

Эксперимент CMS

А.А. Воробьев, Н.Ф. Бондарь, С.А. Вавилов, Г.Н. Величко, С.С. Волков, Ан.А. Воробьев, В.Л. Головцов, А.Г. Голяш, Ю.И. Гусев, А.С. Денисов, Г.Ф. Жмакин, Ю.М. Иванов, В.С. Козлов, В.И. Лазарев, В.Д. Лебедев, П.М. Левченко, Г.В. Макаренков, Е.М. Оришин, А.А. Петрунин, Д.М. Селиверстов, В.А. Скнар, В.В. Сулимов, В.И.Тараканов, И.И. Ткач, Л.Н. Уваров, Л.А. Щипунов, А.И. Щетковский, В.И. Яцура

1. Введение

Детектор CMS (Compact Muon Solenoid) является универсальным детектором общего назначения для изучения физики протон - протонных столкновений при энергии в системе центра масс 14 ТэВ и полной светимости LHC до $L = 10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Основными целями эксперимента CMS являются физика топ-кварка, поиск Хиггс-бозона, а также поиск «новой физики» за пределами Стандартной Модели (суперсимметричные частицы, новые тяжелые калибровочные бозоны, дополнительные измерения пространства *etc*). Проект детектора CMS подчеркивает важность прецизионных измерений импульсов мюонов, электронов и фотонов для получения высокого разрешения по массам, необходимого для открытия новых частиц. Рис. 1 показывает общий вид детектора CMS. Основные элементы этого детектора:

- Сверхпроводящий соленоид (Superconducting Coil).
- Железное ярмо магнита (Return Yoke).
- Внутренний трекер (Inner Tracker).
- Кристаллический электромагнитный калориметр (Crystal ECAL).
- Адронный калориметр (HCAL).
- Мюонная система (Muon Chambers).
- Передний калориметр (Very Forward Calorimeter).

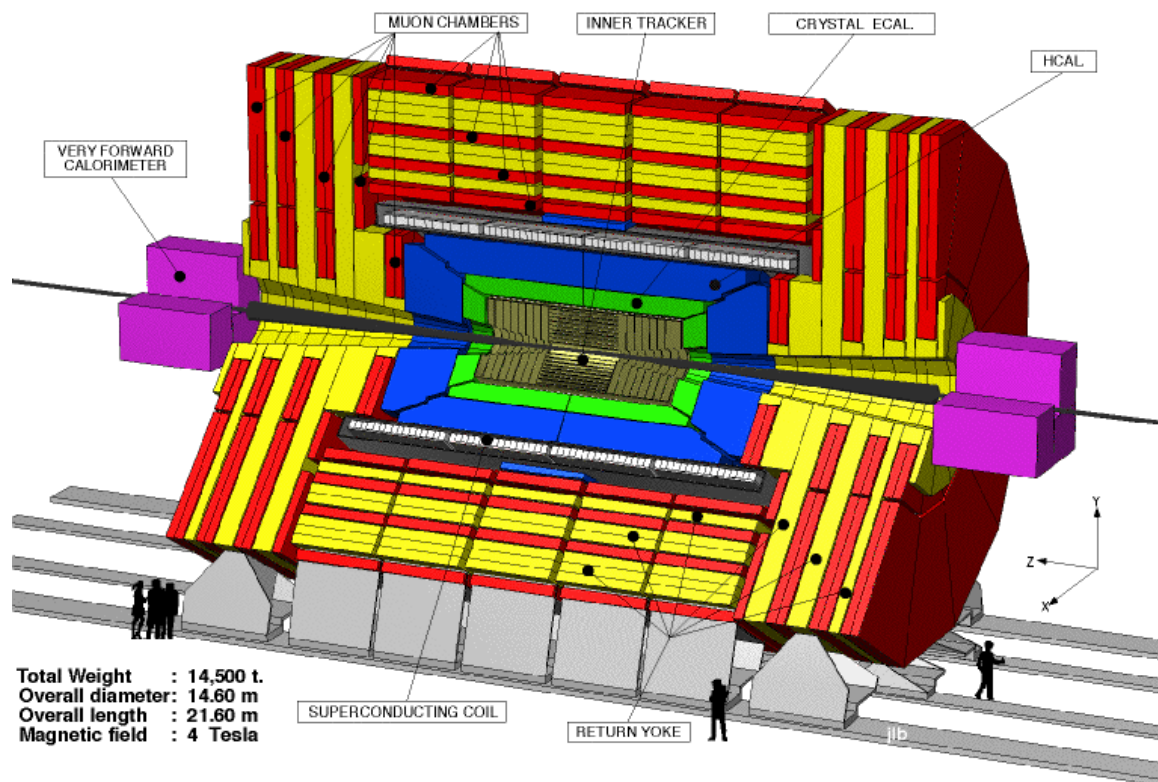


Рис. 1. Общий вид детектора CMS.

