигналов *PP*, *L0*, *L1*, *L2*, [1, 19, 20], пере-

даваемых на каждый детектор по соответствующему оптическому кабелю. Сигнал *L0* появляется не позже чем через 1.2 мкс после произошедшего взаимодействия, сигналы *L1* и *L2* генерируются позже, т.е. после принятия решения об отборе данного события. Из указанных трех сигналов *L0–L2* для работы м.с. используется лишь сигнал *L0*. При этом м.с. спектрометра PHOS в силу специфики работы коллайдера используется только в ходе специальных калибровочных измерений (*LED runs*), в которых моменты прихода сигналов *L0* задаются генератором и поэтому строго детерминированы, причем появлению *L0* предшествует специальный триггерный сигнал – предимпульс *PP*.

Временные соотношения между сигналами определяются программируемым локальным триггерным устройством *LTU* (Local Trigger Unit) [20], обслуживающим светодиодную мониторинговую систему, спектрометр PHOS, а также другие детекторы. В свою очередь *LTU* взаимодействует с центральным триггерным процессором *CTP* (Central Trigger Processor) [21].

Оптический кабель, транспортирующий сигналы *PP*, *L0*, *L1*, *L2*, подсоединен к входу контроллера *DCSV*. Последний декодирует поступающую оптическую информацию с помощью одноплатного компьютера *DCS-board* [22], преобразует ее в соответствующие электрические сигналы и посылает два последовательных импульса *PP* и *L0* по одному коаксиальному кабелю на вход каждого мастер-модуля *MMV*. Импульсы *PP* и *L0* имеют различную длительность, 25 и 50 нс соответственно, что позволяет по этому признаку провести их отбор в *MMV*.

Синхронизация работы м.с. может осуществляться несколькими способами. Запуск м.с. можно инициировать по сигналу *PP*. Время, которое необходимо м.с. для проведения всех подготовительных действий перед поджигом светодиодов, составляет 84.5 мкс. Кроме того, сам поджиг, согласно требованиям регистрирующей электроники PHOS, должен происходить за 1.2 мкс до сигнала *L0*. Таким образом, исходя из этих условий, минимальное время между сигналами *PP* и *L0* составит $t_{\min} = (84.5 + 1.2)$ мкс = 85.7 мкс, что соответствует максимально возможной частоте работы м.с. $f_{\max} = 1/t_{\min} = 11.6$ кГц. После окончания подготовительной стадии м.с. переходит в состояние готовности, длительность которого определяется программно-регулируемой задержкой, после чего светодиоды поджигаются.

Второй вариант синхронизации использует вместо предимпульса *PP* импульс *L0*. В этом случае блок *MMV* в начале сеанса работы м.с. измеряет время Δt между двумя последовательными импульсами *L0* и запоминает эту величину. Далее, исходя из момента t_1 появления текущего сигнала

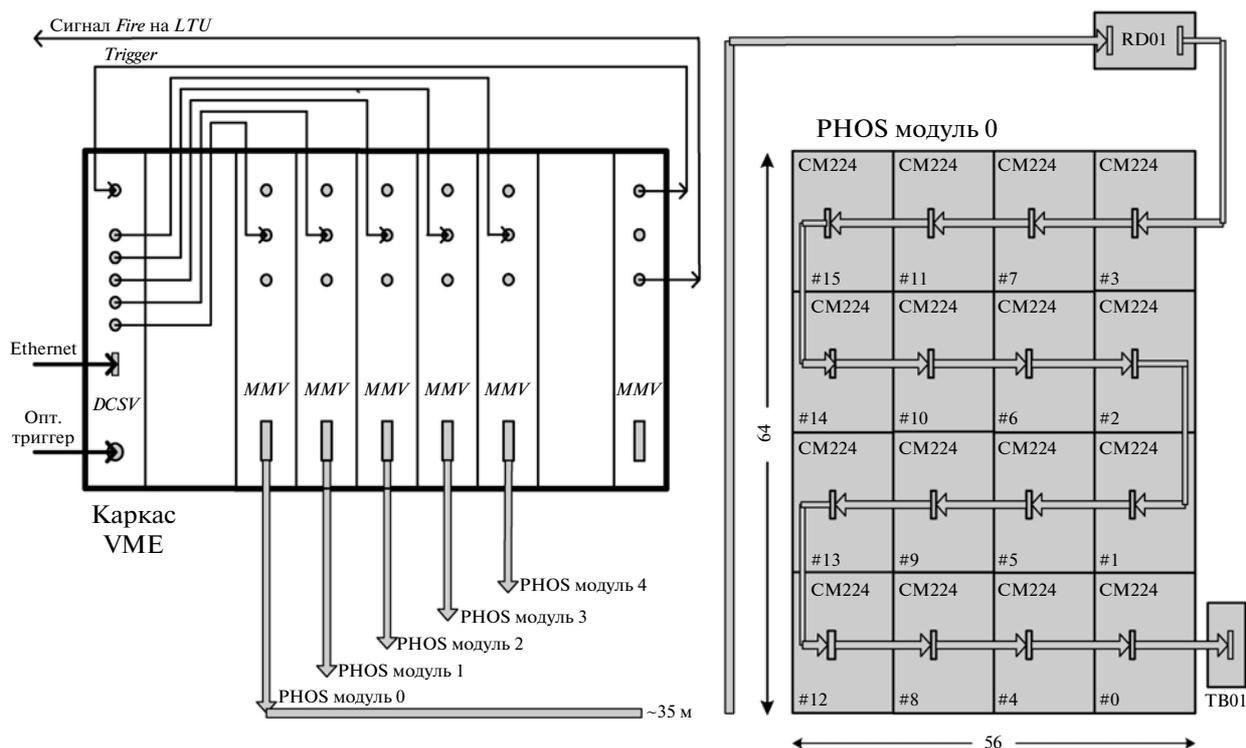


Рис. 2. Блок-схема электроники м.с. *DCSV* – системный контроллер мониторинговой системы; *MMV* – мастер-модуль мониторинговой системы; *CM224* – светодиодные модули; *RD01* – ретранслятор сигналов; *TB01* – терминатор.

