



**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»  
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ**

ИФВЭ 2015–9

А.В. Ивашин, В.В. Календарев, И.А. Качаев, В.Ф. Константинов,  
В.Д. Матвеев, Б.Ф. Поляков, В.П. Сугоняев, Ю.А. Хохлов

**Новый электромагнитный калориметр  
модернизированной установки ВЕС**

Направлено в *ПТЭ*

Протвино 2015

**Аннотация**

Ивашин А.В. и др. Новый электромагнитный калориметр модернизированной установки ВЕС: Препринт ИФВЭ 2015-9. – Протвино, 2015. – 21 с., 18 рис., библиогр.: 15.

В работе описывается комплекс нового электромагнитного калориметра (ЭМК-2) установки ВЕС, состоящий из 1592 счетчиков, изготовленных по технологии типа «шашлык» из набора пластин свинец-сцинтиллятор, высоковольтных делителей для ФЭУ-84 на Кокрофт-Уолтон преобразователях, а также системы мониторингования на светодиодах, систем медленного контроля и амплитудного анализа. Описаны также процедуры калибровки и мониторингования ЭМК-2.

**Abstract**

Ivashin A.V. et al. The new electromagnetic calorimeter for updated VES experiment: IHEP Preprint 2015-9. – Protvino, 2015. – p. 21, figs. 18, refs.: 15.

The new electromagnetic calorimeter ECAL-2 for VES experiment is described. The complex of ECAL-2 includes: the detector with 1592 lead- scintillators "shashlik" type counters with FEU-84 PMTs and high voltage system, based on Cockcroft-Walton converters, the LED monitoring system, fast data acquisition and slow control system. The procedures of ECAL calibration and online monitoring have been described.

## Установка ВЕС

С 1992 года на установке ВЕС проводятся исследования в области мезонной спектроскопии [1,2]. Установка расположена на вторичном пучке протонного синхротрона У-70 и предназначена для изучения реакций взаимодействия  $\pi$ - и  $K$ - мезонов на ядрах при импульсах  $25 \div 45$  ГэВ/с в области фрагментации пучка. Установка ВЕС представляет собой универсальный широкоапертурный магнитный спектрометр с возможностью идентификации вторичных частиц, имеет трековую систему, состоящую из пропорциональных и дрейфовых камер, и обладает высокоскоростной системой сбора данных (рис. 1).

Одним из основных детекторов установки является электромагнитный калориметр (ЭМК-2), предназначенный для измерения энергий и координат гамма-квантов и электронов. Положение ЭМК-2 в эксперименте представлено на рис. 1.

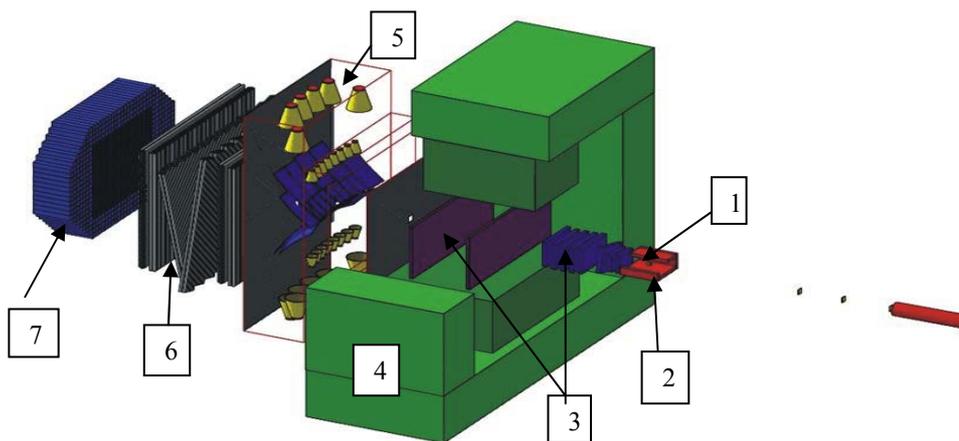


Рис. 1. Схема установки ВЕС: 1- мишень, 2- охранная система, 3- система пропорциональных проволочных камер, 4- широкоапертурный магнит, 5 – многоканальный черенковский счетчик, 6- система плоскостей дрейфовых трубок, 7- ЭМК-2.

Предыдущий электромагнитный калориметр установки ВЕС (ЭМК-1) [3] был собран из ячеек свинцового стекла 2-х типоразмеров:  $43 \times 43 \times 440 \text{ мм}^3$  и  $86 \times 86 \times 440 \text{ мм}^3$  с ФЭУ-84-3 и ФЭУ-110 в качестве фотоприемников. Регулировка высокого напряжения на ФЭУ для каждого счетчика осуществлялась при помощи электромеханического манипулятора, вращением оси переменного резистора в цепи делителя. После двух десятилетий эксплуатации данного калориметра надежность его активных элементов, и, прежде всего, делителей и электроники, значительно снизилась, что потребовало их безусловной замены. В период с 2007 по 2009 г.г. была проведена полная модернизация электромагнитного калориметра установки ВЕС, с использованием разработок ГИЦ ИФВЭ в области калориметрии на основе технологии типа «шашлык». По сути, был создан новый детектор, при этом были заменены или модифицированы практически все его элементы и подсистемы:

- регистрирующие счетчики ЭМК-2;
- механическая конструкция основного корпуса и подвижной кассеты;
- система высоковольтного питания ФЭУ-84 и узел фотоприемников;
- кабельный тракт передачи сигналов от ФЭУ к АЦП;
- система амплитудно-цифровых преобразователей (АЦП);
- система мониторинга на светодиодах;
- система управления перемещением ЭМК-2;
- система «медленного» контроля детектора.

## **Конструкция счетчиков ЭМК-2**

Счетчики ЭМК-2 имеют 2 типоразмера: «малый» –  $38 \times 38 \text{ мм}^2$  и «большой» –  $76 \times 76 \text{ мм}^2$ . Радиаторы счетчиков изготовлены по технологии типа «шашлык» и представляют собой пакет пластин свинец-сцинтиллятор со спектрсмещающими волокнами, пронизывающими весь пакет (рис. 2). Данная технология получила широкое развитие в ИФВЭ и используется при создании калориметров для экспериментов COMPAS [4,5] и PANDA. При производстве радиаторов счетчиков для ЭМК-2 эта технология была максимально соблюдена. Были выбраны те же размеры для «малого» счетчика, та

же толщина сцинтилляционных пластин, расположение и диаметр отверстий в пластинах для волокон и стяжных спиц, конструкция и размеры торцевых фланцев, крепёжных деталей и др. Для улучшения энергетического разрешения детектора при малых энергиях, толщина свинцовых пластин была уменьшена с 0.8 до 0.6 мм, что привело к увеличению числа слоев и общей длины радиатора с 450 мм до 508 мм, при сохранении толщины вещества в 23 единицы радиационных длин. Радиатор по всей длине прошит 16 спектросмещающими волокнами диаметром 1 мм с зеркальным напылением противоположного от ФЭУ торца. Прошивка радиатора волокнами спиральная с числом оборотов 3,5. Радиатор, состоящий из 224 пар пластин свинец-сцинтиллятор, стянут четырьмя стальными шпильками диаметром 1,4 мм и обернут алюминизированным майларом.