2. Мюонная Система детектора CMS

Мюонная Система имеет три основные функции: идентификация мюонов, измерение импульса мюонов и мюонный триггер с хорошо определенным p_t с порогом от нескольких ГэВ/с до 100 ГэВ/с в интервале быстрот до $\eta = 2,1$. Разрешение по импульсу $\delta p_t/p_t$ в автономной моде составляет приблизительно 10% при $p_t = 10$ ГэВ/с и около 30% при $p_t = 1$ ТэВ/с. Полное разрешение по импульсу с использованием Внутреннего Трекера составляет приблизительно 1,5% при $p_t = 10$ ГэВ/с и около 15 % при $p_t = 1$ ТэВ/с. Мюонная Система встроена в ярмо магнита и состоит из Центральной и Торцевых частей.

Главная ответственность ПИЯФ в проекте CMS – участие в проектировании, изготовлении и обеспечении функционирования Торцевой части Мюонной Системы. Эта работа выполняется с 1994 года в тесном сотрудничестве с группами из Национальной Ускорительной Лаборатории им. Энрико Ферми (FNAL), из университета Флориды и из некоторых других американских университетов.

Фактически разработка мюонных систем для коллайдерных детекторов началась в ПИЯФ еще в 1991 года, когда в США было начато строительство протон-антипротонного Сверхпроводящего Супер-коллайдера (SSC) на энергию 20 ТэВ + 20 ТэВ. В то время ПИЯФ вместе с Брукхэвенской Национальной Лабораторией (BNL) предложили мюонную систему для детектора GEM, который был одним из двух детекторов для SSC. Эта система была основана на применении проволочных катодных стриповых камер (CSC). Во время подготовки этого проекта были созданы и протестированы несколько опытных образцов CSC. Кроме того, были исследованы различные газовые смеси, и одна из них ($Ar/CO_2/CF_4$) была рекомендована для использования. Было продемонстрировано, что такая система может обеспечить пространственное и временное разрешение, достаточное для организации автономного мюонного триггера. В начале 1993 года этот проект был рассмотрен сотрудничеством GEM наряду с двумя другими конкурирующими проектами. В результате, проект, основанный на разработках ПИЯФ и BNL CSC, был принят для всей мюонной системы GEM. К сожалению, строительство SSC было остановлено Конгрессом США в октябре 1993 года. После этого решения несколько американских групп организовали новую коллаборацию, которая предложила в феврале 1994 года построить Торцевую часть Мюонной системы для детектора CMS, подобную разработанной для детектора GEM. ПИЯФ стал членом этой коллаборации.

Мюонная Торцевая система CMS (EMU) состоит из двух симметричных частей (передняя и задняя). Каждая из этих частей содержит четыре Мюонных станции (ME1-ME4). Мюонные станции состоят из мюонных камер, помещенных между железными дисками ярма магнита. Каждый из этих дисков имеет 14 м в диаметре. Станция ME1 имеет три кольца мюонных камер (ME1/1, ME1/2, ME1/3). Станции ME2 и ME3 состоят из двух колец камер (ME2,3/1 и ME2,3/2). Станция ME4 имеет только одно кольцо камер (ME4/1), поскольку изготовление кольца ME4/2 было отложено из-за финансовых ограничений. Полная площадь, покрываемая мюонными камерами, составляет приблизительно 1000 м².

Мюонные камеры [1-4] – это специально разработанные CSC с шестью детектирующими слоями трапецидальной формы, как показано на рис. 2.

