

*На правах рукописи*

*Курепин  
Александр Николаевич*

Автоматизированная система управления  
и контроля стартового детектора времяпролетной  
системы эксперимента ALICE  
на Большом адронном коллайдере

Специальность 01.04.01 - приборы и методы  
экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва — 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН)

**Научный руководитель:**

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник  
Лаборатории релятивистской ядерной физики ОЭФ ИЯИ РАН,  
*Каравичева Татьяна Львовна.*

**Официальные оппоненты:**

*Литвиненко Анатолий Григорьевич*, доктор физико-математических наук, начальник сектора Лаборатории физики высоких энергий Объединённого Института Ядерных Исследований (г. Дубна).

*Наумов Петр Юрьевич*, кандидат физико-математических наук, Доцент, кафедры "Экспериментальные методы ядерной физики" Национального исследовательского ядерного университет НИЯУ МИФИ (г. Москва)

**Ведущая организация:**

Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, (г. Москва)

Защита состоится \_\_\_\_\_ в \_\_\_\_\_ часов  
на заседании диссертационного совета Д 002.119.01 на базе  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Института ядерных исследований Российской академии наук  
по адресу: 117312, Москва, проспект 60-летия Октября 7А.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯИ РАН  
и на сайте <http://www.inr.ru/>

Автореферат разослан

Ученый секретарь

диссертационного совета

доктор физико-математических наук

С.В. Троицкий

## **Общая характеристика работы**

### **Актуальность работы**

ALICE (A Large Ion Collider Experiment) — один из крупнейших экспериментов, который проводится на ускорителе LHC (Large Hadron Collider — Большой адронный коллайдер) в CERN. Основная цель этого эксперимента заключается в исследовании столкновения тяжелых ионов при сверхвысоких энергиях и в поиске экспериментальных указаний на образование нового состояния ядерной материи — кварк-глюонной плазмы [1].

Стартовый детектор T0 является частью времяпролетной системы эксперимента ALICE и определяет время столкновения встречных пучков. Также он формирует триггерные сигналы. Для обеспечения надежной работы детектора и получения рекордного временного разрешения необходима разработка и создание автоматизированной системы управления и контроля стартового детектора T0.

### **Цель работы**

1. Разработка методики построения распределенной системы управления и контроля для стартового и времяпролетного детектора T0.
2. Создание, отладка и испытание системы управления и контроля стартового и времяпролетного детектора T0.
3. Разработка и реализация метода автоматической настройки, калибровки и установки параметров стартового детектора в зависимости от условий проведения эксперимента ALICE.

### **Научная новизна**

Созданная система управления и контроля детектором T0 предназначена для работы в составе установки ALICE и обеспечивает стабильность уникальных временных и триггерных характеристик

детектора T0. Разработанная система является первым опытом в создании нового поколения DCS, выполняющих автоматическую настройку временных сигналов и амплитудную калибровку во время вывода пучков и набора экспериментальных данных.

### **Практическая значимость**

Детектор T0 является частью действующей установки ALICE, обладающей уникальными характеристиками в области идентификации частиц. Полученный опыт может быть использован при разработке новых систем, основанных на черенковских детекторах. Создание подобной стартовой системы может быть необходимо для нового эксперимента MPD/NICA в лаборатории ЛФВЭ ОИЯИ в Дубне.

Материал, представленный в диссертации, может служить пособием для ознакомления с детектором T0. Содержащаяся в диссертации информация будет полезна экспертам по автоматизации установок.

Созданная система позволила обеспечить бесперебойную работу детектора T0 во время измерительных сеансов 2009-2013 г. на установке ALICE и обеспечила стабильное временное разрешение необходимое для идентификации частиц.

### **Личный вклад автора**

1. Предложена и реализована методика построения распределенной системы управления и контроля детектором T0.
2. Разработаны правила безопасной работы установки.
3. Составлены алгоритмы автоматической настройки и калибровки стартового детектора в зависимости от условий проведения эксперимента ALICE.
4. Разработана и внедрена методика подготовки оператора для работы с системой управления стартового детектора, максимально приближенная к реальным условиям.