$L0$, предсказывается время $t_2 = t_1 + \Delta t$ появления следующего сигнала $L0$ и рассчитывается момент старта мониторинговой системы $t_s = t_1 + \Delta t - t_{\min}$.

Третий вариант синхронизации м.с. не использует ни импульс PP , ни сигнал $L0$. В этом случае м.с. периодически с частотой f стартует сама (самозапуск). За некоторый интервал времени t_f перед поджигом светодиодов она вырабатывает сигнал $Fire$, который подается на вход LTU . Последний трансформирует его в стандартную серию триггерных сигналов и распределяет их между потребителями. Величины f и t_f задаются программно.

3.2. Структура блоков электроники м.с.

Структурная схема электроники м.с. представлена на рис. 2. Она включает в себя следующие блоки: контроллер *DCSV*, мастер-модуль *MMV* и контрольные модули в виде светодиодных плат *CM224*. Все модули *MMV*, а также контроллер *DCSV* установлены в программно-управляемом каркасе *VME*, который находится за защитой в шахте эксперимента вне зоны радиационного излучения. Модули *CM224* установлены непосредственно перед фронтальной поверхностью кристаллов внутри термостабилизированного холодного объема модулей *PHOS*.

3.2.1. Контроллер *DCSV* выполняет функции системного контроллера для блоков системы мо-

нитирования. Его схема представлена на рис. 3. Базовым элементом модуля является одноплатный компьютер *DCS-board* [22], специально разработанный для систем медленного контроля и управления экспериментальными установками в условиях работы на коллайдере *LHC*. Конструктивно контроллер *DCSV* реализован в стандарте *VME 6U* как блок одиночной ширины с мезонинно установленной на нем платой *DCS-board*.

Компьютер *DCS-board* содержит *ARM9* контроллер, реализованный на программируемой логической интегральной схеме (п.л.и.с.) *EPXA1-F484* фирмы *ALTERA*, контроллер локальной сети *Ethernet* и различные интерфейсные шины для связи с внешними устройствами. Оперативная память составляет 256 Мбайт. Компьютер не содержит механического жесткого диска, вместо него для хранения информации предусмотрена флэш-память *EPROM* объемом 32 Мбайт. В силу ограниченности размера флэш-памяти файловая система *Linux* монтируется на компьютере *DCS-board* так, что часть файлов физически размещается на других компьютерах кластера системы медленного контроля спектрометра *PHOS*. Работает компьютер под управлением операционной системы *ARM-Linux* [23] с соответствующим специализированным матобеспечением [24]. Конфигурирование и загрузка операционной системы осуществ-

ляются автоматически из флэш-памяти EPROM при включении питания.

Функционально модуль *DCSV* является интерфейсом между компьютером *DCS-board* и шиной VME. Он осуществляет прием сигналов с шины ввода/вывода компьютера и их передачу на шину VME. Протокол обмена данными и управление их передачей по кроссу VME не являются стандартными и соответствуют протоколу, используемому компьютером *DCS-board*.

Существенной особенностью компьютера *DCS-board*, важной для согласованной работы м.с. в составе эксперимента ALICE, является возможность принятия им кодированных оптических триггерных сигналов эксперимента с их последующей расшифровкой и преобразованием в электрические сигналы уровней LVDS. Для синхронизации работы м.с. в модуле *DCSV* предусмотрена схема управления триггерными сигналами. Она включает в себя преобразователи уровней LVDS–TTL для триггерных сигналов, декодированных компьютером из соответствующих оптических сигналов, а также преобразователи уровней NIM–TTL для работы с триггерной электроникой установки. После преобразования сигналы транслируются на выходные разъемы модуля *DCSV* и служат для запуска мастер-модулей *MMV* системы мониторинга модулей PHOS.

3.2.2. Мастер-модуль *MMV* может управлять 16-ю светодиодными платами CM224 (всего 3584 канала). Он реализован в конструктиве VME 6U как блок одиночной ширины, его схема представлена на рис. 4. Модуль *MMV* содержит: 16 регистров (в том числе регистры статуса и управления), дешифратор адресов этих регистров, память амплитуд сигналов поджига объемом 4096×8 бит и счетчик адреса этой памяти, память объемом 512×8 бит и счетчик адреса памяти для задания номеров поджигаемых светодиодов, схему управления и таймирования работы модуля, схемы синхронизации, передачи амплитуд и номеров поджигаемых светодиодов, а также схемы селекции и обработки триггерных сигналов.

