

МОДЕРНИЗАЦИЯ ТОРЦЕВЫХ АДРОННЫХ КАЛОРИМЕТРОВ CMS НА LHC

П. Д. Бунин *, *А. В. Зарубин* **
от имени коллаборации CMS

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Представлен обзор основных направлений модернизации системы торцевых адронных калориметров (HE) эксперимента CMS на Большом адронном коллайдере (LHC). Обсуждаются результаты модернизации HE, выполненной в период первой длительной остановки LHC (2013–2014 гг.), и планы модернизации на период остановки LHC (декабрь 2017 г. – март 2018 г.).

The main goals and tasks of the modernization of the hadron endcap system (HE) of the CMS experiment at the Large Hadron Collider (LHC) are presented. The results and plans of the upgrade of HE CMS during the LHC Long Shutdown-1 (2013–2014) and as well as during LHC Extended Year End Technical Stop (December 2016–May 2017) are presented.

PACS: 29.40.Vj

ВВЕДЕНИЕ

Многоцелевая установка «Компактный мюонный соленоид» (CMS) [1] предназначена для изучения pp -взаимодействий на Большом адронном коллайдере (LHC) с целью проведения комплексных исследований в области физики элементарных частиц и изучения фундаментальных законов Природы. Среди намеченных первоочередных задач эксперимента — подтверждение одного из предлагаемых механизмов генерации масс элементарных частиц (исследование свойств открытого в 2012 г. бозона Хиггса и поиск новых скалярных частиц), а также поиск сигналов физики за рамками Стандартной модели взаимодействия элементарных частиц.

Установка CMS имеет цилиндрическую структуру, симметричную относительно точки взаимодействия сталкивающихся пучков протонов. В центре

*E-mail: Pavel.Bunin@cern.ch

**E-mail: Anatoli.Zaroubin@cern.ch

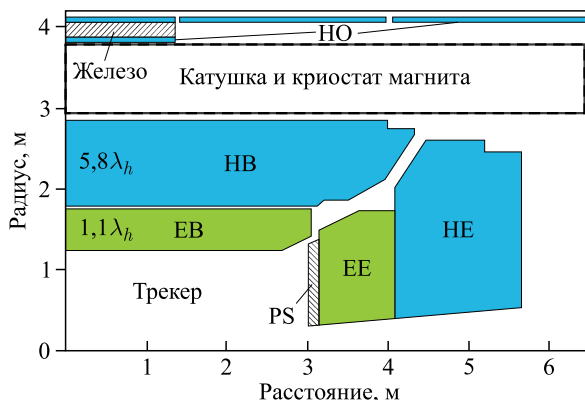


Рис. 1. Схема организации адронной калориметрии CMS

установки находится трековая система, состоящая из пиксельного и кремниевых полосковых детекторов. За трековой частью расположены калориметры — электромагнитный и адронный. Адронный калориметр CMS (рис. 1) состоит из центральной (НВ, область псевдобыстрот $0 < |\eta| < 1,4$), внешней (НО, $0 < |\eta| < 1,2$), торцевой (НЕ, $1,3 < |\eta| < 3$) и передней (НВ, $3 < |\eta| < 5,2$) секций. НВ- и НЕ-калориметры помещены внутрь сверхпроводящего магнита, создающего магнитное поле величиной 3,8 Тл. Снаружи магнита расположены мюонные детекторы, которые находятся в поле солиноида.

Торцевые калориметры [1] включают в себя 36 отдельных секций по 10° каждая. В свою очередь каждая секция состоит из полосок латуни, выступающих в роли абсорбера, и ячеек пластического сцинтиллятора с общим числом каналов считывания 5 тыс. Световые сигналы от сцинтилляторов считываются светопреобразующими волокнами, а затем по оптическим волокнам передаются фотодетекторам, в качестве которых в данном случае используются гибридные фотодиоды (HPD). Аналоговые сигналы считываются с фотодетектора, оцифровываются элементами считывающей электроники калориметра и передаются посредством элементов так называемой регистрирующей электроники, которая обеспечивает отбор событий 0-го и 1-го уровней, в буфер памяти процессорной фермы, обеспечивающей отбор событий 2-го и 3-го уровней (рис. 2). Отбор 0-го и 1-го уровней проводится аппаратными методами на уровне сигнал-шум и сравнением эмулированного сигнала с реальным. Отбор 2-го и 3-го уровней проводится программными методами на уровне масс реконструированных объектов, углов разлета и т. п.