Приведенные результаты получены либо самим автором, либо при его непосредственном участии.

Автор участвовал в сборке детектора, дежурствах во время набора данных на протон-протонных и ион-ионных сеансах, при модернизации оборудования, проводил измерения на детекторе при различных значениях магнитного поля, проводил настройку и последующую калибровку детектора.

### **Положения, выносимые на защиту**

- ◆ Методика построения распределенной системы управления и контроля детектора T0 эксперимента ALICE.
- ◆ Создание распределенной системы управления и контроля детектора T0 эксперимента ALICE
- ◆ Методы автоматической настройки и калибровки стартового детектора в зависимости от условий проведения эксперимента ALICE.
- ◆ Обеспечение стабильности временных и амплитудных характеристик стартового детектора времяпролетной системы.

### **Апробация работы**

Результаты диссертации были представлены в виде докладов на:

- ◆ Научной сессии МИФИ-2005 (Россия, г. Москва, 2005 г.)
- ◆ Конференции «13th ISTC SAC Seminar “New Perspectives of High Energy Physics” 1-5 September, 2010, Novosibirsk, Russia»
- ◆ Рабочих международных совещаниях коллаборации ALICE (2008–2014 гг.)

### **Публикации**

Всего по теме диссертации опубликовано 18 работ. Основные научные результаты диссертации опубликованы в журналах, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендованных ВАК России:

1. ALICE Collaboration (K. Aamodt et al.), «The ALICE experiment at the CERN LHC» JINST, т. 3, № S08002 , p. 259 pp., 2008.
2. В. Григорьев, В. Каплин, Т. Каравичева, А.Н. Курепин и А.Б. Курепин, «Методы измерения амплитуд сигналов черенковских счетчиков» Приборы и техника эксперимента, т. 3, pp. 45-49, 2009.
3. А. В. Веселовский, В. А. Григорьев, В. А. Каплин, А. Б. Курепин, А. Н. Курепин и Т. Л. Каравичева, «Система быстрой электроники стартового триггерного детектора T0 эксперимента ALICE» Приборы и техника эксперимента, т. 2, 2009.
4. А. В. Веселовский, А. В. Григорьев, В. А. Григорьев, А. Б. Курепин, А. Н. Курепин и Т. Л. Каравичева, «Модуль формирования управляющих сигналов детектора T0 эксперимента ALICE» Приборы и техника эксперимента, т. 5, pp. 73-77, 2010.
5. T. Malkiewicz, F. Nendaz, A.S. Anoshko, A. Bogdanov, B. Cheynis, L. Ducroux, V.A. Grigoriev, J.-Y. Grossiord, F.F. Guber, V.A. Kaplin, T.L. Karavicheva, O. V. Karavichev, E. V. Karpechev, A. B. Kurepin, A. N. Kurepin, A. I. Maevskaya, T. Nayak, M. Oledzki, A. I. Reshetin, R. Tieulent и . W. H. Trzaska, «Luminosity determination in ALICE with T0 and V0 detectors» Indian journal of physics, т. 85, № 6, 2011.
6. А. В. Веселовский, А. Б. Курепин, А. Н. Курепин и Т. Л. Каравичева, «Автоматизированная система управления стартовым триггерным детектором T0 эксперимента ALICE (LHC, CERN)» ИЯИ РАН Препринт, Москва, 2011.

Журналы «Приборы и техника эксперимента», «Indian journal of physics» включены в реферативную базу данных по мировым научным публикациям «Web of Science».

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка цитируемой литературы, списка публикаций автора по теме диссертации. Работа изложена на 165 страницах машинописного текста, включая 69 рисунков и 3 таблицы.

## Краткое содержание диссертации

Во введении приводятся общие сведения об ускорителе LHC и описание эксперимента ALICE.