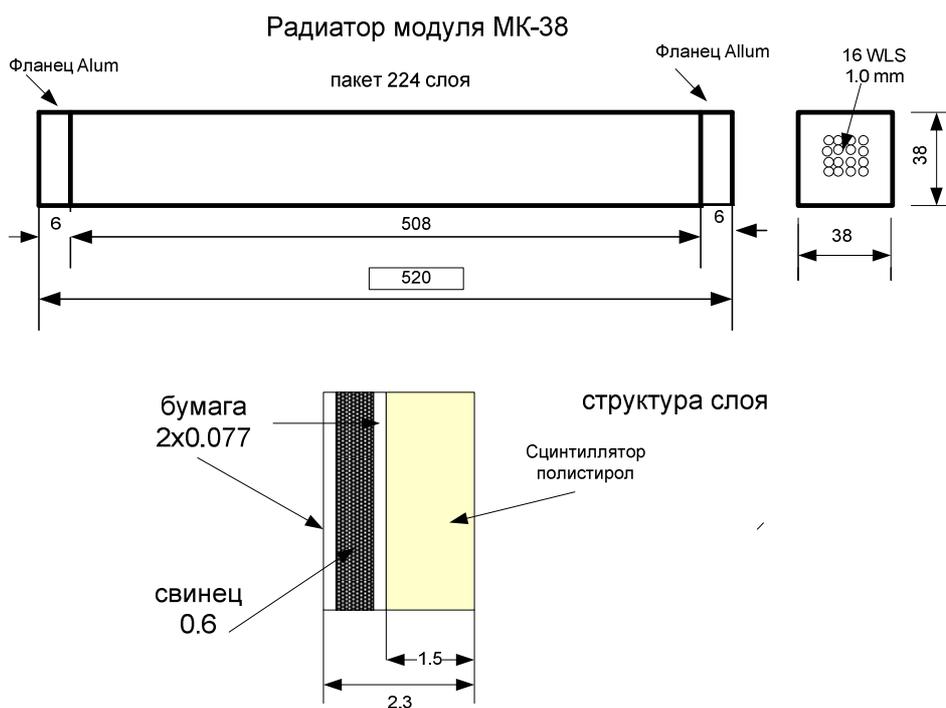


Рис. 2. Конструкция радиаторов счетчиков ЭМК-2.

Для обоих типоразмеров в качестве фотоприемников используется ФЭУ-84. Узел стыковки радиаторов счетчиков с ФЭУ-84 представляет собой пластмассовый «стакан», внутрь которого помещен пермаллоевый экран для защиты от рассеянного

магнитного поля широкоапертурного магнита установки ВЕС. Для гарантии долговременной стабильности сбора света входное окно ФЭУ не имеет оптического контакта с отполированными торцами спектросмещающих волокон.

«Большие» модули представляют собой сборку пластин из свинца размером  $76 \times 76 \text{ мм}^2$ , между которыми помещены четыре стандартные сцинтилляционные пластины  $38 \times 38 \text{ мм}^2$ . Соответственно, число спектросмещающих волокон составляет 64 и стяжных спиц – 16.

Счетчики ЭМК-2 плотно уложены в виде матрицы в изолированную от света кассету размером  $292 \times 228 \times 126 \text{ см}^3$ . Схема укладки показана на рис. 3. Укладка представляет собой неправильный восьмиугольник, в котором центральная зона ЭМК-2 собрана из 1216 малых счетчиков, уложенных в 38 рядов по 32 счетчика в каждом (темный фон), и окруженная 336 большими счетчиками (серый фон). Пассивные пластмассовые вставки по углам кассеты дополняют кладку до прямоугольной (белый фон). Для прохождения пучка в кладке счетчиков оставлено отверстие размером в один малый счетчик.

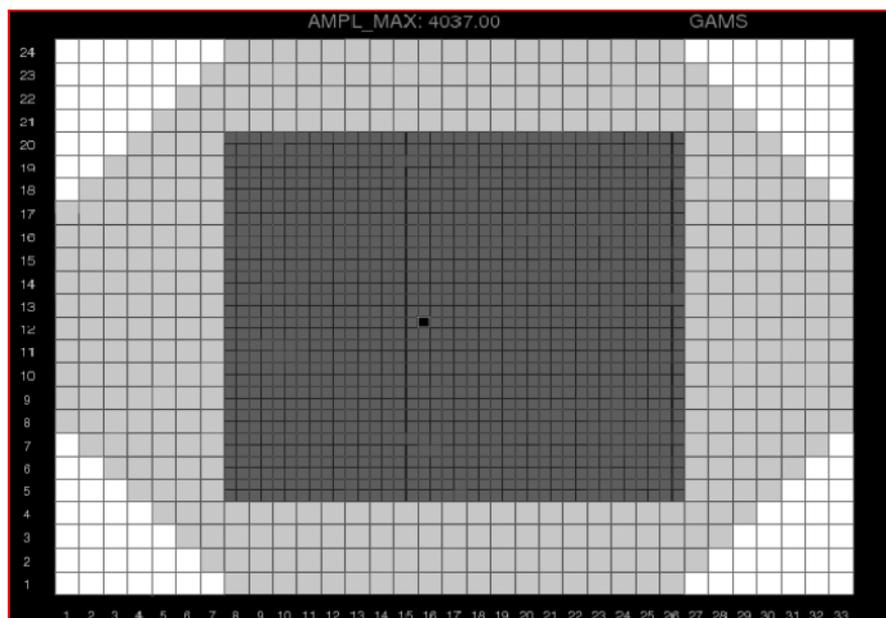


Рис. 3. Схема укладки счетчиков в кассете ЭМК-2.

Кассета массой около восьми тонн подвешена к несущей конструкции на двух вертикальных винтах, что позволяет перемещать её по вертикали в пределах 195 см. Вся конструкция ЭМК-2 общей массой около 14 т может перемещаться по горизонтали в пределах 2-х метров. Независимое перемещение кассеты калориметра по двум координатам необходимо для установки центра каждого счетчика на электронный пучок в процессе калибровки и для выставления кладки счетчиков отверстием на центр пучка при наборе данных. Для перемещения и позиционирования ЭМК-2 был разработан новый аппаратно-программный комплекс [6]

На рис. 4 представлен общий вид ЭМК-2 в составе установки ВЕС.



Рис. 4. ЭМК-2 в составе установки ВЕС.

### **Высоковольтная система питания фотоумножителей ФЭУ-84**

Система высоковольтного питания фотоумножителей счетчиков ЭМК-2 построена на высоковольтных генераторах типа Cockcroft-Walton (CW) [7]. Высоковольтный генератор реализован по схеме преобразователя низковольтного пульсирующего напряжения в постоянное высоковольтное. Преобразователи типа CW широко применяются для питания ФЭУ калориметров в экспериментах COMPASS [8], ОКА[9] и других.

Для ЭМК-2 за основу была взята схема и конструкция, используемая в эксперименте COMPASS. С целью повышения устойчивости и управляемости в схему СВ-преобразователя были внесены изменения (высокоомное нагрузочное сопротивление, интегрирование в цепи обратной связи). Блок-схема СВ-преобразователя для ФЭУ-84 приведена на рис. 5.

