

МОДЕРНИЗАЦИЯ ТОРЦЕВОЙ МЮОННОЙ СИСТЕМЫ CMS

В. Ю. Каржавин от имени коллаборации CMS*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Представлены конфигурация и состав детекторов мюонной системы CMS. В частности, рассмотрены детекторы торцевой части мюонной системы — катодно-стриповые камеры, сформулированы цели и задачи их модернизации. Представлены основные направления и результаты работ по модернизации детекторов мюонной станции ME1/1 и созданию новой мюонной станции ME4/2 в период первой длительной остановки БАК (2013–2014 гг.). На основе экспериментальных данных, полученных после модернизации детекторов (второго периода работы БАК), показано улучшение их основных характеристик.

The configuration and composition of the CMS Muon System is presented. The emphasis is placed on Endcap Muon System detectors — cathode strip chambers (CSC). The goals and tasks of the modernization of the Endcap Muon System are presented. The main results of the upgrade of ME1/1 CSCs as well as construction of the new ME4/2 muon station during the LHC Long Shutdown-1 (2013–2014) are presented. The improved performance of the Endcap Muon System obtained after upgrade (Run 2 data) is shown.

PACS: 95.55.Vj

ВВЕДЕНИЕ

Идентификация мюонов при протон-протонных взаимодействиях на Большом адронном коллайдере (БАК) предоставляет возможность изучения обширной области физических процессов и является основной задачей мюонной системы экспериментальной установки «Компактный мюонный соленоид» (CMS). Мюонная система CMS состоит из двух независимых частей: цилиндрической и торцевой (рис. 1), каждая из которых включает в себя четыре слоя мюонных станций, прослоенных дисками возвратного железного ядра магнита. Мюонная система CMS построена на основе детекторов трех различных технологий, таких как: дрейфовые камеры — DT, расположенные в цилиндрической части; камеры с резистивными пластинами — RPC, расположенные в цилиндрической и торцевой частях; камеры со считыванием информации с катодных стрипов — CSC, расположенные в торцевой части.

*E-mail: Vladimir.Karjavine@cern.ch

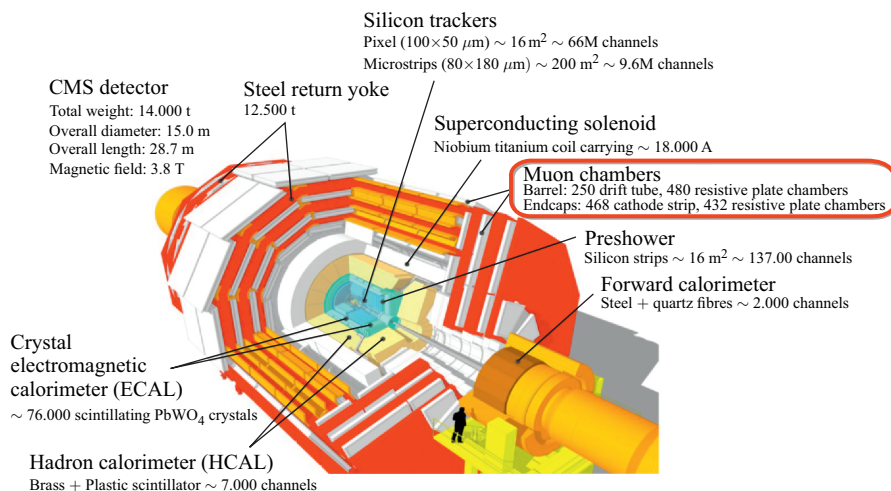


Рис. 1. Экспериментальная установка «Компактный мюонный соленоид» (CMS)