Большой адронный коллайдер расположен вблизи границы Франции и Швейцарии. Этот коллайдер создан на основе остановленного электронного коллайдера LEP (1981-2000). Туннель LHC имеет длину около 27 км, в котором расположено больше чем 1200 сверхпроводящих дипольных магнитов. Проектная энергия LHC для протонов  $\sqrt{s} = 14$  ТэВ, а для ионов свинца  $\sqrt{s} = 5,5$  ТэВ на нуклон.

ALICE (A Large Ion Collider Experiment) — эксперимент по изучению свойств кварк-глюонной плазмы, нового состояния вещества при экстремальном сжатии и температуре. Основное направления работ в эксперименте ALICE — исследование ядро-ядерных взаимодействий, однако физическая программа также включает изучение протон-протонных и протон-ядерных столкновений [1].

ALICE — это установка баррельного типа, размещённая внутри магнита-соленоида длиной 16 м, диаметром 16 м с максимальной напряженностью магнитного поля 0,5 Тесла. Длина установки 26 м.

Задача центральных баррельных детекторов — идентификация адронов, электронов и фотонов и измерение их поперечного импульса в интервале псевдобыстрот  $-0,9 \leq \eta \leq 0,9$ .

В установке ALICE используются следующие детекторы:

- ◆ Inner Tracking System (ITS) — внутренняя трековая система;
- ◆ Time-Projection Chamber (TPC) — время-проекционная камера;
- ◆ Transition Radiation Detector (TRD) — детектор переходного излучения;
- ◆ Time of Flight (TOF) — детектор, основанный на методе идентификации частиц по времени пролета “Time-Of-Flight”;
- ◆ Photon Spectrometer (PHOS) — фотонный спектрометр;
- ◆ Electromagnetic Calorimeter (EMCal) — Электромагнитный калориметр;

- ◆ High Momentum Particle Identification Detector (HMPID) — Детектор для идентификации частиц с большим импульсом;
  - ◆ Muon Chambers (MCH) — Мюонное плечо, состоящее из мюонного спектрометра;
  - ◆ Передние детекторы — T0, PMD, V0, ZDC и FMD [2].
- На рисунке (Рис. 1) представлена экспериментальная установка.