Conceptual design of a CMS EMU CSC

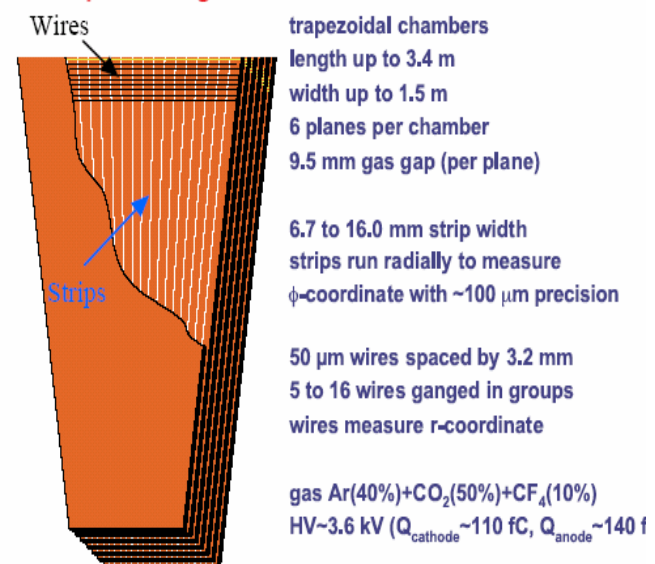


Рис. 2. Эскиз и некоторые параметры CSC.

Катодные панели сделаны из сотовых структур с приклеенными с обеих сторон пластиковыми пластинами (материал FR4), покрытыми медью с наружной стороны. Катодная плоскость разделена на радиально расходящиеся стрипы трапецеидальной формы, которые обеспечивают измерение φ -координаты мюонных треков с точностью до ~ 100 мкм. Анодные проволоки натянуты в перпендикулярном к стрипам направлении и для последующего считывания объединены в группы от 5 до 16 проволок. Они обеспечивают измерение радиальной координаты мюонных треков с точностью несколько сантиметров. Всего система EMU включает 540 мюонных камер, которые содержат около 2,5 миллионов проволок, сгруппированных в 210 816 анодных каналов. Кроме того, имеется 273 024 катодных каналов.

3. Изготовление мюонных камер EMU в ПИЯФ

Проектирование мюонных камер и разработка технологии производства камер были выполнены с активным участием ПИЯФ. Изготовление и тестирование камер были распределены между несколькими группами. ПИЯФ был ответственен за изготовление и тесты всех мюонных камер для зон ME2/1, ME3/1 и ME4/1. Всего 120 мюонных камер (40 камер каждого типа) должны были быть сделаны в ПИЯФ. Каждая камера содержит шесть чувствительных слоев. Поэтому фактически нужно было изготовить 720 однослойных камер с полной площадью более 1400 м^2 и с общим количеством анодных проволок около полумиллиона.

Чтобы выполнить эту задачу, в ПИЯФ было подготовлено специальное производство («фабрика» мюонных камер). Это производство заняло площадь приблизительно 500 м^2 , включая несколько чистых комнат. Оно было оснащено специальным оборудованием, созданным совместно специалистами ПИЯФ и US CMS. В частности, это оборудование включало машину для намотки анодных проволок, устройство для измерения натяжения и шага проволок, специальные столы для склеивания анодных и катодных баров с панелями, сборочные столы, установку с ионизированным газом (азотом) для очистки анодных проволок, стенд для испытаний камер на герметичность, испытательный стенд с источником γ -излучения, стенд для испытаний камер с использованием космических мюонов и некоторые другие устройства. Это оборудование позволило организовать сборку камер в хорошо контролируемых условиях с необходимой скоростью производства: одна шестислойная камера в неделю. Разработанная технология изготовления камер была одобрена сотрудничеством EMU в июне 2001 года после заключения специальной комиссии по определению готовности производства.

Массовое производство мюонных камер в ПИЯФ было начато в октябре 2001 года. Коллаборация US CMS поставляла готовые части мюонных камер (катодные панели, анодные и катодные бары и др.) и большинство материалов, необходимых для сборки камер. Металлические конструкции камер были произведены в ПИЯФ. Процедура сборки контролировалась на каждом этапе: плоскостность катодных панелей, высота газовых промежутков, натяжение проволок, шаг намотки проволок, утечка газа. Собранные камеры проверялись под высоким напряжением с одновременным измерением тока утечки. Требовалось, чтобы величина тока утечки не превышала 100 нА в каждой плоскости при номинальном высоком напряжении $HV = 3,6 \text{ кВ}$. В случае проблем камеры могли быть демонтированы для дополнительной очистки. Однородность газового усиления контролировалась измерением тока, вызванного коллимированным γ -источником,двигающимся над поверхностью камеры (рис. 3). Максимальные отклонения величины газового усиления от среднего не должны были превышать $\pm 50\%$. Все детали процедуры сборки для каждой камеры вместе с результатами контрольных измерений были собраны в специальных папках (рис. 4). Кроме того, эта информация была помещена в специальную базу данных, доступную для сотрудничества EMU через Интернет. Электроника устанавливалась на камерах (рис. 5) только после того, как они прошли все тесты. После этого камеры проверялись на стенде космических лучей (рис. 6).