Адреса указанных выше 16-ти регистров расположены в области адресов ввода/вывода компьютера *DCS-board*, что позволяет легко организовать программное управление работой модулей *MMV*. С помощью этих регистров можно программно задавать требуемую амплитуду вспышки каждого светодиода, конфигурацию и последовательность поджига светодиодов, способ триггирования м.с. для синхронизации со спектрометром PHOS и триггером эксперимента ALICE, а также динамический или статический характер поджигаемых светодиодных образов. В динамическом режиме адреса поджигаемых групп светодиодов меняются от события к событию, а в статическом — остаются неизменными. Для задания типа адресации (динамическая или статическая)

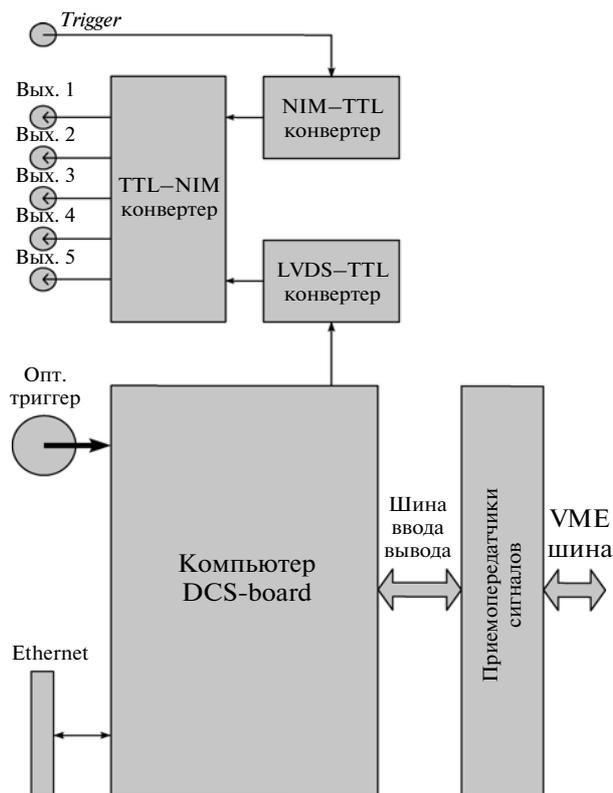


Рис. 3. Схема системного контроллера мониторинговой системы *DCSV*.

используются два разряда регистра статуса и управления.

При работе м.с. в соответствующие регистры заносятся требуемая амплитуда поджига, необходимые номера плат и поджигаемых на них светодиодов, после чего система переходит в состояние ожидания сигнала *Trigger*. По этому сигналу из модуля *MMV* информация передается на платы CM224. При этом заданная амплитуда поджига заносится в аналоговую память и вырабатывается сигнал *Fire*, по которому заданные светодиоды поджигаются, формируя синхронизированные вспышки света перед соответствующими кристаллами модулей PHOS. Для продолжения работы в следующем *LED*-событии необходимо вновь задать номера светодиодов и амплитуды поджигающих их сигналов.

Функционирование м.с. может происходить в программной или автономной модах работы. Последовательность операций для обоих случаев одинаковая. Особенность автономной моды состоит в том, что управляющая программа мониторинговой системы, супервизор *ledEngine*, запущенная на компьютере *DCS-board*, прописывает содержимое регистров и задает режимы работы м.с. только один раз в начале сеанса мониторинга. После этого контроль над системой передается модулю *MMV* вплоть до окончания се-