**Первая глава** посвящена описанию функций и задач стартового триггерного детектора T0 и его структуре.

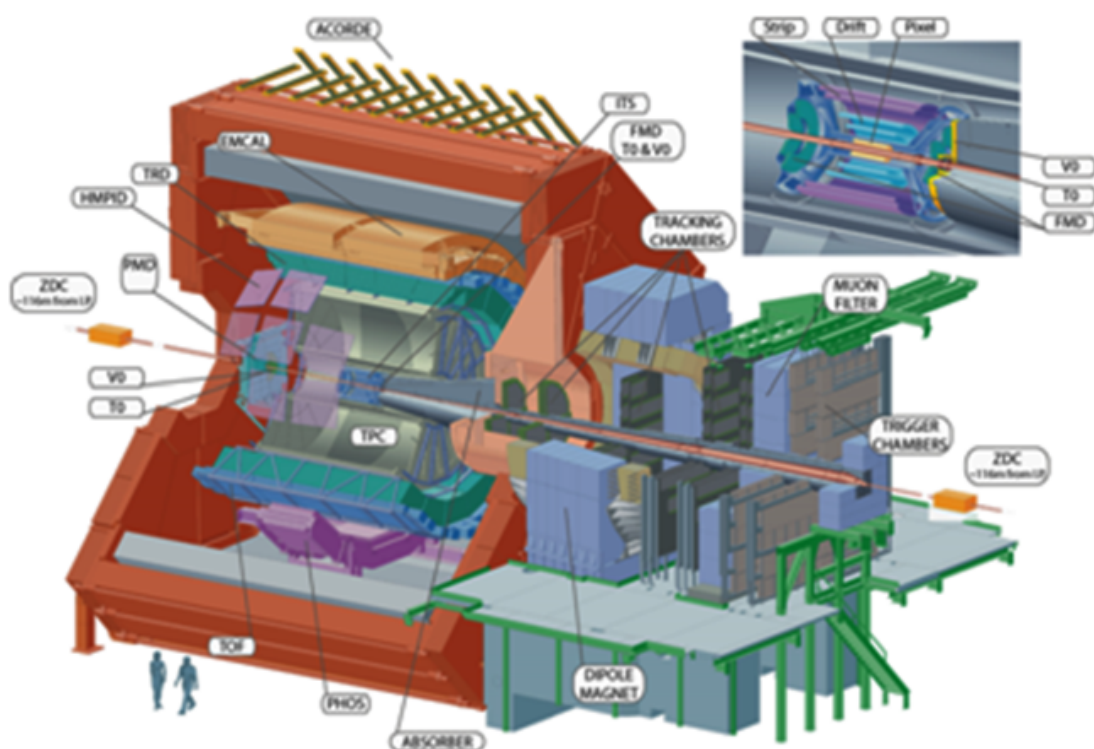


Рис. 1. Установка ALICE

Детектор T0 состоит из двух сборок черенковских счётчиков, которые расположены по обе стороны от номинальной точки столкновения частиц. Каждая сборка состоит из 12 счётчиков. Черенковские счётчики основаны на российских магнитостойких фотоумножителях ФЭУ-187 (диаметр 30 мм, длина 45 мм) с сетчатыми динодами, перед входным окном ФЭУ закреплен кварцевый радиатор (диаметром 20 мм и длиной 20 мм.). Сборка заключена в алюминиевый

корпус со специальной крышкой для подведения оптоволоконного кабеля от системы лазерной калибровки. Коэффициент усиления ФЭУ-187 составляет порядка 106, время нарастания сигнала составляет 1,5-2 нс. Время спада 3–4 нс [3].

Детектор T0 покрывает угол псевдобыстроты в диапазоне  $2,9 < |\eta| < 3,3$  со стороны С и  $4,5 < |\eta| < 5$  со стороны А.

Функции стартового триггерного детектора T0:

- ◆ Определить время взаимодействия встречных пучков для детектора TOF. Это время соответствует настоящему времени столкновения и не зависит от положения вершины события.
- ◆ Выработать триггерные сигналы множественности:
  - ◆ полуцентральный — T0sc,
  - ◆ центральный — T0c,
- ◆ Выработать триггерный сигнал положения вершины — T0vx. Вершина определяется с точностью  $\pm 0,6$  см для каждого столкновения и вырабатывается триггер L0, только тогда, когда точка столкновения отклоняется от номинального (среднего) значения в программно-заданных пределах.
- ◆ Исключить фоновые события вызванные взаимодействием сгустка пучка с молекулами остаточного газа внутри вакуумной трубы и сателлитов за счет ограничения по положению точки столкновения.
- ◆ Детектор T0 формирует сигнал запуска для детектора переходного излучения, Transition Radiation Detector (TRD).

На рисунке (Рис. 2) представлено разделение электронного оборудования на подсистемы.

Сборки черенковских счетчиков детектора T0 находятся под воздействием магнитного поля в 0,5 Тесла соленоида L3.

Сигналы с каждого из фотоумножителей поступают на предусилители. Предусилители находятся в коробке, которая называется «Shoebox», по одной коробке на каждую сборку черенковских счетчиков. Сигнальные кабели от фотоумножителей до предусилителей