В данной работе представлены результаты модернизации катодных стриповых камер торцевой части мюонной системы CMS в период первой длительной остановки БАК [1]. Катодные стриповые камеры регистрируют мюоны с высокой точностью в области псевдобыстрот $1,2 < |\eta| < 2,4$, работая в неоднородном магнитном поле и в условиях высокого уровня радиационного фона. Торцевая мюонная система CMS состоит из четырех мюонных станций (ME1/1–ME4), включающих 468 катодных стриповых камер. Каждая камера состоит из семи фольгированных панелей, образующих шесть газовых зазоров, в которых натянута анодная проволочка, находящаяся под потенциалом 2,9–3,6 кВ. Координата трека определяется распределением наведенного заряда на стрипах и электронным сигналом с анодных проволочек. Информация, считываемая с катодных стрипов, имеющих ширину 3–16 мм, отфрезерованных на поверхности фольгированных панелей, позволяет определить азимутальную координату мюона, которая важна для измерения его поперечного импульса. Информация, считываемая с анодных проволочек, позволяет определить радиальную координату мюона и точную временную отметку регистрации локального мюонного трека в каждой из шести плоскостей камеры. 3D-сегменты, полученные фитированием локальных координат мюона в каждой из шести плоскостей камеры, называемые заряженными треками, образуют примитивы для выработки триггера в заданной области интереса.

Передняя мюонная станция ME1/1 является важнейшим детектором передней торцевой части установки CMS [2]. ME1/1 расположена внутри соленоида сверхпроводящего магнита в зазоре шириной 70 см между адронным

калориметром HE (Hadron Endcap Calorimeter) и железным диском (рис. 2). Азимутально передняя мюонная станция разделена на 36 секторов (камер CSC). Всего на две торцевые части установлено 72 камеры, которые работают в сильном аксиальном магнитном поле ($B_z \sim 3$ Тл) при высоком уровне фоновых загрузок с плотностью потока частиц до $10^3 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ (~ 100 кГц на канал считывания) и при этом обладают лучшим в торцевой мюонной системе пространственным разрешением: $\sigma_x \leq 75$ мкм, что обеспечивает точную привязку пространственной координаты мюона, определяемой мюонной системой, к координате внутреннего трека детектора CMS.

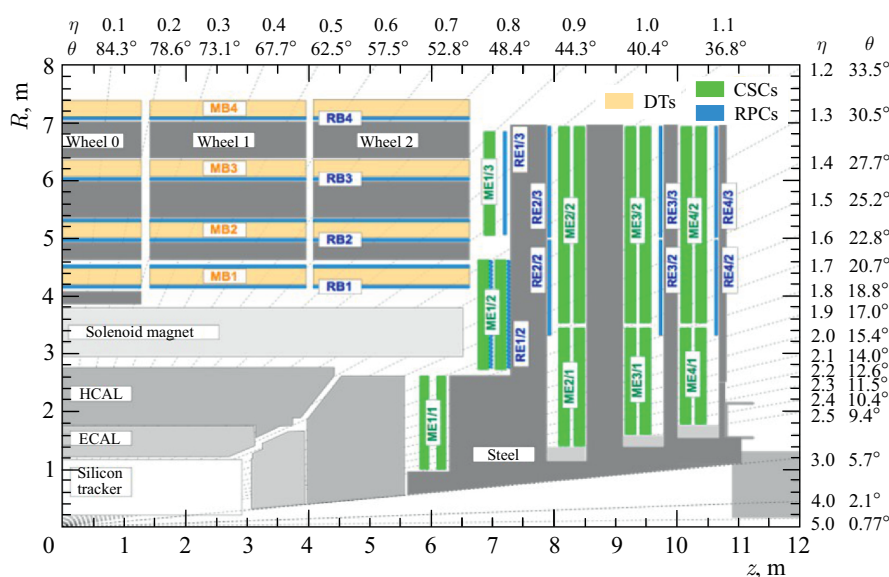


Рис. 2. Продольное сечение детектора CMS. Расположение мюонных станций торцевой мюонной системы

Катодные стриповые камеры оснащены быстрой и надежной электроникой, обеспечивающей способность работы в режиме самотриггирования. В начальный период работы БАК, при низкой светимости, мюонная система CMS обеспечила надежный и эффективный набор экспериментальных данных.