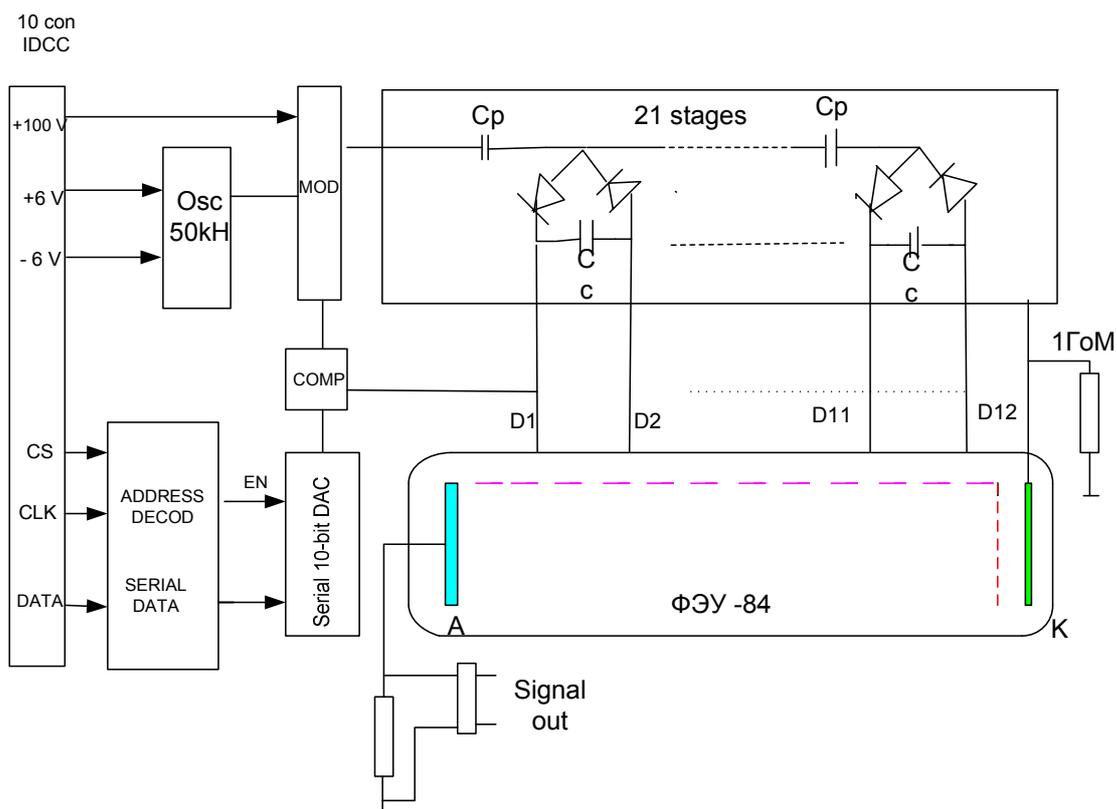


Рис. 5. Блок-схема СВ-преобразователя для ФЭУ-84.

Генератор в автоколебательном режиме формирует опорный сигнал в виде меандра частотой 50 кГц для амплитудного модулятора. Модулятор управляется выходным напряжением 10-разрядного ЦАП и размах амплитуды меандра на выходе может изменяться с шагом 2 В (1 разряд кода) в диапазоне 0÷100 В. Переменное напряжение модулятора передается через проходные конденсаторы (с индексом Cp) по последовательной цепочки каскада диод-конденсатор выпрямителей, а конденсаторы (с индексом Cc) в каждом каскаде заряжаются полуволнами до заданного амплитудного значения напряжения. Общее напряжение на СВ, есть сумма напряжений на последовательно включенных каскадах выпрямителях, и может достигать максимально воз-

возможного напряжения в 2 кВ при максимальном двоичном коде на ЦАП. От отдельных ступеней каскада, согласно требуемому распределению потенциалов на диодах ФЭУ, делаются отводы-подключения. Схемой сравнения напряжений с первого каскада преобразователя (D1) и выходного напряжения ЦАП, обеспечивается коррекция амплитуды меандра на выходе модулятора и, соответственно, стабилизация всего высоковольтного напряжения на ФЭУ при существенных изменениях тока нагрузки. Резистор величиной 1 ГОм, включенный на выходе преобразователя, обеспечивает нагрузку на выходе умножителя для быстрого (доли секунды) разряда накопительных емкостей  $C_c$  в случае регулировки напряжения в сторону уменьшения или при его выключении. Это позволяет практически без инерции настраивать высокое напряжение на ФЭУ, а также обеспечивает безопасность персонала при ремонтных работах с СВ-преобразователями.

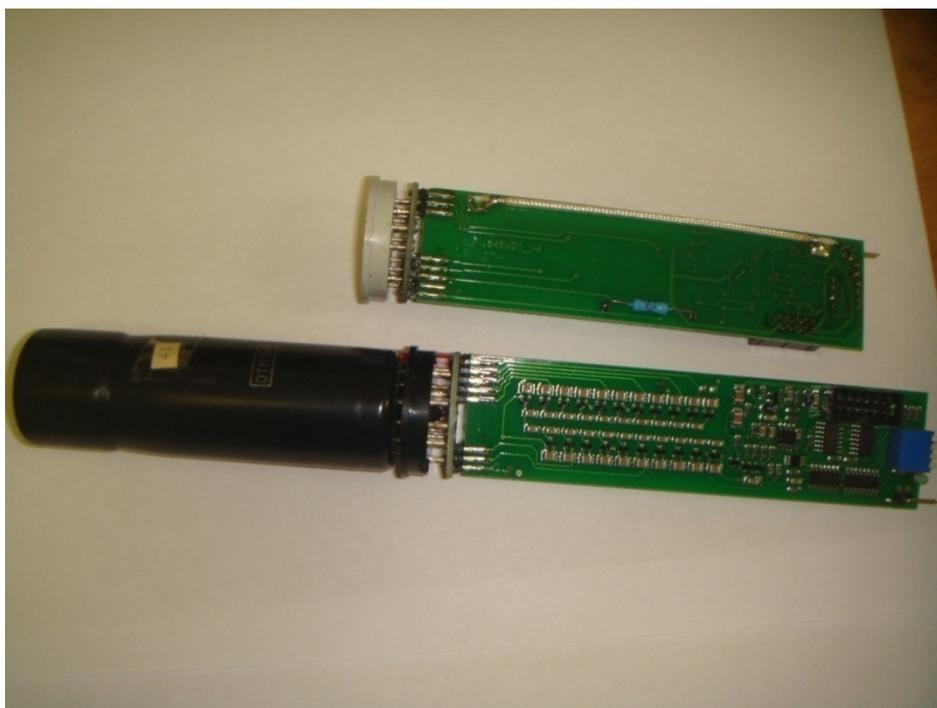


Рис. 6. Конструкция СВ преобразователя с ФЭУ 84.

Конструкция СВ-преобразователя (рис. 6) включает в себя основную печатную плату размером  $130 \times 35 \text{ мм}^2$  и соединенную с ней перпендикулярно переходную плату с контактной панелькой для подключения ФЭУ. На основной плате расположены все компоненты СВ-преобразователя в SMD корпусах. Через 10-контактный разъем типа IDCC подаются сигналы управления и питающие напряжения  $\pm 6 \text{ В}$ ,  $+100 \text{ В}$ .

Управление ЦАП CW-преобразователя производится от внешнего источника команд по 3-проводной шине с сигналами выборки (CS), синхронизации (CLK) и данных (DATA). Сигнал DATA представляет собой последовательную посылку 14-разрядного кода, включающего 4 разряда адреса и 10 разрядов кода амплитуды. Четыре разряда адреса обеспечивают индивидуальную адресацию 16-ти CW-преобразователей, подключенных к одной шине. На плате каждого CW-преобразователя установлен 4-контактный переключатель для задания его адреса на шине. На рис. 7 показана временная диаграмма работы 3-проводной шины управления CW.