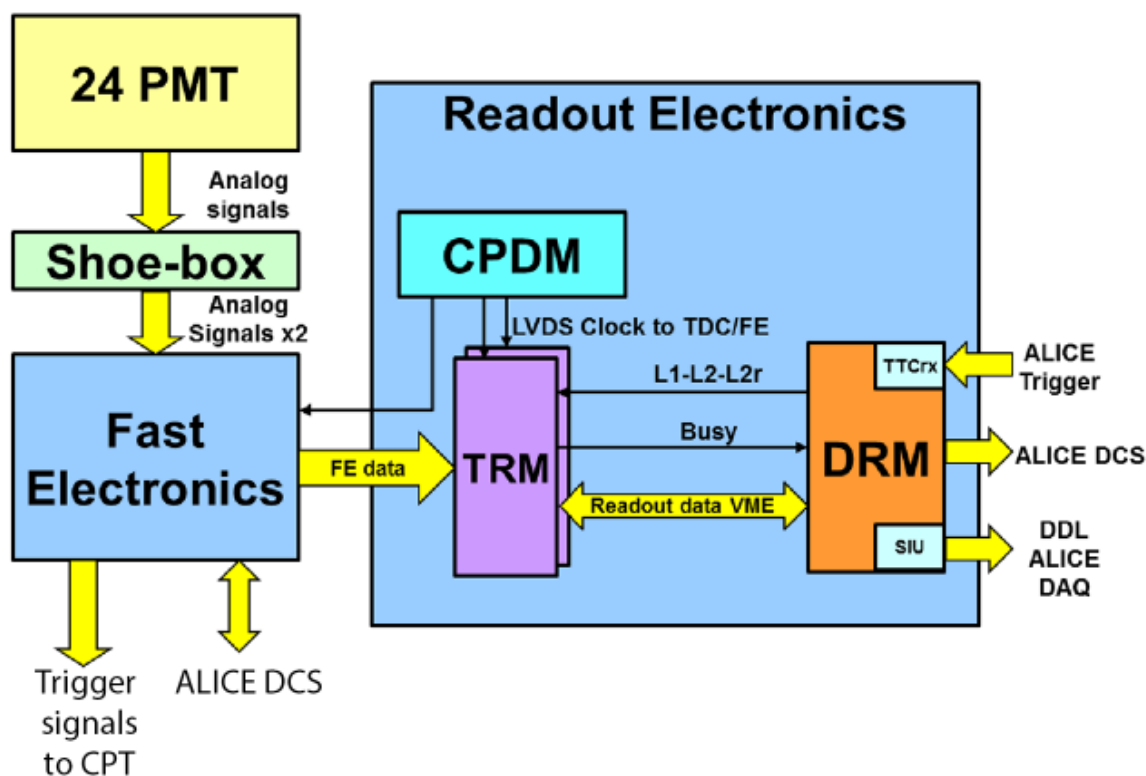


Рис. 2. Блок-схема электроники детектора T0

проложены на расстояние 1,5 м на стороне А и 6 м на стороне С. Основная функция предусилителя, разработанного группой из университета г. Юваскила, — разветвление сигнала фотоэлектронного умножителя и его усиление для передачи на расстояние до 50 м по высокочастотному кабелю. Динамический диапазон амплитуд сигналов, ожидаемых с ФЭУ, составляет от 50 мВ до 5 В.

Каждый предусилитель имеет три выхода. Один канал имеет коэффициент усиления 10, он используется для подачи сигнала в схему формирования запуска детектора переходного излучения TRD. Два других канала имеют разные показатели усиления. В конфигурации детектора T0 канал с коэффициентом усиления 10 является резервным. Канал с минимальным усилением, используется для подачи сигнала в схему быстрой электроники детектора T0 [4].

Быстрая электроника состоит из модулей, которые формируют временные и амплитудные сигналы для системы считывания данных, и модулей, которые формируют триггерные сигналы.



Функциональная схема соединения электроники приведена на рисунке (Рис. 3).

Модуль аналогового разветвителя сигналов (FANOUT) делит сигнал с предусилителя на 4 части с минимальной потерей формы и амплитуды сигнала.