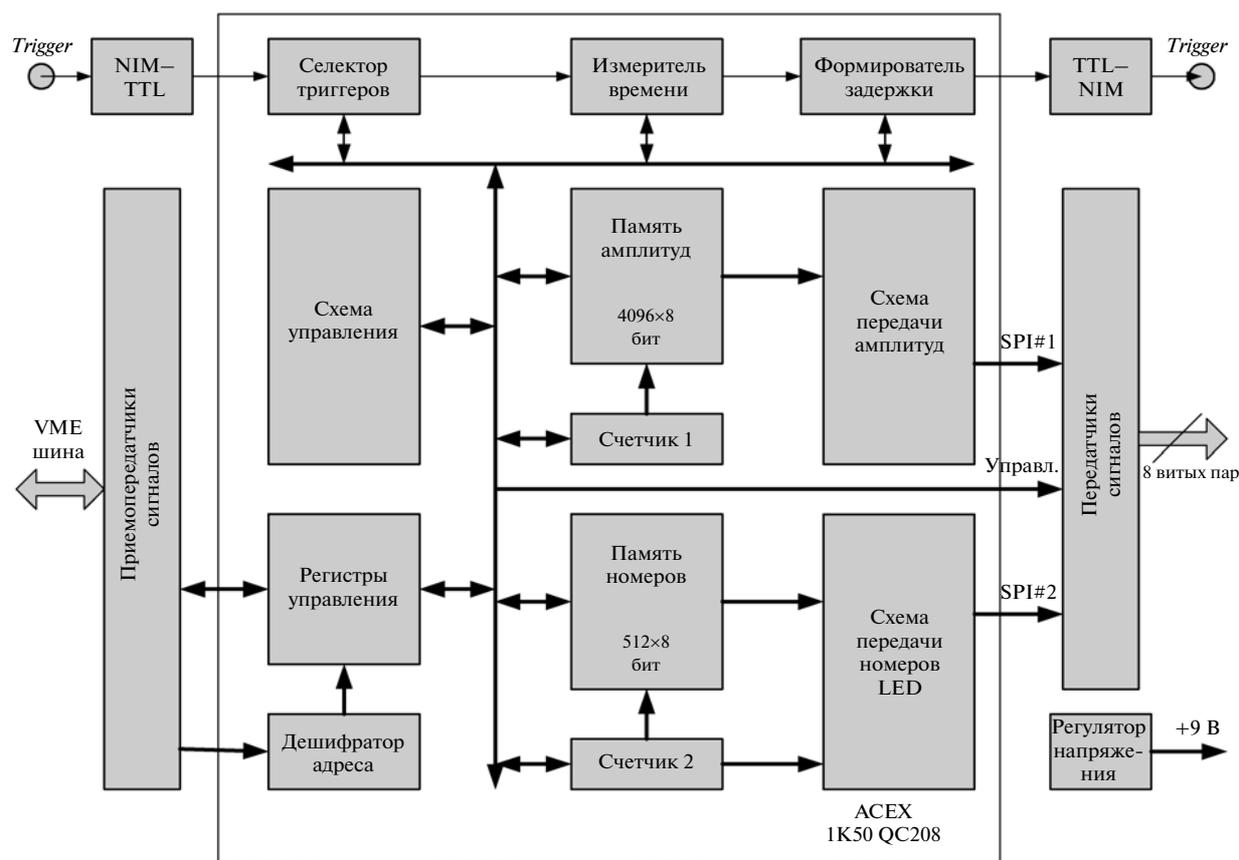


Рис. 4. Схема мастер-модуля *MMV* мониторинговой системы PHOS.

анса с повторением всех действий для каждого LED-события автоматически без всякого вмешательства со стороны программы или контроллера DCSV. В конце сеанса ledEngine возвращает себе контроль над системой и останавливает работу м.с.

В программной моде работы м.с. конфигурации поджигаемых образов могут быть сформированы произвольно в каждом событии. В автономной моде светодиоды поджигаются группами, причем динамические образы получаются увеличением адреса группы на единицу при переходе к следующему событию. В результате возможен поджиг конфигураций в виде:

- одной группы (8 светодиодов, образ “одиночный штрих”);
- одинаковых групп на всех платах CM224 (образ “шахматная доска”);
- короткой линейки из четырех соседних групп на плате CM224 (32 диода, образ “короткая линия”);
- длинной линейки, составленной из коротких соседних линеек на всех платах CM224 (128 диодов, образ “длинная линия”).

Четыре параллельные длинные линии (каждая проходит только через одну плату CM224) формируют регистрируемый образ события в виде че-

тырех непрерывных полос типа “зебра” от одного края модуля спектрометра до другого. Таким образом, в динамическом режиме адресации весь модуль PHOS (3584 кристалла) сканируется за 7 тактов (событий). Тип адресации задается установкой значений “0” или “1” в два разряда регистра статуса и управления.

Для синхронизации работы системы мониторинга с регистрирующей электроникой PHOS в модулях *MMV* заложены возможность задания типа внешнего триггерного сигнала, а также работа в полностью автономной моде без внешнего триггера (самозапуск). В последнем случае модуль автоматически выполняет описанную выше последовательность действий с одной из заданных частот: 2, 20, 200 Гц или 1 кГц. Чтобы обеспечить синхронную работу нескольких модулей *MMV* в этом режиме, задействован дополнительный модуль *MMVsuper*. Формируемый этим модулем с заданной частотой сигнал передается на остальные модули *MMV* и является триггером для них, а сигнал *Fire* в стандарте ECL пересылается на *LTU*, где он преобразуется в стандартную последовательность триггерных импульсов установки ALICE с последующей рассылкой этих сигналов всем потребителям.

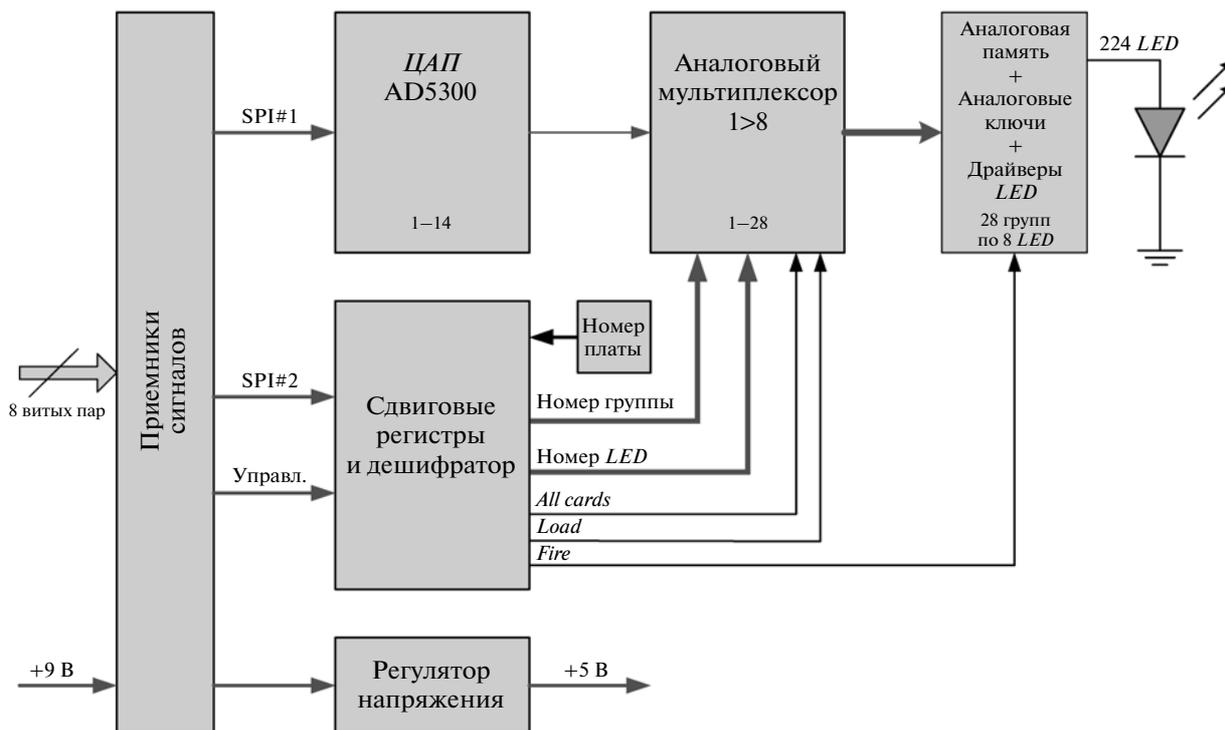


Рис. 5. Схема светодиодного модуля SM224 мониторинг системы PHOS.