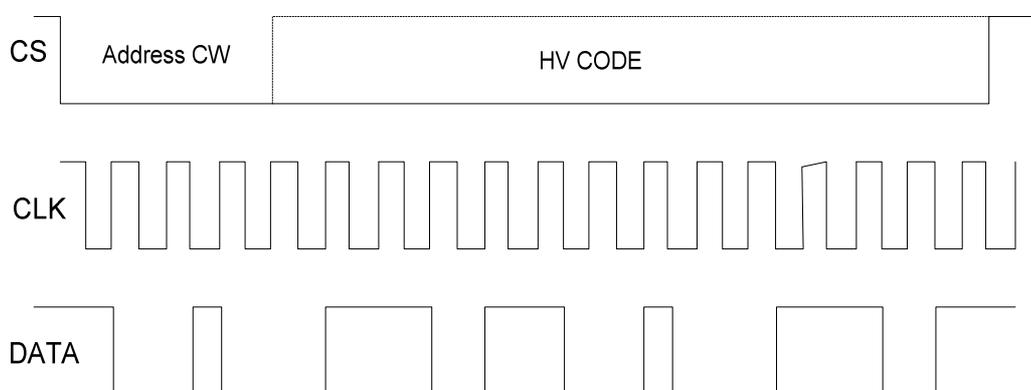


Рис. 7. Временная диаграмма на шине управления CW – преобразователям.

Система высоковольтного питания ЭМК-2 включает 1592 CW-преобразователя. На рис. 8 представлена блок-схема распределенной системы управления высоковольтным питанием ЭМК-2. Конструктивно система построена на базе каркаса механического стандарта «Евромеханика» 6U, в котором организованы 3-проводная шина последовательной передачи данных управления и шины питания всей системы. В каркасе установлены модуль контроллера управления и модули управления ветвями DR1÷DR10. Каркас размещен в специальной стойке, установленной сверху кассеты калориметра. Здесь же располагаются источники питания типа GPR0830 для +6 В (22 А) и -6 В (12А) и GPR110Н – источник опорного напряжения + 100 В (0.32А).

Контроллер управления обеспечивает связь каркаса управления системой высоковольтного питания с центральным компьютером по локальной сети Ethernet. Контроллер построен на основе коммерческой платы SMAT91SAM9260 [10] с микроконтроллером фирмы Atmel AT91SAM9260 (ОС Linux). Программа в микроконтроллере

обеспечивает прием команд от центрального компьютера и формирует управляющие посылки на внутренней шине каркаса. В центральном компьютере задаются и хранятся все управляющие процедуры и таблицы с кодами высоковольтных напряжений для каждого счетчика ЭМК-2. Управляющие процедуры обеспечивают подъем и корректировку напряжения на ФЭУ для отдельных каналах, одновременный подъем и снятие напряжения на всех каналах.

Модули передатчиков DR1÷DR10 транслируют кодовые посылки от контроллера управления и обеспечивают необходимые напряжения питания CW-преобразователей по 5-метровым шлейфам плоского кабеля в кассету калориметра. В кассете 50-проводные шлейфы разделяются на 10-проводные шлейфы с 16-ю разъемами типа IDC-10 для подключения CW-преобразователей (BR1÷BR100). Один модуль передатчика обеспечивает управление и питание для 10-ти ветвей, или для 160 CW-преобразователей.

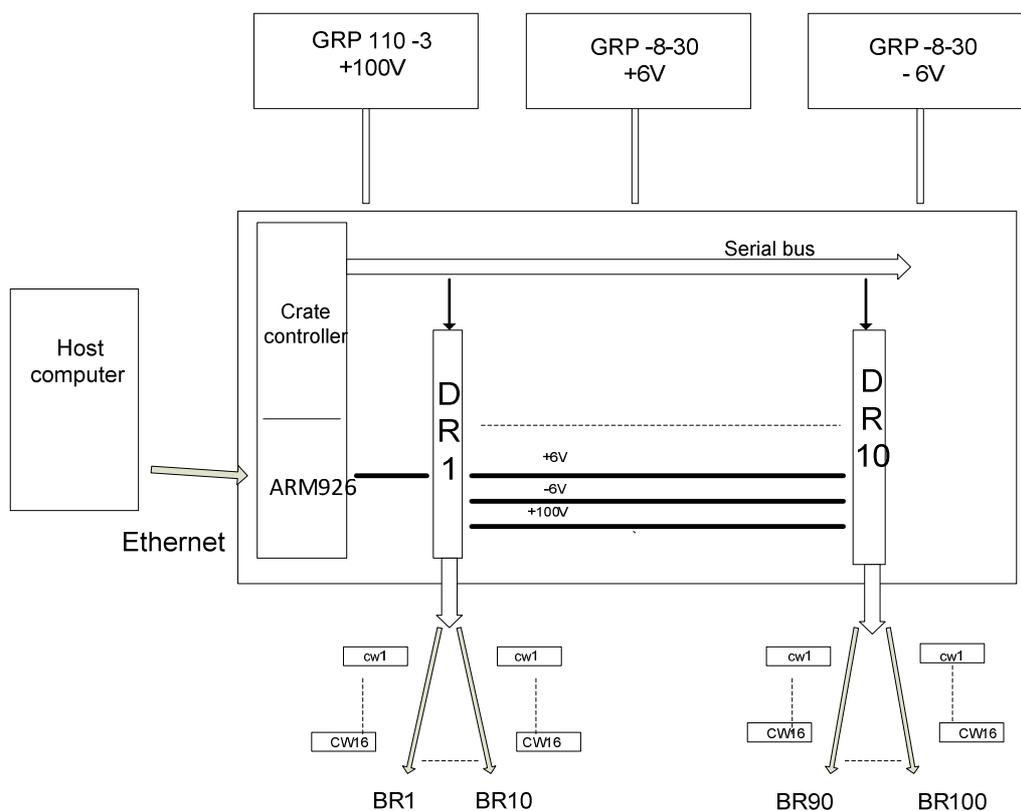


Рис. 8. Общая схема организации системы высоковольтного питания ЭМК-2.

## Система мониторинга на светодиодах

Система высоковольтного питания на СВ-преобразователях не имеет измерительного тракта для контроля напряжения, устанавливаемого на ФЭУ. Слежение за усилением ФЭУ осуществляется косвенно по величине сигналов с ФЭУ от импульсных световых источников. Для мониторинга коэффициента усиления ФЭУ счетчиков ЭМК-2 используется система светоизлучающих диодов. Каждый счетчик калориметра освещается в центре торцевой части в области выхода зеркальных концов спектросмещающих волокон индивидуальным светодиодом типа BL-L314VC [11] с максимумом спектра излучения 405 нм. На рис. 9 представлена общая схема управления световыми источниками.

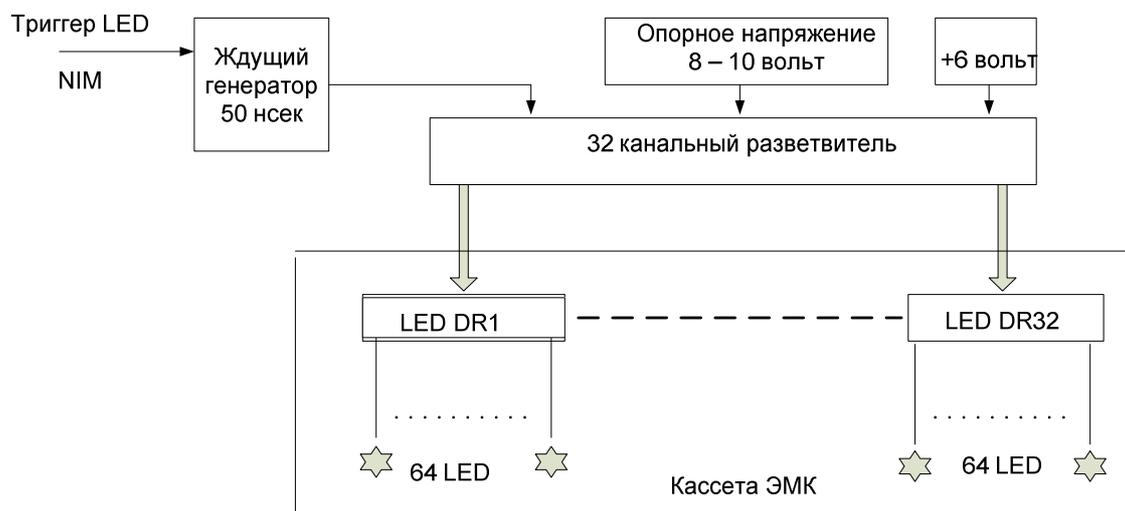


Рис. 9. Общая схема управления светодиодами.