МОДЕРНИЗАЦИЯ ТОРЦЕВОЙ МЮОННОЙ СИСТЕМЫ В ПЕРИОД ПЕРВОЙ ДЛИТЕЛЬНОЙ ОСТАНОВКИ БАК

Основной задачей модернизации установки CMS является обеспечение эффективной работы всех систем в условиях повышенной светимости БАК $> 10^{34} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ при протон-протонных соударениях.

План первого этапа модернизации торцевой мюонной системы CMS в период первой длительной остановки БАК, сформулированный в техническом проекте CMS (CMS U1 TDR 2011/06/01) [3], включает следующие основные направления: строительство новой мюонной станции ME4/2 (см. рис. 2), модернизацию детекторов передней станции ME1/1 и оснащение их новой быстродействующей электроникой считывания.

Строительство новой мюонной станции ME4/2, состоящей из 72 катодных стриповых камер, расширяет мюонную систему на одну дополнительную мюонную станцию, что повышает надежность и эффективность регистрации мюонов в диапазоне псевдобыстрот $1,2 < \eta < 1,8$. Уменьшение количества ложных событий при триггировании и реконструкции трека (рис. 3) позволяет снизить порог измерения поперечного импульса мюона. Детекторы мюонной станции ME4/2 оснащены электроникой, демонтированной со станции ME1/1 (восстановленной после замены). Панели для 72 камер станции ME4/2 изготовлены во FNAL. В ЦЕРН построена фабрика производства камер для станции ME4/2, где проводились сборка и тестирование камер (рис. 4).

Основные задачи модернизации передней мюонной станции ME1/1: повышение эффективности и точности измерения координаты мюона, а также повышение эффективности выработки триггера. Особенность детекторов мюонной станции ME1/1 состоит в том, что для уменьшения загрузок в области больших значений псевдобыстрот $1,6 < \eta < 2,4$ (субкамера ME1/1a) катодные плоскости разделены поперечным зазором на две субкамеры — ME1/1a и ME1/1b. На этапе строительства CMS для уменьшения количества каналов электроники считывания стрипы в нижней субкамере ME1/1a объединены

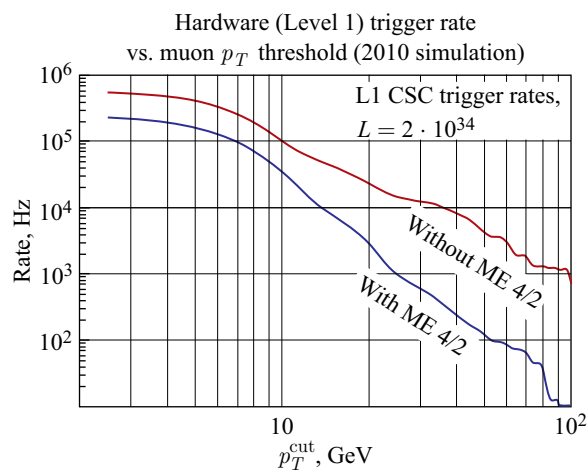


Рис. 3. Зависимость частоты триггера первого уровня от порога регистрации поперечного импульса

в группы по три и вместо трех карт считывания информации со стрипов (CFEB) была установлена одна, что привело к трехкратной неоднозначности в триггировании и реконструкции трека. Занятость каналов считывания в ME1/1a возросла примерно в три раза (рис. 5), что привело к деградации эффективности триггирования. В результате модернизации объединение стрипов было устранено, благодаря чему восстановлен порядок считывания, при котором каждому стрипу соответствует свой канал регистрации информации. Для этого в субкамере ME1/1a установлены две дополнительные карты считывания информации со стрипов. Всего на каждой камере ME1/1 после модернизации установлено семь 96-канальных цифровых карт считывания информации с катодных стрипов (DCFEB). Отличие DCFEB от предыдущей аналоговой версии карты CFEB состоит в следующем: аналоговая память заменена на цифровую конвейерную память, позволяющую работать без