Для работы с внешним триггером в модулях *MMV* используется схема селекции сигналов по длительности. В режиме триггирования м.с. по импульсу $L0$ эта схема принимает последовательность триггерных импульсов $L0-L1$, стандартно вырабатываемых *LTU* для запуска спектрометра PHOS. Эти сигналы длительностью 25 и 50 нс соответственно преобразуются контроллером *DCSV* из оптических в сигналы уровней NIM и передаются на модули *MMV*. Мониторная система работает с триггером $L0$, поэтому селектор игнорирует все входные сигналы длительностью >40 нс и начинает работать по сигналу короче 30 нс. Предусмотрена также подстройка момента поджига светодиодов. Для этого предварительно по команде супервизора *ledEngine* мастер-модуль измеряет временной интервал t_{L0-L0} между двумя соседними триггерами $L0$ с точностью 100 нс. Максимально возможный интервал между триггерами не должен превышать 800 мс. Измеренное значение считывается программой *ledEngine*, и вычисляется задержка t_{delay} старта м.с. относительно импульса $L0$:

$$t_{delay} = t_{L0-L0} - t_p - \Delta t_{L0-f}, \quad (1)$$

где t_p – время передачи информации в SM224 (84.5 мкс); Δt_{L0-f} – требуемая электроникой задержка между поджигом и триггером (1.2 мкс). Вычисленная величина записывается *ledEngine* в регистры *MMV*, и мастер-модули переводятся из режима измерения в режим поджига.

Все составные части модуля, за исключением приемопередатчиков с/на шину VME и в модули SM224, реализованы в п.л.и.с. EP1K50QC208 фирмы ALTERA, что позволило существенно упростить компоновку модуля. Загрузка содержимого п.л.и.с. осуществляется из микросхемы последовательного п.з.у. EPC2LC20 фирмы ALTERA при включении питания.

3.2.3. Светодиодные контрольные модули SM224 (рис. 5) выполнены в виде двухсторонних печатных плат, подключенных к модулю *MMV* с помощью плоского скрученного кабеля. Напряжение питания для SM224 (+9 В) формируется в модуле *MMV* и подается на платы по этому же кабелю с последующим преобразованием напряжения в +5 В уже в модуле SM224. На одной из сторон каждой платы установлено по 224 сверхярких светодиода зеленого свечения Kingbright L934SGC [17], а на другой стороне смонтированы необходимые управляющие цепи, а также микропереключатели для задания двоичного кода номера платы (в остальном все SM224 платы идентичны).

Модуль SM224 содержит также схемы приемников сигналов с триггерами Шмитта, 28 аналоговых мультиплексов с одного входа на 8 выходов, сдвиговые регистры, дешифратор номеров каналов, 8-разрядные цифроаналоговые преобразователи (*ЦАП*) AD5300, аналоговые ключи и аналоговую память на керамических бескорпусных конденсаторах с высокостабильным диэлектриком

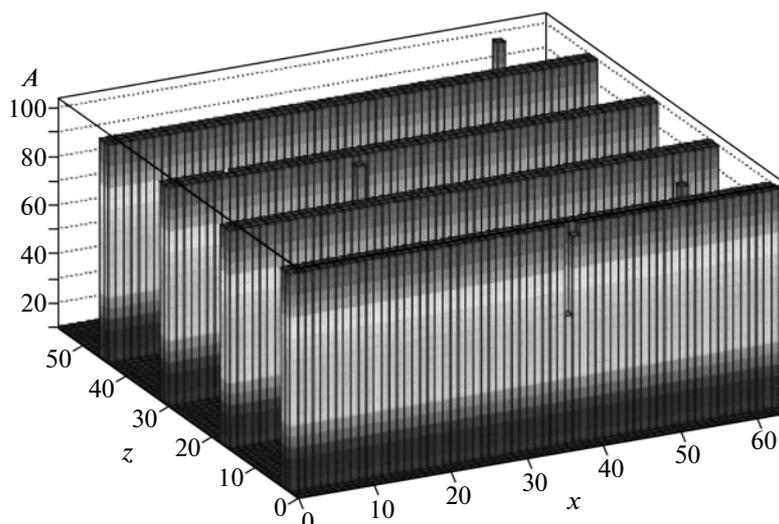


Рис. 6. Типичная картина восстановленного на плоскости спектрометра события от воздействия мониторинг системы. A — амплитуда сигнала в отсчетах ALTRO; x, z — безразмерные координаты ячейки, определенные через соответствующие номера строки и колонки в матрице калориметра.

типа NPO для хранения на них заряда при напряжении, поступившем с ЦАП.

Для связи *MMV* с платами CM224, а также с целью обслуживания ЦАП используется высокоскоростной (до 30 МГц) последовательный протокол передачи данных по трехпроводной линии (SPI, QSPI или Microwire совместимый протокол с отдельными шинами для передачи амплитуд и задания номеров каналов, но с общим тактовым сигналом). Дополнительно добавлены три индивидуальные шины: *All cards* — для одновременной адресации всех модулей CM224, *Load* — для включения режима записи заданной амплитуды в заданную аналоговую память (заряд конденсатора до амплитуды, формируемой ЦАП) и *Fire* — для поджига светодиодов (одновременное включение всех аналоговых ключей и разряд конденсаторов через соответствующие светодиоды).