Генератор с внешним запуском формирует импульс фиксированной длительности 50 нс, который после преобразования в сигнал с LVDS уровнями, разводится на 32 платы управления светодиодами (LED DR). Платы управления расположены внутри кассеты ЭМК-2 и соединены со светодиодами проводниками длиной до 40 см. В качестве драйверов для светодиодов используются 4-канальные интегральные схемы EL7457 [12], имеющие высокую нагрузочную способность – до 2 А на емкостную нагрузку 1000 пФ. К одному каналу схемы EL7457 подключаются параллельно 16 свето-

диодов, при этом одна плата управления обеспечивает запуск до 64-х светодиодов. Опорное напряжение для драйверов подается от внешнего высокостабильного источника питания.

Система мониторинга используется как в режимах тестирования и настройки детектора, так и во время набора данных. В режимах тестов и настройки система мониторинга работает под управлением аппаратного компьютера с тестовой программой.

При наборе данных система мониторинга запускается по специальному сигналу «LED» от системы триггера эксперимента, которая вырабатывает заданное количество запусков светодиодов, обычно 80 циклов с периодом 1 мс, до начала вывода пучка частиц ускорителя У-70 на установку ВЕС. Информация с АЦП считывается в режиме сбора данных, как от физических событий.

## **Система амплитудного анализа сигналов ЭМК-2**

Система амплитудного анализа является существенной частью общей системы сбора данных (ССД), подробно описанной в [13]. Она включает 1600 каналов 12-разрядных интегральных АЦП с полным диапазоном чувствительности 300 пКл. Сигналы от счетчиков ЭМК-2 по 80-метровым коаксиальным кабелям через переходные платы поступают на входы 96-канальных модулей АЦП типа ЛЭ-71 [14]. 18 модулей ЛЭ-71 размещены в трех каркасах МИСС [14]. Каждый каркас МИСС разделен на два сектора, по 3 модуля АЦП в каждом, с автономными контроллерами считывания ЛЭ-26 и модулями буферизации и передачи данных секторов в компьютер по шине USB-2 (AC-USB). В каждом секторе модуль AC-USB с буферной памятью емкостью 64 Мбайт накапливает информацию за весь цикл сброса ускорителя, которая далее считывается в компьютер ССД в промежутках времени между циклами. Такая организация обеспечивает параллельность считывания в каждой части каркаса и уменьшение общего времени считывания системы сбора данных.

Для ускорения вдвое процесса считывания и буферизации данных с АЦП вместо стандартного (асинхронного) протокола чтения данных по шине МИСС используется модернизированный синхронный протокол чтения слов данных без подтверждения

передачи, а также переработанный кабельный интерфейс между модулями ЛЭ-68 и AC-USB и модернизированные прошивки FPGA в модулях ЛЭ-71, ЛЭ-68 и AC-USB .

Интегральные АЦП управляются сигналами длительность 80 нс. Скорость считывания по каналу каркаса МИСС составляет 120 нс на одно 16-разрядное слово. Общее среднее время считывания информации с ЭМК для «физического» события составляет 4-5 мкс, для событий со светодиодами – 40 мкс.

Для управления АЦП по программному каналу ЭВМ (чтение и загрузка «пьедесталов», тестовые чтения) используется контроллер ЛЭ83 [14], общий для двух секторов каркаса. Процедура измерения «пьедесталов» (100 измерений) и загрузка их усредненных величин в память АЦП осуществляется под управлением аппаратной ЭВМ между циклами сброса пучка. В это же время осуществляется запись значений «пьедесталов» в базу данных для последующего анализа. На рис. 10 представлена диаграмма таймирования сбора данных с ЭМК-2.

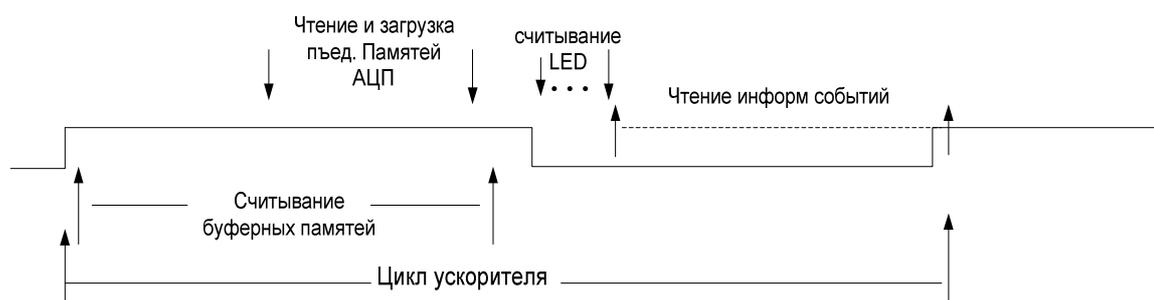


Рис. 10. Диаграмма таймирования сбора данных.

## Контроль работы и мониторинг ЭМК-2

Система контроля установки (СКУ) ВЕС [15] обеспечивает т.н. «медленный» контроль за состоянием аппаратуры установки и on-line мониторинг различных параметров при проведении длительных физических сеансов на ускорителе. Информация обо всех измеряемых параметрах системой контроля сохраняется и доступна как в режиме on-line, так и для дальнейшего анализа после сеанса.

Ряд параметров (функций) СКУ относится к ЭМК-2 и его подсистемам. Это температура в объеме кассеты калориметра (8 точек измерения), температура корпусов

АЦП, стабильность источников питания высоковольтной системы ФЭУ и стабильность опорных напряжений питания системы мониторингования на светодиодах. Контроль за функционированием подсистем ЭМК-2 осуществляется как при его подготовке к работе на пучке, так и в наборе данных.

В процессе подготовки детектора к работе на пучке при помощи набора программ проверяется функционирование системы управления высоковольтными источниками ФЭУ, работа системы амплитудного анализа и величины сигналов счетчиков от светодиодов.

В ходе набора данных на пучке в течение всего сеанса в режиме реального времени осуществляется контроль за стабильностью «пьедесталов» АЦП, сигналов счетчиков от светодиодов, источников питания и изменениям температуры внутри ЭМК-2. Соответствующая информация от разных систем установки в графическом виде визуализируется на специальном экране в on-line режиме (рис. 11) и дополняется звуковыми сигналами для привлечения оператора к возникающим проблемам.