Формирователь временной отметки со следящим порогом (ФСП) фирмы CANBERRA, модель CFD 454, модифицирован и дополнен системой удаленного управления по интерфейсу CANBus, что позволяет задавать пороги и смещение удаленно для каждого канала, используя систему диспетчерского управления. По техническим характеристикам формирователя стабильная работа обеспечивается в диапазоне амплитуд 0-5 вольт. Исследовался альтернативный вариант разработки формирователя временной отметки с цифровой коррекцией [5] [6]. Прототип модуля показал хорошие

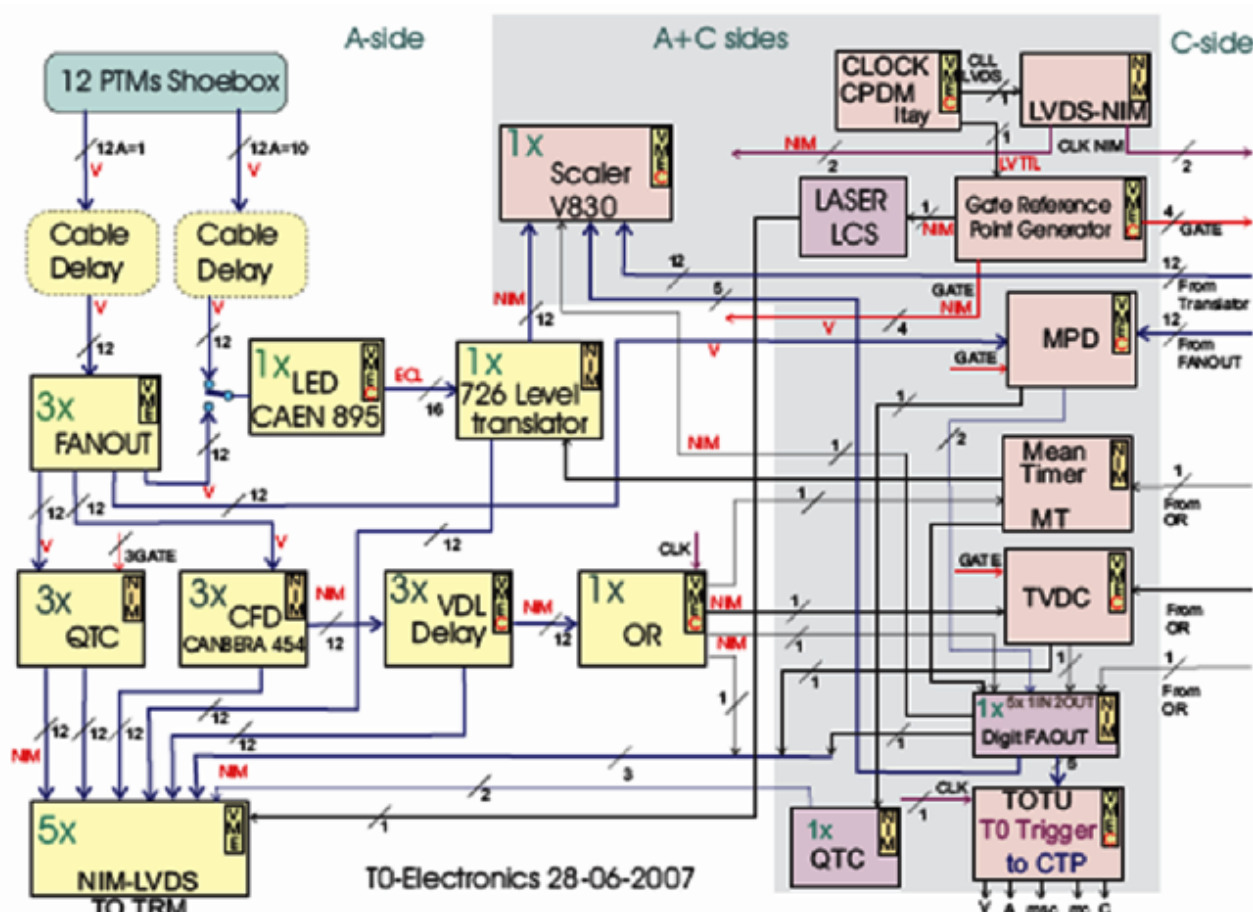


Рис. 3. Функциональная схема соединения быстрой электроники детектора

результаты, но производство окончательного варианта требовало значительных финансовых вложений, по сравнению с затратами на модификацию модулей CFD 454.