Расстояние от каркаса VME до модулей PHOS составляет ~35 м, плюс еще 8 м кабеля, проложенного внутри каждого модуля PHOS. Поэтому для надежной передачи данных используется ретранслятор сигналов RD01. Он обеспечивает прием и согласование сигналов кабеля связи с модулем *MMV* и их передачу в модуль PHOS на последовательно соединенные платы CM224. Для согласования сигналов, передаваемых внутрь модуля, установлена плата терминатора TB01, подключаемая в конце кабеля связи плат CM224. Платы RD01 и TB01 располагаются на модулях спектрометра PHOS.

Функционирует модуль следующим образом. Из мастер-модуля *MMV* по кабелю связи в последовательном коде передаются требуемый адрес светодиода и заданная амплитуда вспышки этого

светодиода (так как шины адреса и амплитуды отдельные, их передача происходит одновременно). Адрес светодиода состоит из номера платы CM224, номера группы (для упрощения адресации все диоды платы разбиты на 28 групп, по 8 диодов в каждой группе) и номера светодиода в группе. По окончании передачи этой информации модуль *MMV* формирует сигнал *Load* на платы CM224, и в заданном канале требуемая амплитуда заносится в аналоговую память (соответствующий конденсатор через адресный аналоговый мультиплексор подключается к выходу ЦАП и заряжается до заданного напряжения). Далее этот процесс повторяется для заданного количества светодиодов. По окончании этого процесса мастер-модуль *MMV* вырабатывает сигнал *Fire*, и все светодиоды через аналоговые ключи одновременно подключаются к конденсаторам аналоговой памяти, формируя вспышки света с заданными амплитудами.

4. ПРИМЕНЕНИЕ М.С. В ЭКСПЕРИМЕНТЕ

Основной задачей м.с. является мониторинг работы каналов спектрометра PHOS и контроль правильности их работы. Дополнительная функция м.с. заключается в начальной калибровке и относительном выравнивании откликов каналов спектрометра. Эту важную функцию м.с. мы подробно рассмотрим в другой статье. Здесь же остановимся в основном на функциях технического контроля спектрометра.

Типичная картина восстановленного мониторингового события в спектрометре PHOS показана на рис. 6. Конфигурация области поджигаемых светодиодов была выбрана в виде четырех полос,

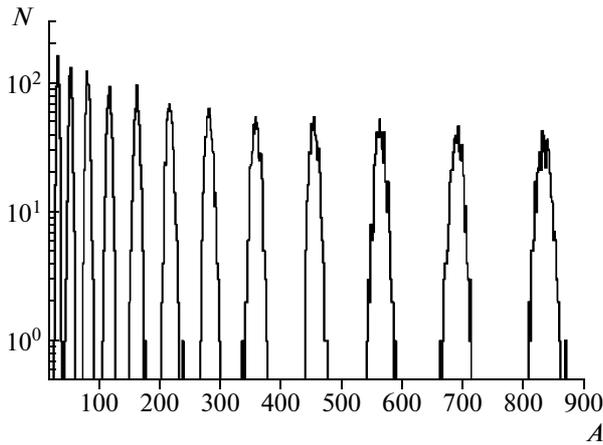


Рис. 7. Амплитудный спектр отклика типичного канала регистрации спектрометра PHOS при работе м.с. в режиме варьируемой амплитуды, т.е. при изменении амплитуды поджига светодиодов от события к событию. Амплитуда сигнала A указана в отсчетах ALTRO.

каждая шириной в два кристалла спектрометра. От события к событию полосы перемещаются по поверхности PHOS от меньших адресов каналов к большим.

Как уже отмечалось выше, при мониторинговании спектрометра м.с. может запускаться в режиме с фиксированной амплитудой поджига светодиодов или с варьируемой амплитудой во всех каналах спектрометра. В первом случае после обработки данных амплитудный спектр произвольного канала спектрометра содержит только один пик с некоторым аппаратурным уширением, а во втором — ряд пиков, как это показано на рис. 7. Количество и амплитуда пиков регулируются программным образом. После набора статистики мониторингования анализирующая программа подсчитывает число пиков в амплитудных спектрах, их положение и уширение. Полученные данные сравниваются с результатами предыдущих тестовых измерений и проверяются на соответствие с заранее заданными ограничениями, характеризующими допустимые отклонения сигналов. В результате делаются выводы о качестве работы спектрометра PHOS в целом.

В случае неисправности аппаратуры или электроники спектрометра м.с. может быть эффективно использована для поиска неисправностей и последующего их устранения. К такого рода задачам относятся обнаружение нестабильности работы аппаратуры, проверка формы выходного импульса каналов электроники, составление карты неисправных или слабых каналов, контроль синхронизации электроники спектрометра.