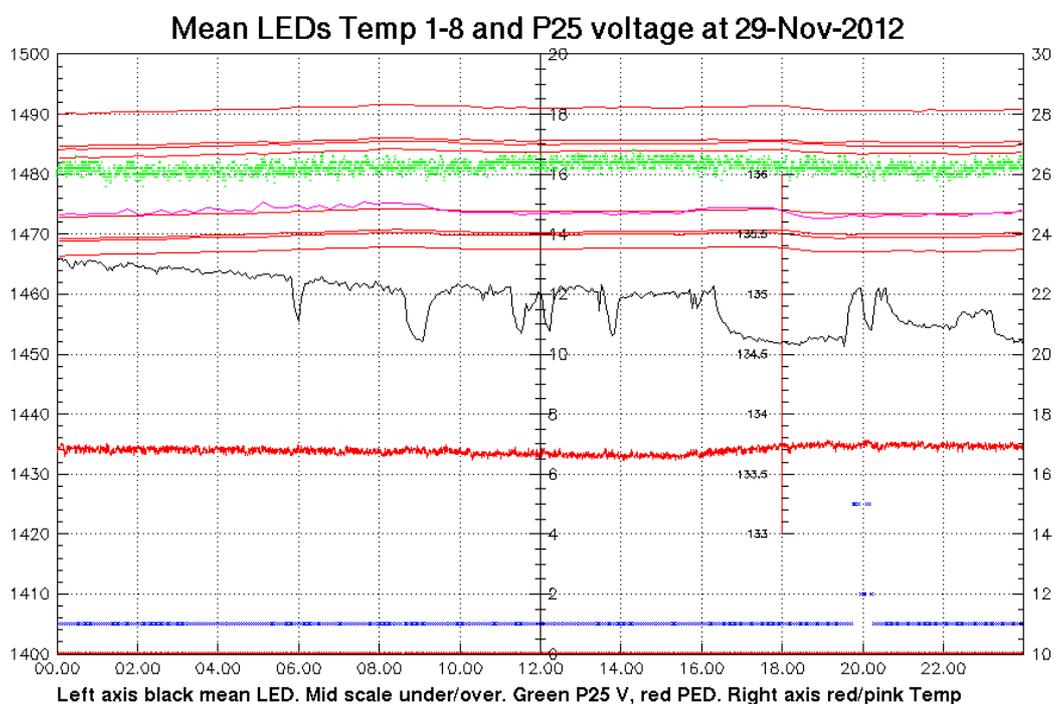


Рис. 11. Экран монитора с on-line информацией о состоянии подсистем ЭМК-2.

## Калибровка ЭМК-2

Калибровка счетчиков ЭМК-2 осуществляется на моноэнергичном пучке электронов с энергией 10 ГэВ. При проведении калибровки система перемещения ЭМК-2 поочередно позиционирует центр каждого счетчика на оси пучка. При этом измеряются сигналы со счетчиков ЭМК-2 как от электронов, так и от светодиодов. Процедура калибровки состоит из двух последовательных этапов. На первом этапе происходит выравнивание коэффициентов усиления ФЭУ по сигналам счетчиков от электронов, на втором этапе проводится калибровка ЭМК-22.

Процедура выравнивания коэффициентов усиления ФЭУ для каждого счетчика является полностью автоматической и состоит из следующих этапов:

- выставление каждого счетчика на центр пучка, измерение сигналов от счетчика на статистике около 1000 событий (1-2 цикла У-70);
- вычисление правого края электронного спектра, соответствующего максимальному выделению энергии при попадании электрона в центр экспонируемой ячейки;
- подбор и корректировку высоковольтного напряжения ФЭУ счетчика с целью установки края электронного спектра в середину диапазона АЦП (2000±200 отсчетов).

Процедура калибровки производится при фиксированных напряжениях на ФЭУ. Каждый счетчик повторно позиционируется на пучке и записывается увеличенная статистика событий (до  $10^4$ ). При этом каждое событие содержит информацию со счетчиков ЭМК-2, информацию с трековых детекторов, а также с пучковых черенковских счетчиков. В дальнейшем эта информация используется для вычисления калибровочных коэффициентов с учетом идентификации электронов и измерения их импульсов и координат.

Полная процедура калибровки занимает около суток пучкового времени, что определяется скоростью перемещения ЭМК-2 и его кассеты, а также интенсивностью пучка электронов при заданной статистике.

На рис. 12 представлен операторский экран, показывающий характерный спектр сигналов от электронов в калибруемом счетчике (гистограмма слева), а также положение калибруемого счетчика в кассете и схему ее перемещения (окно справа).

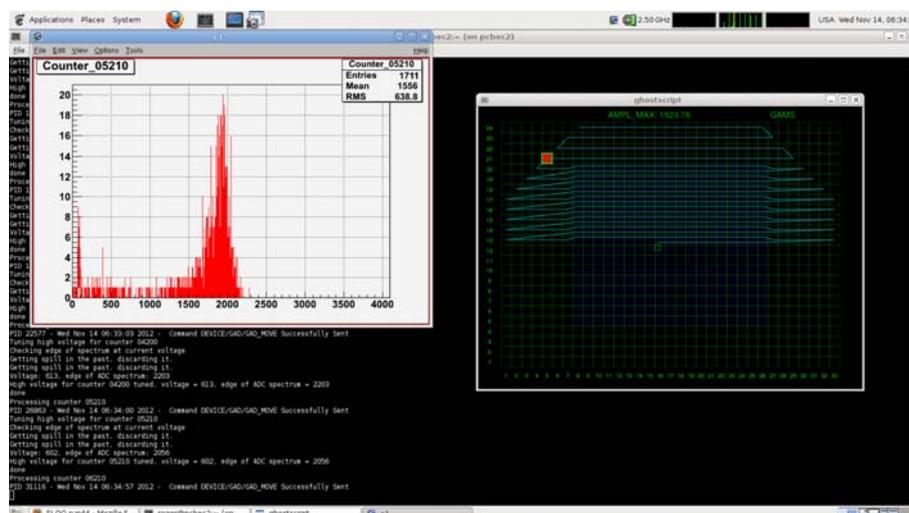


Рис. 12. Экран оператора при электронной калибровке.

## Физические характеристики ЭМК-2

Для изучения основных физических характеристик ЭМК-2 были проведены измерения. На рис. 13 представлены энергетические спектры с калориметра (матрица 5x5) за вычетом номинальной (средней) энергии пучка при энергиях электронов 10 ГэВ (левая гистограмма) и 5 ГэВ (правая гистограмма). При этом энергетическое разрешение, полученное при подгонке данных гистограмм гауссовской функцией, составило:  $\sigma_E / E = 4.1\%$  при  $E = 5$  ГэВ и  $\sigma_E / E = 2.7\%$  при  $E = 10$  ГэВ. В измеренное разрешение дает вклад энергетический разброс пучка.

Точность определения поперечных координат электрона и ее зависимость от энергии оценены численным моделированием на основе программы Geant. Модель модуля ЭМК включала пластины свинца и сцинтиллятора, передний и задний фланцы, а также общую переднюю стенку ЭМК. Стальные спицы, спектросмещающие волокна и более мелкие детали игнорировались. Светосбор не моделировался, отклик определялся как суммарное энерговыделение, приписанное в модели при трассировке частиц объемам сцинтиллятора.

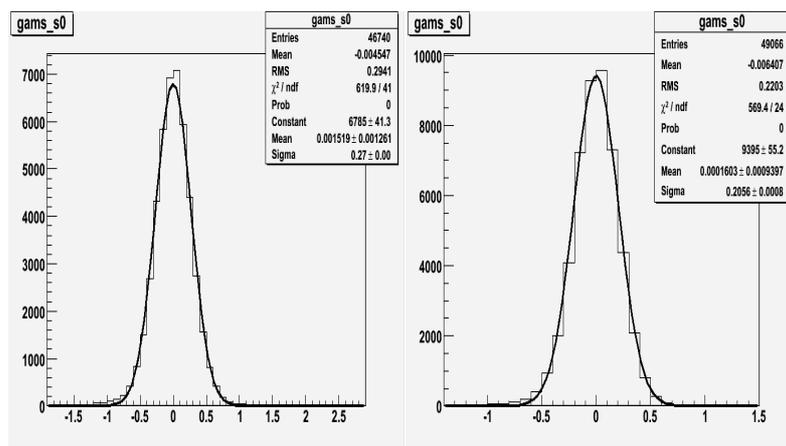


Рис. 13. Энергетические спектры матрицы 5x5 счетчиков калориметра ЭМК-2, измеренные при номинальной энергии пучка 5 ГэВ (справа) и 10 ГэВ(слева).