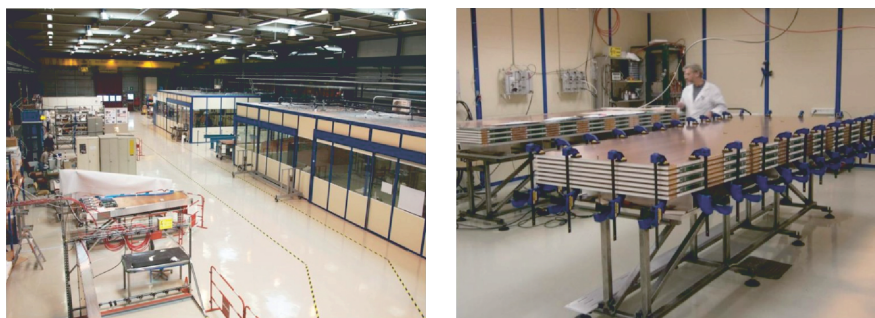


Рис. 4. Участок сборки и тестирования камер мюонной станции ME4/2 в ЦЕРН

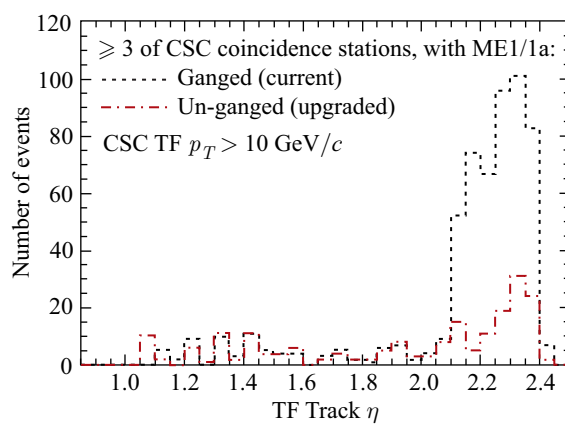


Рис. 5. Возрастание времени занятости канала считывания информации при объединении трех стрипов

мертвого времени, что повысило эффективность детектора при больших нагрузках. На цифровой карте DCFEB установлена современная логическая матрица Virtex-6 и организован оптический съем информации. Платы CFEB, демонтированные с детекторов ME1/1, были проверены и установлены на камеры новой мюонной станции ME4/2. Плата выработки анодного локального трека ALCT снабжена новой программируемой схемой Spartan-6, позволяющей работать с большими нагрузками. Модернизация накамерной электроники в свою очередь потребовала замены триггерных модулей ТМВ и модулей считывания информации DMВ в периферийных крейтах. Разработаны, изготовлены и установлены новые модули OTMB и ODMB, способные принимать оптическую информацию с семи цифровых карт DCFEB. Увеличение количества электроники повлекло за собой необходимость в новой, более мощной системе низковольтного питания, включающей четыре дополнительных первичных источника питания Maraton мощностью 3,6 кВт, коммутационные панели и семиканальные платы распределения питания на детекторах LVDB-7. Блок-схема модернизированной электроники считывания мюонной станции ME1/1, расположенной на камерах и в периферийных крейтах [4], представлена на рис. 6. В рамках отмечены электронные модули, разработанные и изготовленные для модернизации мюонной станции ME1/1. Все детекторы мюонных станций ME1/1 и ME4/2 были многократно проверены до и после монтажа в экспериментальную установку CMS. Полный набор тестов включал проверку общего функционирования, проверку соединений, тесты триггерной логики, проверку качества передаваемых данных и измерение уровня шумов.