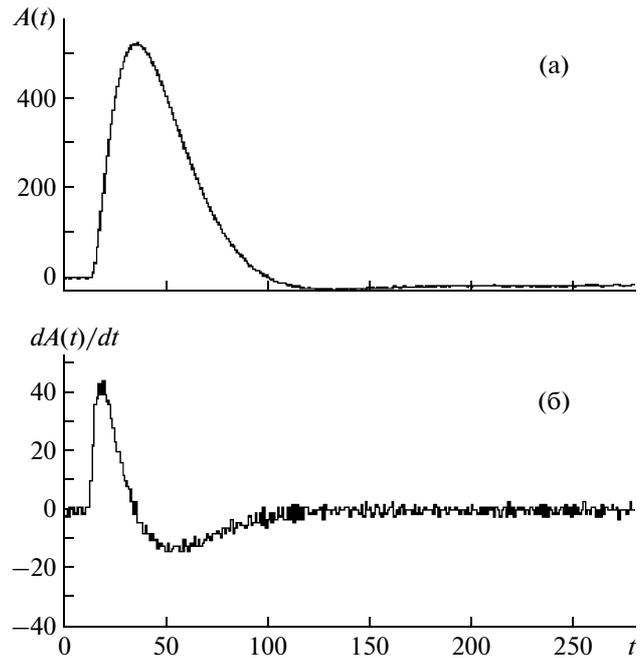


Рис. 8. а — временной профиль выходного сигнала $A(t)$ от вспышки светодиода для типичного исправного канала спектрометра PHOS (амплитуда сигнала A и время t даны в отсчетах ALTRO, для t один отсчет соответствует 100 нс); б — производная сигнала $dA(t)/dt$.

4.1. Проверка формы выходного импульса канала

Для исправного канала форма выходного импульса соответствует переходной функции электронного фильтра. Последняя описывается псевдогауссовой функцией второго порядка. Анализ профиля сигнала позволяет извлечь информацию как об амплитуде сигнала, так и о его временной метке (подробнее см. [5]). Особое внимание при этом уделяется отсутствию паразитных осцилляций вдоль временного профиля сигнала.

На рис. 8 показаны зарегистрированный профиль выходного сигнала от вспышки светодиода для типичного исправного канала спектрометра, а также производная от функции профиля. Профиль содержит в основном информацию, важную для определения амплитуды сигнала, а производная от функции профиля — для определения временной метки сигнала.

4.2. Составление карты неисправных и слабых каналов

Важной задачей м.с. является составление карты неисправных и слабых каналов спектрометра. При наличии доступа к спектрометру такие каналы подлежат ремонту, в противном случае они особым образом учитываются при обработке данных. На рис. 9 показана карта неисправных каналов, полученная с помощью мониторинговой систе-

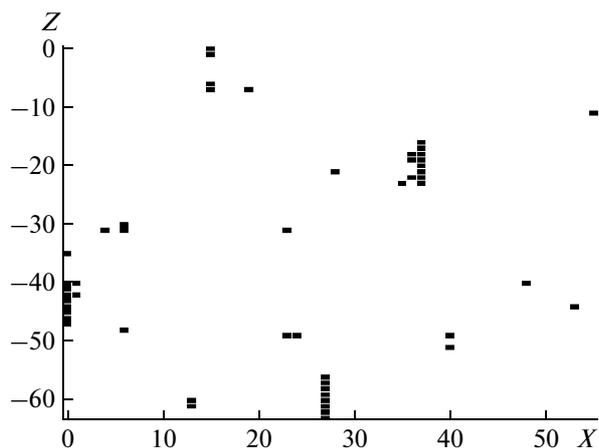


Рис. 9. Карта неисправных каналов, полученная с помощью м.с. для одного из модулей PHOS в ходе тестового сеанса (*LED run*) для отладки и настройки аппаратуры спектрометра (безразмерные координаты ячейки x, z определены через соответствующие номера строки и колонки в матрице калориметра).

мы в ходе тестовых сеансов (*LED runs*) для отладки и настройки аппаратуры спектрометра PHOS.

Наличие слабых каналов, т.е. каналов, усиление которых значительно меньше характерной величины, может быть установлено при анализе статистически усредненных амплитуд отклика каналов на воздействие вспышек света с некоторой фиксированной амплитудой.

4.3. Контроль синхронизации электроники PHOS

Как уже было отмечено выше, синхронизация спектрометра PHOS осуществляется сигналами $L0$ из стандартной триггерной последовательности импульсов в эксперименте ALICE. В случае сбоя синхронизации двумерная картина *LED*-событий в модуле PHOS характеризуется искажениями в виде изломов линеек засвеченных каналов (рис. 10). Это позволяет оперативно отслеживать различные сбои электроники при комплексном запуске модулей.