Элементы считывающей электроники размещены непосредственно на детекторе CMS в корзинах считывания. Элементы регистрирующей электро-

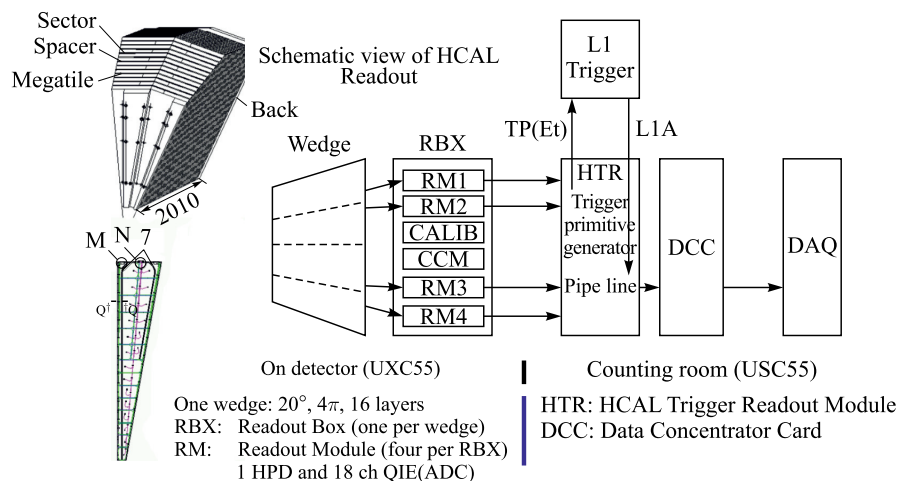


Рис. 2. Схема организации считывающей и регистрирующей электроники HE

ники находятся в подземном служебном помещении, защищенном от воздействия излучений ускорителя и удаленном приблизительно на 100 м от линии пучка.

В настоящее время торцевые адронные калориметры способны проводить измерения характеристик одиночных адронов и адронных струй, работая в сильном аксиальном магнитном поле ($B_z \sim 3$ Тл) при высоком уровне фоновых загрузок до $10^3 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ (~ 100 кГц на канал) и в условиях высокого уровня радиационных нагрузок (устойчивая работа при светимости LHC порядка $10^{15} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$).

В настоящей работе представлен обзор задач и результатов модернизации торцевых частей адронного калориметра CMS для обеспечения эффективной работы в условиях повышенной светимости LHC $L > 10^{34} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

МОДЕРНИЗАЦИЯ ТОРЦЕВЫХ АДРОННЫХ КАЛОРИМЕТРОВ В ПЕРИОД ПЕРВОЙ ДЛИТЕЛЬНОЙ ОСТАНОВКИ LHC

По результатам первого этапа работы LHC в 2009–2012 гг. (Run 1) остро встал вопрос о модернизации считывающей электроники.

Во время набора данных в течение Run 1 одной из основных причин потерь данных стал одиночный радиационно-индуцированный сбой электроники (Single Event Upset, SEU). Было показано, что эффект SEU увеличивается по мере роста светимости ускорителя, что приводит к отказам электроники в одном-двух из 108 секторов адронного калориметра за каждый

зарегистрированный SEU. Вследствие этого на уровне сертификации данных дополнительно были отобраны $\sim 1,6\%$ ($\sim 350 \text{ пб}^{-1}$) от набранных данных как несоответствующие условиям физической задачи. Также был выявлен эффект отказа системы фазовой подстройки частоты (Phase Locked Loop, PLL) в трех блоках управления, который приводил к ошибкам в реконструкции физических событий из-за сдвига временного окна регистрации событий.

В соответствии с техническим проектом усовершенствования системы адронных калориметров CMS [2] первым этапом модернизации элементов считывающей электроники HE в период первой длительной остановки LHC (Long Stop 1, LS1) [3] стала замена управляющих блоков электроники в корзинах считывания, расположенных непосредственно на детекторе CMS. Модернизация включила в себя замену двух из четырех печатных плат блока, перепайку электронных элементов на третьей плате.

В рамках работы по замене управляющего блока были заменены все 32 блока в HE. Также была проведена проверка частотных характеристик элементов электроники непосредственно в CMS, которая показала, что параметры модернизированных элементов электроники удовлетворяют техническим условиям CMS и LHC: при частоте регистрации 40,0789 МГц рабочий диапазон электроники находится в интервале значений 40,0770–40,0811 МГц (рис. 3).