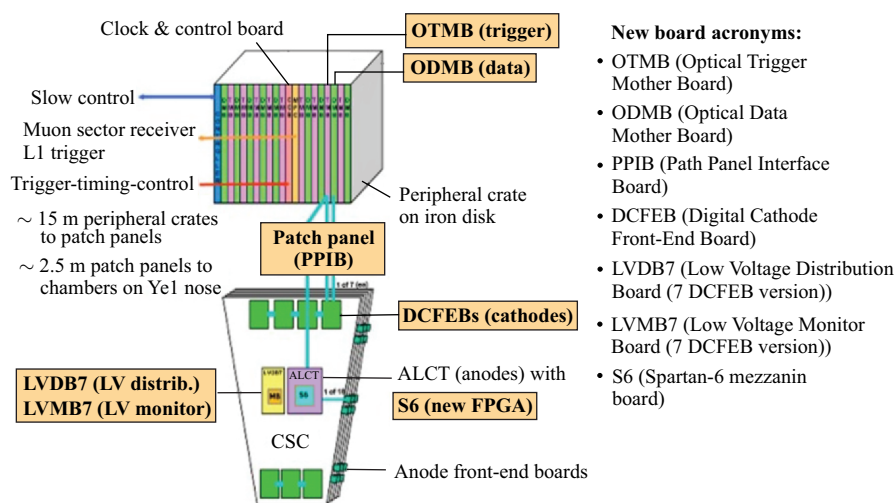
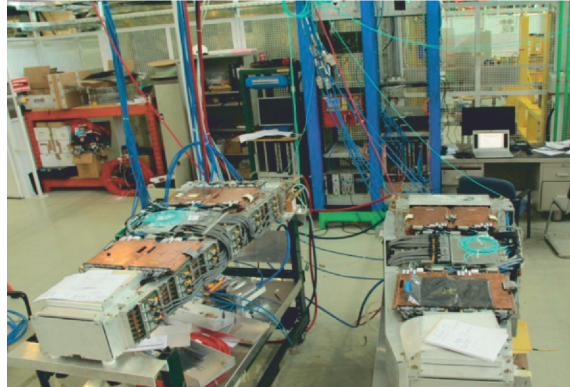


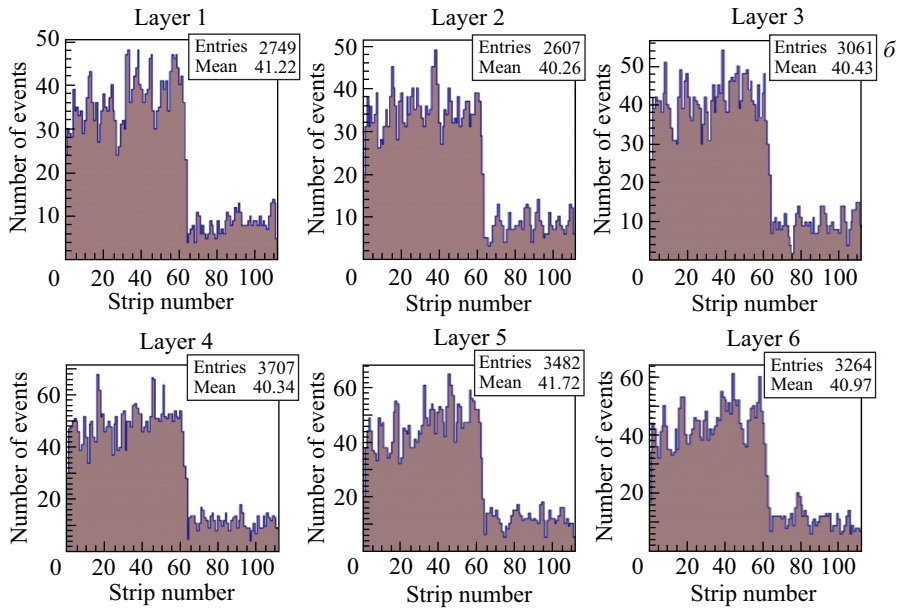
Рис. 6. Блок-схема модернизированной электроники считывания мюонной станции ME1/1

Для проверки использовался входной сигнал как от генератора импульсов, так и от космических частиц. Каждая камера проходила четырехнедельный тест с высоким напряжением и с контролем утечки газа. Камеры, прошедшие



a

CFEB: SCA Active strips occupancy crate ID = 38. DMB ID = 03
Run#: online_00221796 Time: Fri Jun 6 14:39:34 2014



b

Рис. 7. *a*) Стенд для проверки камер после сборки. *б*) Пример гистограммы качества данных — загрузка по стрипам

все этапы тестирования, считались готовыми к установке. На рис. 7 показаны стенд для проверки камер после сборки и пример проверки качества данных — гистограммы загрузки слоев камеры по стрипам. Тесты проверки соединений и качества данных повторены после монтажа камер в CMS.

ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ CSC В НАЧАЛЬНЫЙ ПЕРИОД ВТОРОГО ЭТАПА РАБОТЫ БАК (Run 2)

Первые протон-протонные соударения с энергией $\sqrt{s} = 13$ ТэВ получены на БАК 13 июня 2015 г. С тех пор модернизированные камеры торцевой мюонной системы стабильно работают, показывая лучшие, по сравнению с первым периодом набора данных, характеристики. Загрузка реконструированных событий однородна для каждого отдельного кольца (рис. 8). Это наглядный тест работоспособности камер. Неправильно работающие детекторы показывают либо слабую, либо высокую загрузку. Сравнительная характеристика загрузки реконструированных событий, полученных во время первого и второго периодов набора данных, показывает улучшение во втором периоде за счет замены и ремонта нескольких проблемных камер ME1/1. Пространственное

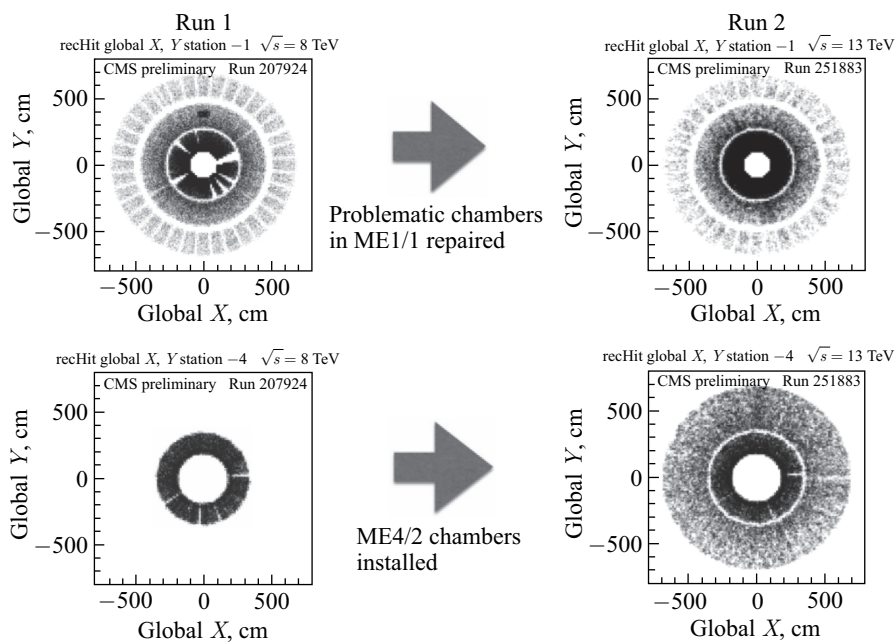


Рис. 8. Сравнительная характеристика работоспособности мюонных камер во время первого и второго периодов набора данных

разрешение модернизированных детекторов ME1/1a, перекрывающих кинематическую область с псевдобыстродами $2,1 < |\eta| < 2,5$, улучшилось на 20%. Во втором периоде набора данных значение пространственного разрешения ME1/1a составило $\sigma = 51$ мкм, в то время как в первом периоде разрешение было $\sigma = 64$ мкм (рис. 9). Причина повышения точности восстановления пространственной координаты в ME1/1a определяется тем, что

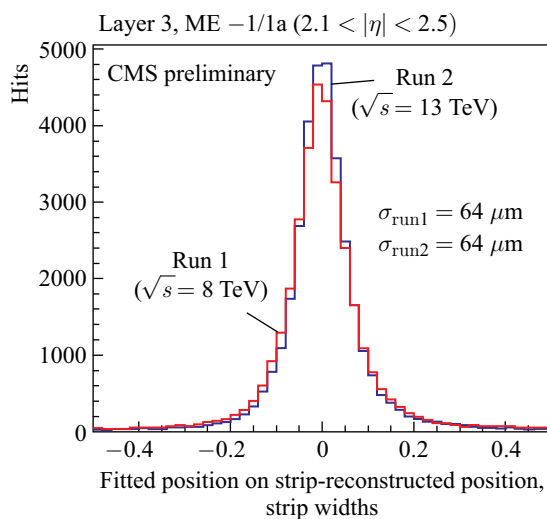


Рис. 9. Пространственное разрешение модернизированных камер ME1/1a уменьшилось на 20% ($\sigma_{\text{run2}} = 51$ мкм)