Рис. 3. Мюонная камера на стенде μ -излучения.



Рис. 4. Мюонная камера, готовая к установке электроники.



Рис. 5. Установка электроники на камере.



Рис. 6. Завершающие испытания мюонных камер на стенде космических лучей.

Электроника на камере включает анодные и катодные FE модули, а также логические модули ALCT и CLCT, которые позволяют он-лайн реконструкцию треков, используя сигналы с шести слоев камеры. Программа завершающего испытания включала 36 различных тестов с импульсным генератором и с космическими мюонами. Рис. 7 показывает один из треков космических мюонов, зарегистрированных мюонной камерой. Измеренные амплитуды сигналов в катодных стрипах всех шести слоев показаны красными столбцами, синие столбцы представляют логические сигналы в анодных каналах. После испытаний на стенде космического излучения, камеры были поставлены на месячную тренировку при номинальном высоком напряжении.

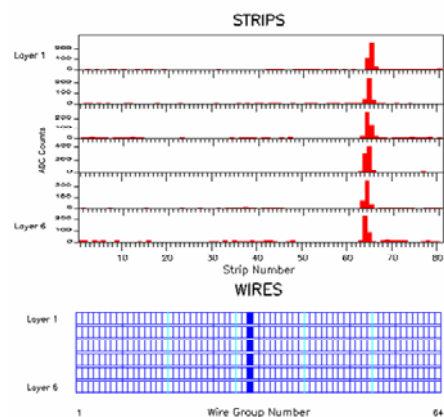


Рис. 7. Трек космического мюона, прошедшего через камеру.

Затем камеры были подготовлены для транспортировки в CERN (рис. 8–9). К концу 2006 года все 120 мюонных камер, изготовленные в ПИЯФ, были благополучно доставлены в CERN.



Рис. 8. Команда ПИЯФ на фоне последних мюонных камер, готовых к транспортировке в ЦЕРН.



Рис. 9. Грузовик с двадцатью мюонными камерами, подготовленными к перевозке в ЦЕРН.

4. Тестирование мюонных камер EMU в CERN и их установка в детекторе CMS



Рис. 10. Высокопоставленные посетители у EMU стенда. Генеральный директор CERN Р. Аймар, министр науки и образования Российской Федерации А. Фурсенко и другие.

Было продемонстрировано, что работа камер не ухудшается вплоть до интегрированной радиационной дозы, соответствующей приблизительно 30 годам работы системы EMU.

На рис. 10 показан рабочий момент посещения EMU стенда высокопоставленными гостями.

Сборка детектора CMS была выполнена в две стадии. Во-первых, все подсистемы были монтированы в зале на поверхности. Рис. 11 показывает, как одна из мюонных камер поднимается специальной системой для установки на железном диске ярма магнита. Можно видеть также камеры, уже установленные на диске. Вся инфраструктура и электроника устанавливались в то же самое время. Это позволило выполнять некоторые тесты системы EMU уже в этой фазе установки. В частности, важные тесты были выполнены в 2006 году с космическими лучами, используя часть собранной системы EMU, включающей мюонные камеры во всех мюонных станциях. Во второй фазе сборки детектора CMS отдельные части были поочередно опущены вниз в подземный зал для заключительной сборки. Рис. 12 демонстрирует процесс спуска одного из железных дисков с

мюонными камерами и всей связанной инфраструктурой. Заметим, что вес диска превышает 1000 тонн. Группа ПИЯФ принимала активное участие в монтаже и испытаниях системы EMU. Эти работы были закончены в начале 2008 года.



Рис. 11. Установка мюонной камеры на железный диск ярма магнита.



Рис. 12. Спуск в подземный зал одного из железных дисков ярма магнита с мюонными камерами.