Для измерения амплитуды входного сигнала разработан четырехканальный модуль логарифмического преобразователя заряд-время QTC. Он формирует два выходных сигнала, разница которых пропорциональна заряду сигнала.

Шестнадцатиканальный формирователь временной отметки с постоянным порогом (ФПП) фирмы CAEN, модель LED v895, выполнен в стандарте VME и управляется удаленно через контроллер крейта.

Для выбора первого сигнала при срабатывании нескольких счетчиков используется управляемый модуль OR. Один модуль обрабатывает до 12 входных каналов.

Для компенсации неоднородности времени формирования сигналов фотоумножителями и выравнивания времени прихода сигналов с модуля OR используются цифровые управляемые линии задержки VDL. Каждый модуль задержки имеет 4 входных канала.

Формирование сигнала временных ворот для модулей QTC и сигнала запуска лазера от стробирующего синхроимпульса LHC проводится модулем GRPG [7].

Модули VDL, OR и GRPG изготовлены коллегами из МИФИ, совместно с инженерами ИЯИ РАН.

Для выработки триггерных сигналов, разработаны модули триггерной электроники.

Управляемый дискриминатор множественности MPD имеет программируемые регистры для задания пороговых значений срабатывания модуля. На выходе получаем триггерный сигнал центрального или полу центрального события для оценки множественности произошедшего события, в зависимости от амплитуды на входе блока.



Для того, чтобы исключить из расчета события, произошедшие вне ожидаемой точки взаимодействия используется управляемый триггерный модуль TVDC. Он вырабатывает триггерный сигнал, если вершина взаимодействия находится в заданном временном интервале, пределы которого задаются системой управления.

Модули MPD, TVDC и FANOUT изготовлены коллегами из Курчатовского института, интерфейс управления реализован в ИЯИ РАН.

Программируемый логический блок T0 Trigger Unit обеспечивает протокол взаимодействия между центральной триггерной системой и детектором T0. Получая сигналы с триггерных модулей детектора, модуль формирует определенные последовательности сигналов для центральной триггерной системы.

Быстрая электроника детектора T0 использует уровни логических сигналов стандарта NIM и ESL. В считывающей электронике используется логический уровень стандарта LVDS, поэтому для передачи сигналов, снимаемых с быстрой электроники, в модули считывающей электроники используется электронный модуль преобразования сигнала NIM-LVDS.

Модули T0TU, NIM-LVDC разработаны в конструкторском отделе радиоэлектроники ИЯИ РАН.

Модули быстрой электроники, требующие управления, выполнены в стандарте VME. Управление электроникой производится через контроллер шины VME - CAEN v2718.

В многоканальной системе считывания временной и амплитудной информации детектора T0 используются высокоточные время-цифровые преобразователи, поэтому все амплитуды преобразованы во временные интервалы для оцифровки. Разработкой модулей считывания данных занималась группа итальянских инженеров, участвующих в детекторе TOF.

Система считывания состоит из следующих модулей:

- ♦ Модуль DRM (Data Readout Module) является контроллером

крейта. Он управляет остальными блоками считывающей электроники;

- ◆ Модуль сбора данных TRM (TDC readout module) основан на чипах HPTDC, представляющих собой время-цифровые преобразователи высокого разрешения;
- ◆ Модуль разветвления высокоточных синхросигналов LHC – CPDM (Clock and Pulse Distributor Module).

Модуль DRM считывает оцифрованные данные с модулей TRM, которые затем пересылаются по оптической линии Detector Data Link (DDL) в центральную систему сбора данных Data Acquisition system (DAQ). Модуль DRM получает триггерные сигналы и синхросигнал от центрального триггерного процессора Central Trigger Processor (CTP).

Модуль CPDM используется для распределения тактовой частоты высокоточных синхросигналов ускорителя к модулям считывающей электроники для синхронизации работы.

Инициализация и установка параметров в системе считывания данных осуществляется системой управления и контроля детектора T0. Модуль DRM подключен к серверу системы DCS по оптической линии связи.