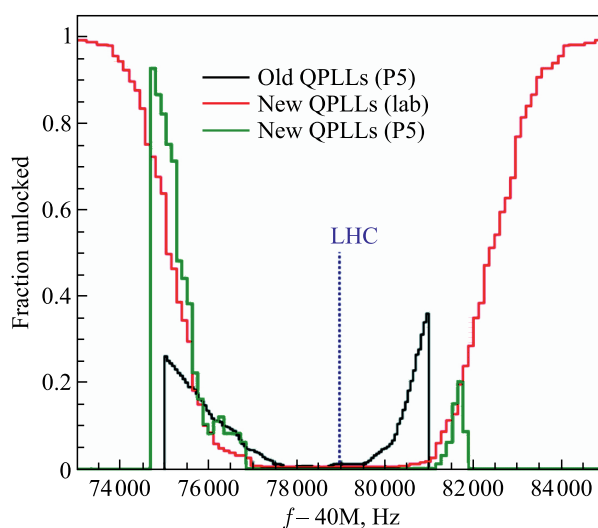


Рис. 3. Зависимость частоты отказов элементов электроники от различных частот регистрации: для немодернизированной системы фазовой подстройки частоты электроники на основе кварцевого генератора QPLL (old), модернизированной QPLL для тестовых испытаний (lab) и установленной на HE CMS (P5)

ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ ТОРЦЕВЫХ АДРОННЫХ КАЛОРИМЕТРОВ В НАЧАЛЬНЫЙ ПЕРИОД ВТОРОГО ЭТАПА РАБОТЫ LHC

Как и во время Run 1, с самого начала второго этапа работы LHC в 2015 г. (Run 2) на встречных пучках протонов и ядер (pp - и PbPb-столкновения) при номинальной величине магнитного поля CMS 3,8 Тл был проведен анализ качества и дальнейший отбор поступающих данных HE. 99 % поступивших данных с HE CMS сертифицированы как удовлетворяющие условию для дальнейшего физического анализа. Неработающих каналов электроники, ошибок чтения сигналов, отказов модулей электроники в HE не выявлено. Измеренные амплитуды сигналов находились в требуемом диапазоне величин. В условиях роста фоновых нагрузок в режиме набора данных при ядро-ядерных столкновениях перегрузок каналов передачи данных с HE между системой набора данных и системой отбора не наблюдалось.

МОДЕРНИЗАЦИЯ ТОРЦЕВЫХ АДРОННЫХ КАЛОРИМЕТРОВ В ПЕРИОД ДЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ ОСТАНОВКИ LHC

Во время Run 2 (2015–2018 гг.) и Run 3 (2021–2023 гг.), которые будут проходить при номинальной энергии 14 ТэВ и светимости свыше $10^{34} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, ожидается существенное повышение потока данных от детекторных систем. Это обуславливается как увеличением потока частиц из точки взаимодействия вследствие увеличения множественности вторичных частиц с ростом энергии взаимодействия, так и увеличением интенсивности протон-протонных столкновений. Рост радиационных нагрузок играет ключевую роль в необходимости модернизации детекторных систем. Используемые в настоящее время гибридные фотодетекторы, разработанные 20 лет назад, не являются оптимальным компонентом адронной калориметрии в условиях поставленной физической задачи. Во-первых, высокое рабочее напряжение данных фотодетекторов (8 кВ) при работе в сильном магнитном поле (3,8 Тл) вызывает электрические пробой в электронике и, как следствие, выход из строя считывающего блока, что ведет к потере данных при работе ускорителя и CMS. Во-вторых, нестабильное поведение каналов фотодетекторов (рис. 4, а) приводит к раскалибровке всей системы и, как следствие, к неверному отклику калориметра при регистрации физических объектов. Ввиду этих причин было принято решение о замене всех гибридных фотодетекторов (HPD) на кремниевые фотоумножители (SiPM), которые нечувствительны к магнитному полю. Кроме того, SiPM обеспечивает усиление на два-три порядка выше, чем HPD, а также обладает более высокой квантовой эффективностью (больше 15 %). Эти обстоятельства позволяют в значительной