5. Многоканальный источник высокого напряжения для системы EMU

Система EMU состоит из 468 шестислойных мюонных камер. Кроме того, линия высокого напряжения (HV) в каждом слое разделена на несколько секций (5 секций в камерах ME2,3/2 и 3 секции во всех других камерах). Таким образом, имеется более чем 9000 секций с независимыми линиями HV. Это существенно увеличивает устойчивость системы, так как в случае проблем в одной из секций только данная секция будет выключена, что не сможет заметно ухудшить работу всей системы EMU.

Такой проект потребовал разработки специальной многоканальной системы высокого напряжения, которая могла бы удовлетворить требования эксперимента CMS. Эта проблема была решена совместными усилиями специалистов ПИЯФ и университета Флориды (UF). Блок-схема разработанной системы высокого напряжения для одного из квадрантов системы EMU представлена на рис. 13. Стенд для тестов системы высокого напряжения EMU в ПИЯФ показан на рис. 14.

Высокое напряжение от первичного источника распределено примерно по 2400 линиям HV с независимым регулированием напряжения в каждой линии. Кроме того, ток в каждой линии находится под контролем с возможностью, в случае необходимости, выключить любую линию плавлением предохранителя. Распределение HV сделано в две стадии. Во-первых, девять главных модулей (Master boards) распределяют HV по 72 линиям с регулированием напряжения от 0 до 4 кВ. Эти линии идут по кабелям ~100 метров длиной к 72 удаленным распределительным модулям (Distribution boards). Каждый такой модуль имеет 30 или 36 выходов, идущих непосредственно к мюонным камерам. Модуль с 30 выходами соединен с одной большой камерой ME2,3/2, модуль с 36 выходами соединен с двумя меньшими камерами. Удаленные распределительные модули могут регулировать напряжение в каждом выходном канале на 1 кВ вниз от HV_{max} . Максимальный ток в каждом канале системы HV составляет 100 мкА.

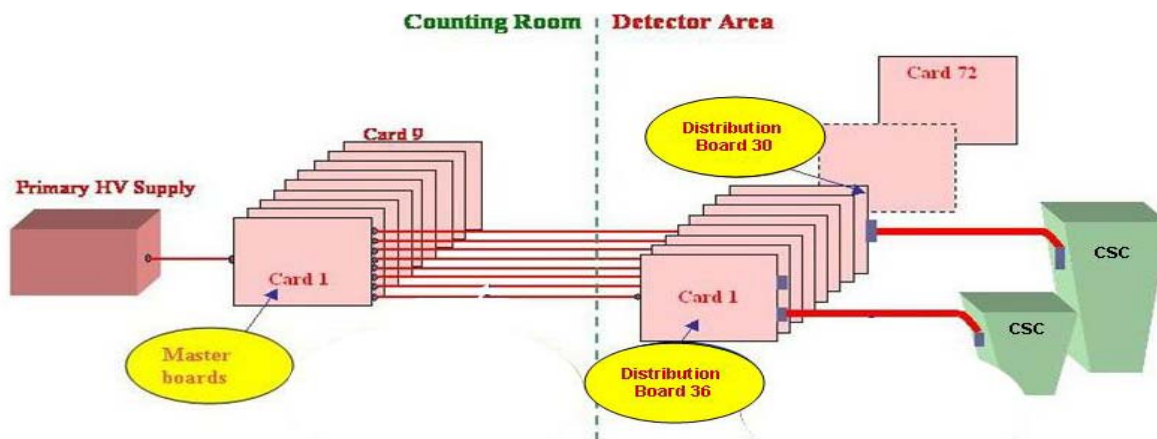


Рис. 13. Блок-схема квадранта EMU системы HV.

Система HV управляется компьютерами с помощью управляющих карт (не показано на рис. 13). Каждая управляющая карта контролирует до 16 распределительных или главных модулей. Важное требование – радиационная устойчивость удаленных распределительных модулей, поскольку они размещены близко к мюонным камерам. Тесты разработанных модулей с гамма- и нейтронной радиацией показали, что они могут работать без проблем в ожидаемой радиационной окружающей среде. Производство системы HV было выполнено сотрудничеством ПИЯФ-UF. К середине 2006 года все модули для системы HV с 9000 каналами (плюс запасные модули для 2500 каналов) были произведены, проверены и доставлены в ЦЕРН.