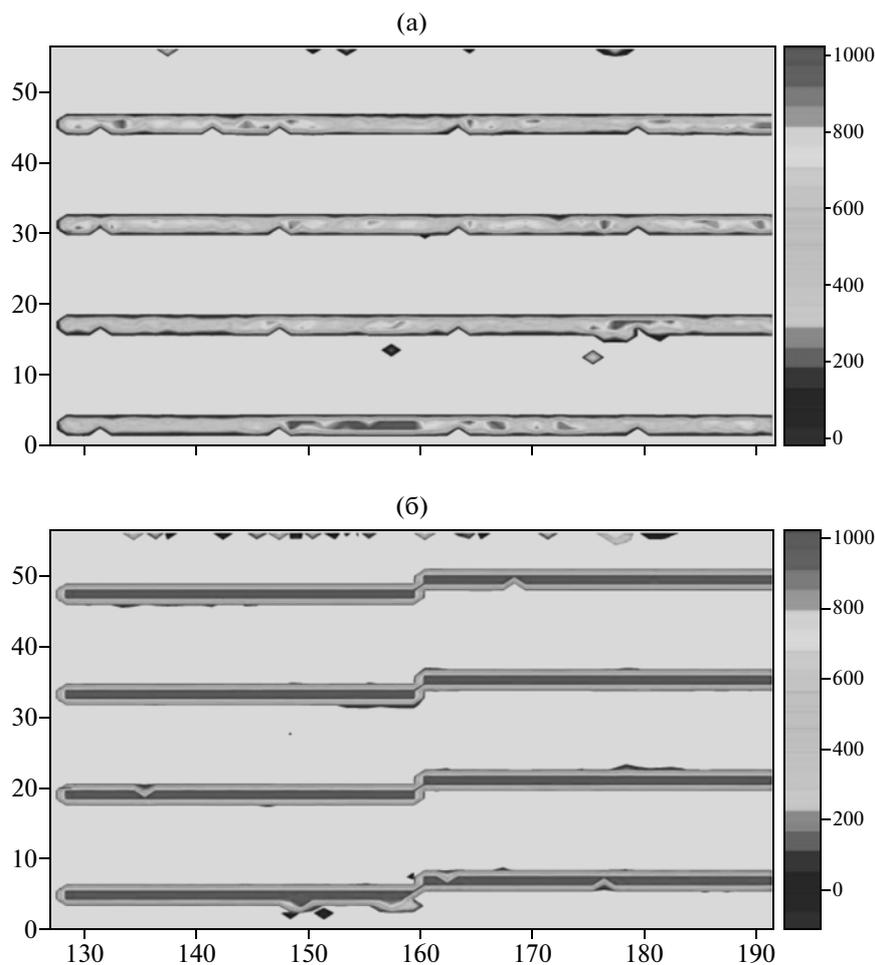


Рис. 10. Изображение тестовых полос “зебра” на плоскости спектрометра от воздействия светодиодной мониторинговой системы: **а** – правильная синхронизация; **б** – сбой синхронизации. Каждая полоса на рисунке соответствует двум смежным рядам кристаллов на поверхности PHOS. Данные получены в тестовых сеансах (*LED runs*) во время настройки аппаратуры.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эксплуатация описанной выше м.с. спектрометра PHOS в процессе его запуска и последующего набора данных в составе эксперимента ALICE на сталкивающихся пучках коллайдера LHC в течение сеансов 2009–2011 гг. показала соответствие реализованной м.с. задачам эксперимента и ее исключительную эффективность при наборе данных в условиях реального эксперимента.

Авторы, пользуясь случаем, выражают свою признательность Н.А. Кузьмину за плодотворное сотрудничество на этапе лабораторных испытаний мониторингной системы.

Данная работа поддержана грантом Российского фонда фундаментальных исследований № 08-02-91021-ЦЕРН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ALICE Collaboration. Technical Proposal. CERN/LHCC/95-71. LHCC/P3. Geneva, 15 December 1995.
- ALICE Collaboration. Technical Design Report PHOS. CERN/LHCC 99-4. ALICE TDR 2. Geneva, 5 March 1999.
- Ippolitov M., Beloglinsky S., Bogolyubsky M. et al. // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. A. 2002. V. 486. P. 121.
- ALICE TPC Readout Chip. User Manual. CERN, June 2002.
- Bogolyubsky M.Yu., Manko V.I., Musa L. et al. // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. A. 2010. V. 621. P. 231.
- Anton G., Bucher K., Kuckes M. // Nucl. Instrum. and Methods. A. 1989. V. 274. P. 222.
- Hehl T., Grambayer P., Sauer M., Wagner G.J. // Nucl. Instrum. and Methods. A. 1995. V. 354. P. 505.
- Autiero D., Baldo-Geolin M., Boleisut F. et al. // Nucl. Instrum. and Methods. A. 1996. V. 372. P. 556.
- Gouz Yu., Ivanyushenkov Yu.M., Konopliannikov A.K. et al. Preprint IHEP 95-108. Protvino, 1995.
- Васильев А.Н., Гончаренко Ю.М., Грачев О.А. и др. Препринт ИФВЭ 97-60. Протвино, 1997.
- Alvsvaag S.J., Bari M., Barreira G. et al. // Nucl. Instrum. and Methods. A. 1999 V. 425. P. 106.
- Biebel O., Boden B., Borner H. et al. Preprint CERN PPE/92-19. Geneva, 1992.
- Steiner V., Moinester M.A., Kubantsev M. et al. Preprint FNAL E781 H-741, 1995; Steiner V., Moinester M.A., Kubantsev M. et al. Preprint FNAL E781 H-758, 1995.
- Evdokimov V.N., Goncharov P.I., Korneev Yu.V. et al. Preprint IHEP 99-47. Protvino, 1999.
- Блик А.М., Боголюбский М.Ю., Ерин С.Е. и др. // ПТЭ. 2003. № 6. С. 28. (Blik A.M., Bogolyubsky M.Yu., Erin S.V. et al. // IET. 2003. V. 46. № 6. P. 753.)
- <http://www.kingbright.com>
- Li Y., Zhao W., Hia Y. et al. // Phys. Stat. Sol.(c) 2007. V. 4. № 7. P. 2784.
- http://en.wikipedia.org/wiki/Serial_Peripheral_Interface_Bus
- ALICE Collaboration. Technical Design Report. CERN-LHCC-2003-062. ALICE TDR 10. Geneva, 2004.
- Local Trigger Unit. Preliminary Design Review. / Ed. P. Jovanovic. Version 1.0. CERN, Geneva, 2002.
- <http://kip-uni-heidelberg.de/ti/DCS-board/current>
- <http://www.arm.com/products/OS/>
- http://web.ift.uib.no/kjeks/wiki/index.php?title=Electronics_for_the_Time_Projection_Chamber_%28TPC%29#Download_Section_3