На рис. 14 представлено распределение по разности между восстановленной и истинной (сгенеренной) координатами модельного ливня для ячеек с размером 38x38 мм<sup>2</sup> при энергии электронов 3 ГэВ.

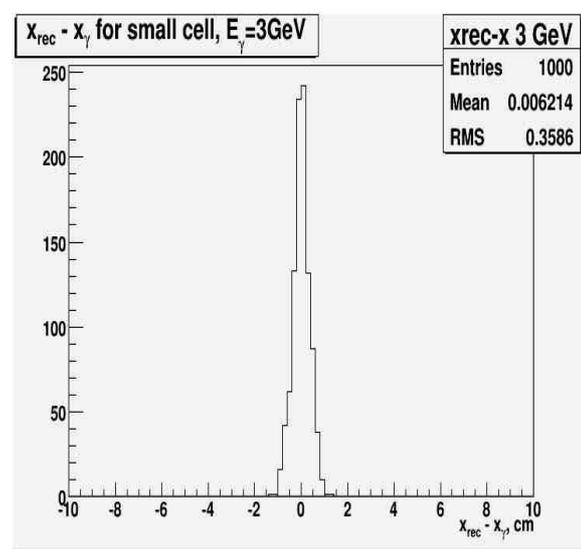


Рис. 14. Разность между восстановленной поперечной координатой ливня и истинной координатой для маленьких ячеек ЭМК-2 при энергии электронов 3 ГэВ (моделирование).

На рис. 15 представлена зависимость координатного разрешения центральной части детектора ЭМК-2 (малые ячейки) от энергии. При энергии порядка 10 ГэВ она выходит на уровень  $\sigma_x \approx 3$  мм.

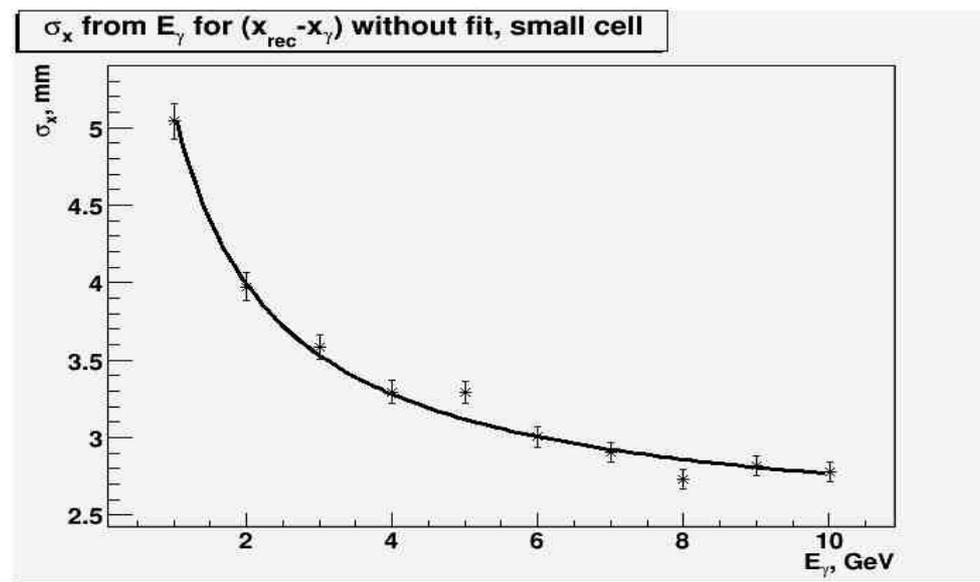


Рис .15. Зависимость координатного разрешения центральной части детектора ЭМК-2 (малые ячейки) от энергии (моделирование).

Параметры калориметра меняются со временем (одна из возможных причин - температурная нестабильность), поэтому при преобразовании амплитуд сигналов со счетчиков калориметра в энергию производится коррекция коэффициентов преобразования для каждой ячейки с использованием измеренного сигнала от системы мониторинга на светодиодах. Качество коррекции демонстрируется построением зависимости средней измеренной инвариантной массы пары  $\gamma$ -квантов в области пика  $\pi^0$ -мезона от времени. На рис. 16 представлена зависимость  $M(\pi^0)$  без учета сигналов от светодиодов, а на рис. 17 – с учетом. В результате введения этих поправок, глобальная нестабильность  $M(\pi^0)$  за сеанс уменьшается с 4-5 МэВ до 1.5-2 МэВ.

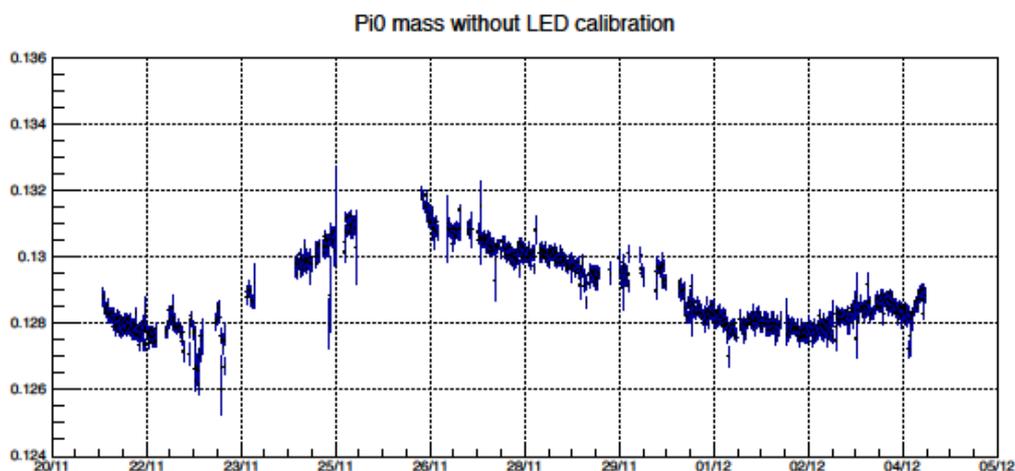


Рис. 16. Зависимость  $M(\pi^0)$  от времени без поправки на сигналы от светодиодов.

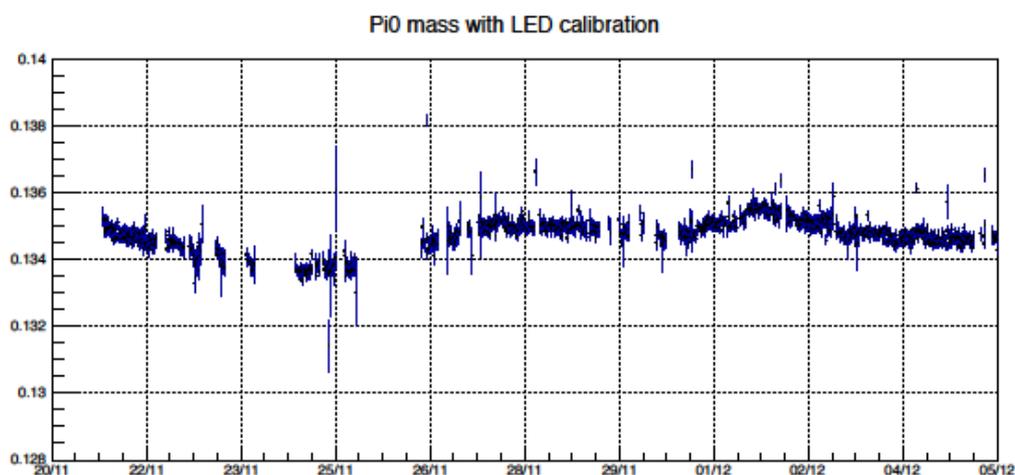


Рис. 17. Зависимость  $M(\pi^0)$  от времени с поправкой на сигналы от светодиодов.