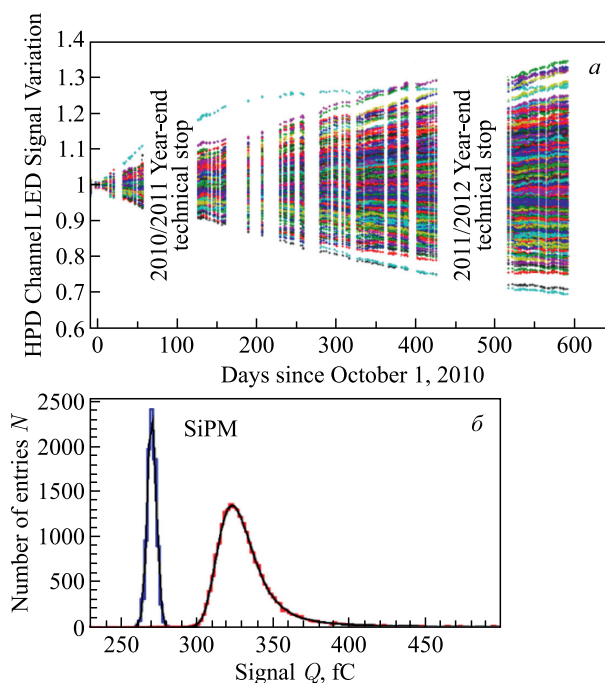


Рис. 4. *a)* Зависимость величины отношения амплитуды сигнала к номинальному в каналах HPD во времени. *б)* Шумовой сигнал и сигнал от регистрации пиона при использовании кремниевого ФЭУ

степени улучшить регистрацию малых световых сигналов за счет увеличения отношения сигнал/шум в несколько раз и обеспечить увеличение продольной гранулярности HE-детекторов (рис. 4, б).

Рабочее напряжение кремневых фотоумножителей порядка 600 В, что не вызывает электрических пробоев в блоке электроники, к тому же они нечувствительны к переменному магнитному полю. Поведение регистрирующих элементов SiPM стабильно во времени, что играет решающую роль в выборе данного компонента электроники адронной калориметрии. Кроме того, новые кремниевые фотоумножители обладают высокой радиационной стойкостью, что было подтверждено соответствующими испытаниями. Замена фотоумножителей влечет за собой увеличение каналов передачи данных. В результате увеличения числа каналов появилась возможность увеличить продольную сегментацию центральной и торцевой частей калориметра. Улучшенная сегментация, являясь интерфейсом между адронным и электромагнитным калориметрами, позволит проводить более точную калибровку системы и эффективно отделять адроны и электроны и идентифицировать другие физические

объекты, такие как адронные ливни. В связи с ростом нагрузки на электронику модернизация адронного калориметра CMS на LHC предусматривает замену не только считывающей, но и регистрирующей электроники. Так, помимо замены гибридных фотоумножителей на кремниевые предусмотрена замена аналого-цифровых преобразователей QIE на более усовершенствованные по сравнению с предыдущей версией, в частности, с интегрированным времяцифровым преобразователем TDC с новым интерфейсом передачи данных со скоростью 4,8 Гбит/с. Также во время длительной технической остановки LHC будет произведена модернизация всех модулей регистрирующей электроники, а именно модулей, обеспечивающих отбор событий 0-го и 1-го уровней, на их усовершенствованную версию, и крейтов стандарта VME на крейты стандарта μ TCA. Замена регистрирующей электроники направлена как на возможность принимать увеличенный объем данных с детектора, так и на усовершенствование интерфейса с триггерной системой CMS.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение авторы выражают благодарность участникам эксперимента CMS за сотрудничество, полезные замечания и обсуждения при подготовке этой работы. Работа поддержана Министерством образования и науки РФ в рамках Соглашения от 17 октября 2014 г. № 14.610.21.0004, идентификатор ПНИЭР RFMEFI61014X0004.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *CMS Collab.* The CMS Experiment at the CERN LHC // JINST. 2008. V. 3. P. S08004.
2. *CMS Collab.* CMS: The Hadron Calorimeter Technical Design Report. Technical Report CERN-LHCC-97-31. 1997.
3. *CMS HCAL Collab.* CMS Technical Design Report for the Phase 1 Upgrade of the Hadron Calorimeter. CERN-LHCC-2012-015; CMS-TDR-10. 2012.
4. *CMS Collab.* CMS, the Compact Muon Solenoid. Technical Proposal CERN/LHCC 1994-038. 1994.