Рис. 14. Тесты системы высокого напряжения EMU в ПИЯФ.

6. Процессор нахождения треков в мюонной системе EMU

Процессор нахождения треков (Track Finding Processor – TFP) является основным элементом триггерной системы EMU [56]. Цель TFP состоит в том, чтобы связать сегменты трека от отдельных мюонных станций в полный трек, измерить поперечный импульс мюона по изгибу трека в магнитном поле и сообщить о числе и качестве отобранных треков глобальному триггеру 1-го уровня. TFP был разработан инженерами ПИЯФ в сотрудничестве с университетом Флориды. Он был осуществлен в виде 12 процессоров, работающих параллельно. Каждый из них должен идентифицировать до трех лучших мюонных треков в соответствующих 60° азимутальных секторах. Блок-схема TFP показана на рис. 15, демонстрация работы процессора TFP представлена на рис. 16.

Проект TFP основан на самых современных программируемых логических интегральных схемах (Field Programmable Gate Array - FPGA), каждая из которых содержит более миллиона логических элементов.

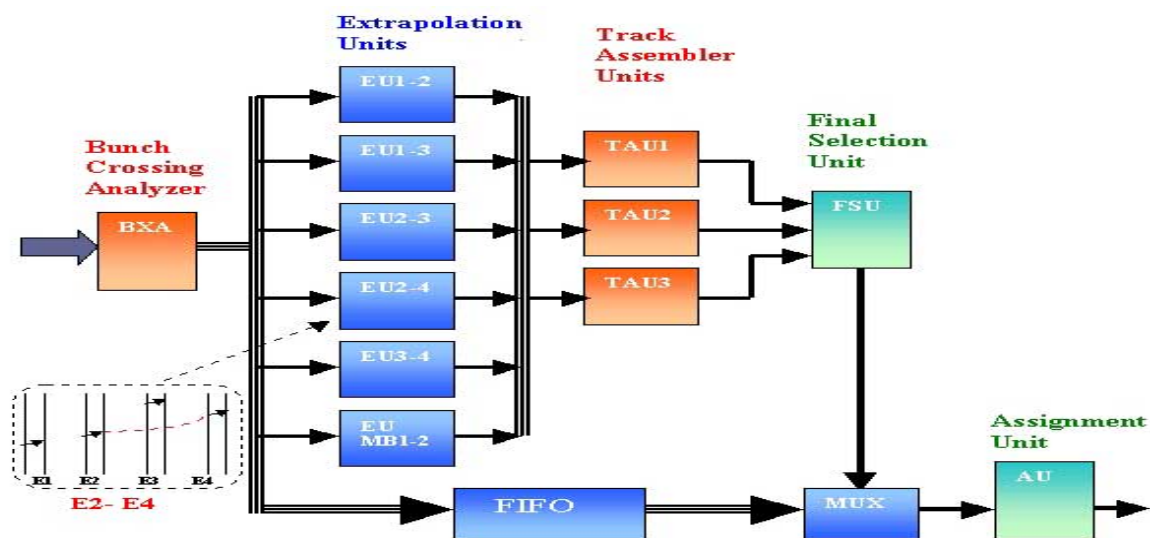


Рис. 15. Блок-схема процессора TFP.

Первый опытный образец TFP был изготовлен в 2000 году и был успешно протестирован в 2000-2001 гг. Он был весьма большой системой, содержащей сорок восемь 9U модулей VME. Время принятия решения этим TFP составляло 375 нс. Опыт, полученный при тестировании этого опытного образца, а также появление на рынке более мощных FPGA, позволили спроектировать новый TFP. Суммарный объем этого TFP был уменьшен в 4 раза (двенадцать 9U модулей VME), а продолжительность обработки была сокращена до 175 нс. TFP был изготовлен американской промышленностью. Тестирование и ввод в действие этой системы были выполнены инженерами ПИЯФ в сотрудничестве со специалистами университета г. Флорида (США). Комбинированные тесты триггерной системы EMU, выполненные на протонном пучке (2004 год) и с космическими лучами (2006 год), подтвердили хорошие параметры процессора.



Рис. 16. Демонстрация работы процессора TFP.