Описание собственно процедуры восстановления ливней в ЭМК, от которой также зависят достигнутые характеристики, выходит за рамки данной работы. Для иллюстрации и в качестве примера физического результата реконструкции на рис. 18 приведен спектр инвариантной массы 2-х гамма-квантов, полученный при отборе реакции  $\pi^- A \rightarrow \pi^- \pi^0 A$ . Отбирались события, содержащие один трек и два гамма-кванта, с требованием эксклюзивности (баланса энергии) и наличием вершины

взаимодействия в области мишени установки. Спектр подгонялся функцией Гаусса для сигнала от распада  $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$  с линейным фоном, при этом масса  $\pi^0$  равна 137.6 МэВ/c<sup>2</sup> (табличная величина 135 МэВ/c<sup>2</sup>),  $\sigma=7$  МэВ/c<sup>2</sup> при средней энергии  $\pi^0$  6 ГэВ. Отклонение массы  $\pi^0$  от номинальной при дальнейшем анализе корректируется постоянной поправкой на энергию гамма-квантов.

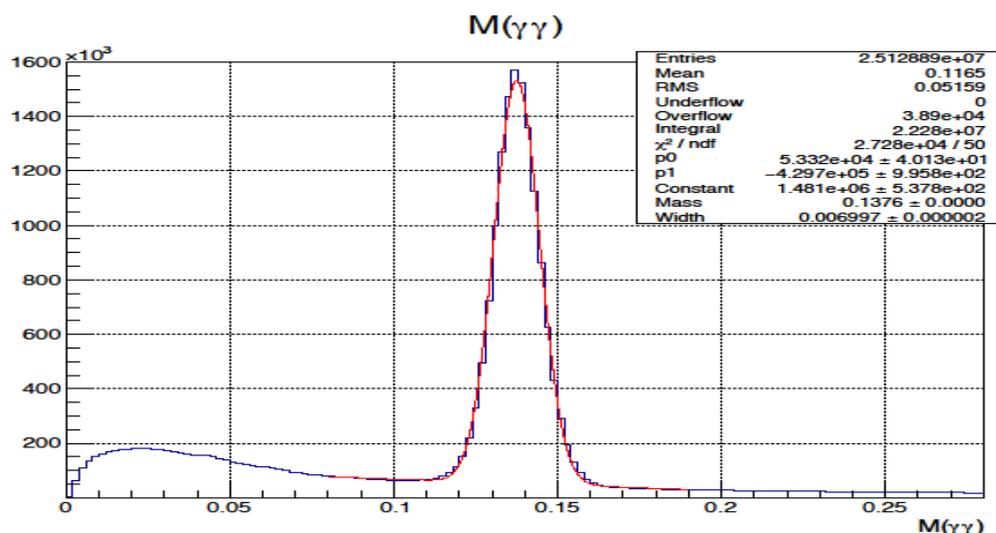


Рис. 18. Спектр инвариантной массы  $M(\gamma\gamma)$  в области сигнала от распада  $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ .

## Заключение

Разработанный и созданный электромагнитный калориметр ЭМК-2 для эксперимента ВЕС успешно проработал в течение нескольких сеансов в 2012-2015 годах. Его характеристики полностью соответствуют требованиям физических задач, решаемых на установке ВЕС.

Авторы выражают благодарность А.М. Зайцеву за поддержку проекта модернизации электромагнитного калориметра, В.А. Полякову за ценные советы и консультации, С.К. Черниченко и А.В. Сухих за решающую роль в изготовлении модулей калориметра, Е.Н. Чернову за модификацию кассеты, Ю.В. Михайлову и М.Ю. Костину за предоставленную информацию и помощь при создании системы высоковольтного питания, Ю.П. Гузу за предложенную доработку схемы преобразователей СВ.

## Список литературы

1. Битюков С.И. и др. Исследование реакций  $\pi^- p \rightarrow \pi^+ \pi^- n$  (Предложение эксперимента), материалы НТС ИФВЭ, Протвино, 1985.
2. Zaitsev F.V., Bityukov S.I. et. al. Recent results from VES Detector, Proc. of International conference of Hadron Spectroscopy, College Park, Univ. of Maryland, USA, 1991, 51.
3. Останков А.П. Создание и изучение электромагнитных калориметров ячеистого типа и исследование редких электромагнитных распадов легких мезонов. Автореферат диссертации ИФВЭ, 96-50, Серпухов, 1996.
4. Поляков В.А., Клейменов В.И. Хаустов Г.В. Донсков С.В., Романовский В.И. Модуль калориметра. Патент РФ № 2388016 от 09.10.2008/ 27.04.2010.
5. V. Polyakov "Shashlik" - ECAL moduls, COMPASS collaboration meeting, Jan 18/19, 2007.
6. Е.В. Волков и др. «Система управления перемещением электромагнитного калориметра установки ВЕС», Препринт ИФВЭ 2012-18. Протвино, 2012.
7. J. D. Cockcroft and E. T. S. Walton, Experiments with High Velocity Positive Ions.(I) Further Developments in the Method of Obtaining High Velocity Positive Ions, Proceedings of the Royal Society A, vol. 136, pp. 619–630, 1932.
8. The COMPASS Collaboration : "Common Muon and Proton Apparatus for Structure and Spectroscopy" CERN/SPSLC 96-14.
9. «Эксперименты с заряженными каонами на сепарированном каонном пучке ускорителя ИФВЭ», предложение эксперимента ОКА, ноябрь 2003.
10. Отладочная плата SK-MAT91SAM9260. <http://www.starterkit.ru>
11. BL-L314C - Round Type LED lamp. [www.betlux.com](http://www.betlux.com),
12. 40 MHz Non-Inverting Quad CMOS Driver - EL7454C, [www.elantec.com](http://www.elantec.com),
13. А.В. Ивашин и др. «Модернизированная система сбора данных установки ВЕС», Препринт ИФВЭ 2010-10. Протвино, 2010.
14. Бушнин Ю.Б. и др. Быстродействующая система регистрирующей и триггерной электроники для экспериментальных исследований в ИФВЭ (МИСС). Препринт ИФВЭ 88-47. Серпухов, 1988.

15. Д.А.Васильев и др. «Система контроля установки ВЕС». Препринт ИФВЭ 2013-2. Протвино, 2013.

*Рукопись поступила 9 июня 2015 г.*

А.В. Ивашин и др.

Новый электромагнитный калориметр модернизированной установки ВЕС.

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного авторами.

---

Подписано к печати 25.06.2015.                      Формат 60 × 84/16.      Цифровая печать.

Печ.л. 1,5.      Уч.–изд.л. 2,2.                      Тираж 80.      Заказ 11.                      Индекс 3649.

---

ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт»

142281, Московская область, г. Протвино, пл. Науки, 1

www.ihep.ru; библиотека <http://web.ihep.su/library/pubs/all-w.htm>

Индекс 3649

---

ПРЕПРИНТ 2015-9,  
ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт», 2015

---