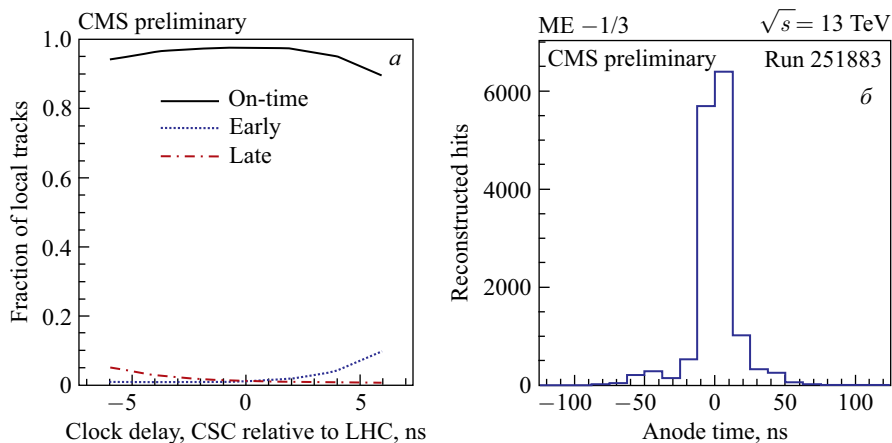


Рис. 10. а) Фракции локальных треков, пришедших вовремя, раньше и с опозданием. б) Распределение времени идентификации события в точке взаимодействия

при исправлении упомянутого выше трехстрипового объединения произошло уменьшение входной емкости и, соответственно, снизились шумы в канале считывания. Пространственное разрешение всех камер торцевой мюонной системы варьируется в пределах 50–140 мкм в зависимости от станции, что соответствует азимутальному разрешению $\Phi \sim 0,1$ мрад.

Детекторы торцевой мюонной системы были стаймированы с помощью подстройки задержки привязки частоты синхронизации мюонных камер относительно синхронизации БАК. Задержка подбиралась по критерию нахождения максимального числа локальных треков в выбранном временном диапазоне. На рис. 10 показаны фракции локальных треков, пришедших вовремя, раньше и с опозданием. Видно, что время точки взаимодействия, измеренное с помощью информации с анодных проволок для отдельных восстановленных событий, группируется в центре около нуля, что является критерием таймирования детекторов. Точность таймирования и синхронизации камер эквивалентна значению, полученному до модернизации детекторов, и соответствует требованиям мюонной системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Модернизация торцевой мюонной системы, выполненная в период первой длительной остановки БАК, успешно завершена благодаря усилиям многих людей. Модернизация мюонной станции ME1/1 позволила устранить неоднозначность в определении координаты в области больших значений псевдобыстрот $2 < \eta < 2,4$ и уменьшить мертвое время. Пространственное разрешение субдетектора ME1/1a улучшено на 20 %. Создание дополнительной мюонной станции ME4/2 обеспечило повышение надежности и эффективности регистрации событий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *CMS Collab.* CMS, the Compact Muon Solenoid: Technical Proposal. CERN/LHCC 1994-038. 1994.
2. *Ershov Yu. V., Golunov A. O., Golutvin I. A., Gorbunov N. V., Kamenev A. Yu., Karjavin V. Yu. et al.* Cathode Strip Chamber for CMS ME1/1 Endcap Muon Station // Part. Nucl., Lett. 2006. V. 3, No. 3(132). P. 73–80.
3. *CMS Collab.* Technical Design Proposal for the Upgrade of the CMS Detector through 2020. 2011. CMS UG-TP-1.
4. *CMS Collab.* The CMS Experiment at the CERN LHC // JINST. 2008. V. 3. P. S08004.