7. Анодная придетекторная электроника

Инженеры ПИЯФ в сотрудничестве с университетом Карнеги-Меллон спроектировали анодную придетекторную электронику для мюонных камер EMU [7]. С этой целью были разработаны два модуля интегральных схем. Один из них (СМР16 – показан на рис. 17) включает дискриминатор-усилитель с 16 каналами. Другой модуль (DEL16) обеспечивает программируемую линию задержки для каждого канала, которая позволяет выравнивать время появления сигналов с шагом задержки 2 нс. На основе СМР16 был разработан анодный FE модуль с 16 каналами (AD16). Разработанный модуль проходил через различные тесты на надежность и радиацию. Изготовление СМР16 и DEL16, а также модуля AD16 было выполнено американской промышленностью. Тесты произведенных интегральных схем (22 000) и модулей (12 000) были выполнены специалистами ПИЯФ. К концу 2002 года все модули были проверены и доставлены в ЦЕРН.

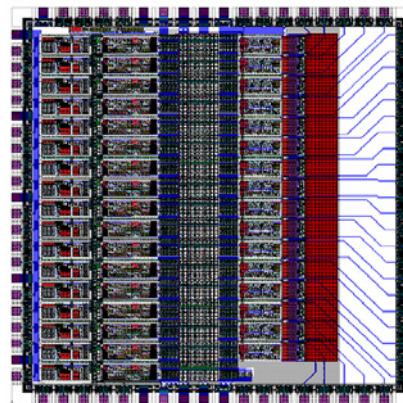


Рис. 17. Интегральная схема СМР16 (16-канальный усилитель-дискриминатор).

8. Выстройка мюонных камер в EMU системе

468 мюонных камер EMU закреплены на дисках магнита, занимая площадь 1000 м². Их геометрическое положение в абсолютной системе координат CMS должно быть известно с точностью 100 микрон в азимутальной плоскости и с миллиметровой точностью в Z-направлении. Эта задача становится еще более сложной из-за существенной деформации железных дисков в магнитном поле. Поэтому необходим постоянный контроль за положением мюонных камер. Для этих целей была разработана сложная система, включающая несколько сотен позиционно-чувствительных детекторов, освещаемых лазерными лучами. Эта работа была выполнена инженерами университета Висконсин с активным участием специалистов ПИЯФ [8]. Глобальные тесты этой системы выстройки были выполнены в 2006–2007 гг. Эти тесты показали весьма удовлетворительные результаты.

9. Фотодетекторы для Торцевого Электромагнитного Калориметра CMS

Электромагнитный Калориметр (ECAL) CMS состоит из кристаллов вольфрамата свинца (PbWO₄). Эти кристаллы дают превосходное разрешение по энергии благодаря высокой плотности (8,28 г/см³), небольшому радиусу Мольера (2,0 см) и короткой радиационной длине (0,89 см). Кроме того, они обеспечивают весьма быстрый (~10 нс) выходной сигнал, и могут работать в окружающей среде с высокой радиацией. ECAL состоит из Центральной части ($|\eta| < 1,48$) и двух Торцевых частей ($1,48 < |\eta| < 3,0$) с 61200 и 21528 кристаллами, соответственно. Суммарный объем кристаллов составляет 8,14 м³ (67,4 тонн) в Центральной части и 3,04 м³ (25,2 тонн) в Торцевых частях.

Свет от кристаллов должен регистрироваться устойчивыми к радиации фотодетекторами, особенно в Торцевых частях, где радиационный уровень намного выше, чем в Центральной части. После обширных исследований предпочтение было отдано кремниевым лавинным фотодетекторам (APD) в Центральной части и к более устойчивым к радиации вакуумным фототриодам (Vacuum Phototriode – VPT) в Торцевых частях. ПИЯФ в сотрудничестве с Научно-исследовательским институтом «Электрон» (НИИЭ, Санкт-Петербург) выполнил исследования различных видов VPT, произведенных в НИИЭ [9–10]. Эти исследования завершились изготовлением VPT (FEU-188), который мог удовлетворить требования эксперимента CMS. Данный VPT имеет плоскую геометрию с фотокатодом (25,5 мм в диаметре), сеткой и твердыми диодами. VPT обеспечивает необходимое усиление в 10–12 раз, и (что является самым важным) это усиление не уменьшается в присутствии магнитного поля до $B = 4$ Тл. Еще одно преимущество разработанного VPT – низкая чувствительность к изменениям напряжения на аноде.

Вначале в НИИЭ были сделаны 500 образцов VPT. Гамма-радиационные тесты этих VPT показали, что усиление уменьшается только на $\sim 7\%$ после радиационной дозы 20 кГр (доза, ожидаемая в течение 10 лет работы LHC). Кроме того, VPT были проверены с реальным прототипом ECAL, показав очень хорошие результаты. Основываясь на этих результатах, сотрудничество CMS решило оборудовать Торцевые части ECAL фотодетекторами FEU-188 и подписало контракт с НИИЭ



на производство 16000 VPT. Производство VPT было закончено в середине 2006 года, и они были доставлены в ЦЕРН. Новые тесты показали высокое качество изготовленных VPT. В результате, сотрудничество CMS приняло решение наградить НИИ «Электрон» специальной Золотой медалью CMS-2007 "За выдающийся вклад промышленности в создание детектора CMS".

Рис. 18. Вручение золотой медали CMS-2007 Научно-исследовательскому институту «Электрон» "За выдающийся вклад промышленности в создание детектора CMS".

Литература

1. D. Acosta, ..., N. Bondar, O. Kiselev, O. Prokofiev, V. Razmyslovich, V. Sedov, S. Sobolev, V. Soulimov, N. Terentiev, A. Vorobyov *et al.*, "Large CMS cathode strip chambers: Design and performance". Nucl. Instr. Meth. A **453**, 182 (2000).
2. D. Acosta, ..., N. Bondar, G. Gavrilov, Yu. Ivanov, P. Levchenko, O. Prokofiev, V. Razmyslovich, L. Shchipunov, V. Sedov, I. Smirnov, S. Sobolev, V. Soulimov, V. Suvorov, N. Terentiev, S. Vavilov, A. Vorobyov *et al.*, "Design features and test results of the CMS endcap muon chambers". Nucl. Instr. Meth. A **494**, 504 (2002).
3. O. Prokofiev, N. Bondar, Yu. Ivanov, G. Gavrilov, A. Krivshich, E. Kuznetsova, P. Levchenko, V. Razmyslovich, L. Shchipunov, I. Smirnov, V. Suvorov, N. Terentiev, S. Vavilov, A. Vorobyov *et al.*, "Aging tests of full scale CMS muon cathode strip chambers". Nucl. Instr. Meth. A **515**, 226 (2003).
4. D.V. Balin and G.N. Velichko, "Performance simulation of the cathode strip chambers for CMS endcap muon system". CERN-CMS-NOTE-2005-014, April 2005, 30p.
5. D. Acosta, ..., A. Atamanchuk, V. Golovtsov, V. Sedov, B. Razmyslovich *et al.*, "Development and test of a prototype regional track-finder for the Level-1 trigger of the cathode strip chamber muon system of CMS". Nucl. Instr. Meth. A **496**, 64 (2003).
6. D. Acosta, ..., V. Golovtsov, M. Kan, L. Uvarov *et al.*, "A 3-D track-finding processor for the CMS level-1 muon trigger". In *Proceedings of the Conference on Computing in High Energy and Nuclear Physics CHEP2003* (La Jolla, USA, 24–28 March 2003), p. THHT002, arXiv: physics/0306117
7. T. Ferguson, N. Bondar, A. Golyash, V. Sedov, N. Terentiev and I. Vorobiev, "Anode front-end electronics for the cathode strip chambers of the CMS Endcap Muon detector", Nucl. Instr. Meth. A **539**, 386 (2005).
8. M. Hohlmann, ..., O. Prokofiev, V. Sknar *et al.*, "Design and performance of the alignment system for the CMS muon endcaps", in *Proceedings of the Nuclear Medical Imaging Conference* (San Diego, USA, 29 October – 4 November 2006), p. 489.
9. Yu. Blinnikov, Yu. Gusev, F. Moroz, D. Seliverstov *et al.*, "Radiation hardness, excess noise factor and short-term gain instability of vacuum phototriodes for the operation in pseudorapidity range $1.5 < \eta < 3.0$ at CMS ECAL". Nucl. Instr. Meth. A **504**, 228 (2003).
10. Yu.I. Gusev, A.I. Kovalev, L.A. Levchenko, F.V. Moroz, D.M. Seliverstov, V.Yu. Trautman, D.O. Yakorev *et al.*, "Super radiation hard vacuum phototriodes for the CMS endcap ECAL". Nucl. Instr. Meth. A **535**, 511 (2004).