**Вторая глава** посвящена системе диспетчерского контроля и управления детектора.

Управление детекторами установки ALICE можно представить системой, состоящей из центральной системы управления экспериментом ECS и взаимодействующими с ней подсистемами сбора данных DAQ, системы управления и контроля детектором DCS, из триггерной системы CTP и системы триггера высокого уровня HLT. [8] Система представлена на рисунке (Рис. 4):

Задачи автоматизированной системы диспетчерского контроля и управления детектора [9]:

- ◆ обеспечить безопасность установки,

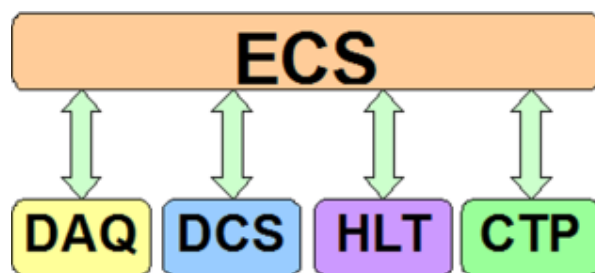


Рис. 4 Схема систем эксперимента

- ◆ обеспечить управление узлами детектора,
- ◆ предоставить удобный человеко-машинный интерфейс,
- ◆ обеспечить автоматическую настройку для выравнивания временных сигналов,
- ◆ обеспечить автоматическую калибровку для обеспечения стабильности временных характеристик детектора.

К системе управления предъявляются требования четко следовать командам оператора, получать, обрабатывать и хранить данные о состоянии оборудования, наблюдать и оповещать оператора при появлении сбоев, отказов и отклонений от нормальной работы оборудования детектора. В случае серьезной угрозы оборудованию детектора, отключить соответствующие элементы.

Центральная система управления DCS осуществляет управление всеми детекторами, включенными в нее. Детектор может быть исключен из центральной системы и управляться отдельно, что позволяет проводить наладку оборудования независимо от остальных детекторов [10].

Эксперты центральной системы управления представляют документы с рекомендациями и требованиями подготовки системы управления детектором для интеграции в центральную систему управления [11] [12]. На эти рекомендации опираются эксперты при подготовке проекта системы.

При проектировании системы управления была разработана **методика построения распределенной системы управления**. При рассмотрении системы управления детектора Т0 как комплексной уста-

новки были выделены основные, объединенные общим смыслом и назначением объекты. На основе дробления системы на отдельные управляемые объекты была разработана методика описания последовательностей команд и конечного числа состояний каждого индивидуального объекта. Таким образом, распределенное управление позволяет оперировать независимо от состояния всей системы индивидуальными узлами. Единый метод применялся при описании каждой индивидуальной подсистемы, в конечном счете, обеспечив согласованное взаимодействие всех компонентов системы.

Система управления детектора T0 состоит из объектов управления, интерфейса оцифровки и обмена данными, линий связи с оборудованием, системы управления и контроля и человеко-машинного интерфейса. На рисунке (Рис. 5) представлена схема распределения и взаимодействия управляемых подсистем детектора T0.

Из рисунка видно, что человеко-машинный интерфейс находится в комнате управления. Он представляет собой терминал с панелями управления, на которые выводится информация о состоянии детектора. Система управления и контроля представляет собой программное обеспечение, которое находится на компьютерах в операционном зале [13]. К компьютерам с системой управления подключены линии связи с оборудованием:

- ◆ Ethernet — для устройств подключенных через сетевой интерфейс;
- ◆ CanBUS – подключен к USB адаптеру;
- ◆ Optical fibre – оптоволоконное соединение подключается к адаптеру PCIe CAEN A3818.

Интерфейсы передачи данных и оцифровки находятся в экспериментальной зоне установки ALICE:

- ◆ Оптический аттенюатор и адаптер последовательного порта RS-232 для Ethernet;
- ◆ Интерфейс обмена данными с CFD - ELMB;
- ◆ Wiener VME крейты;

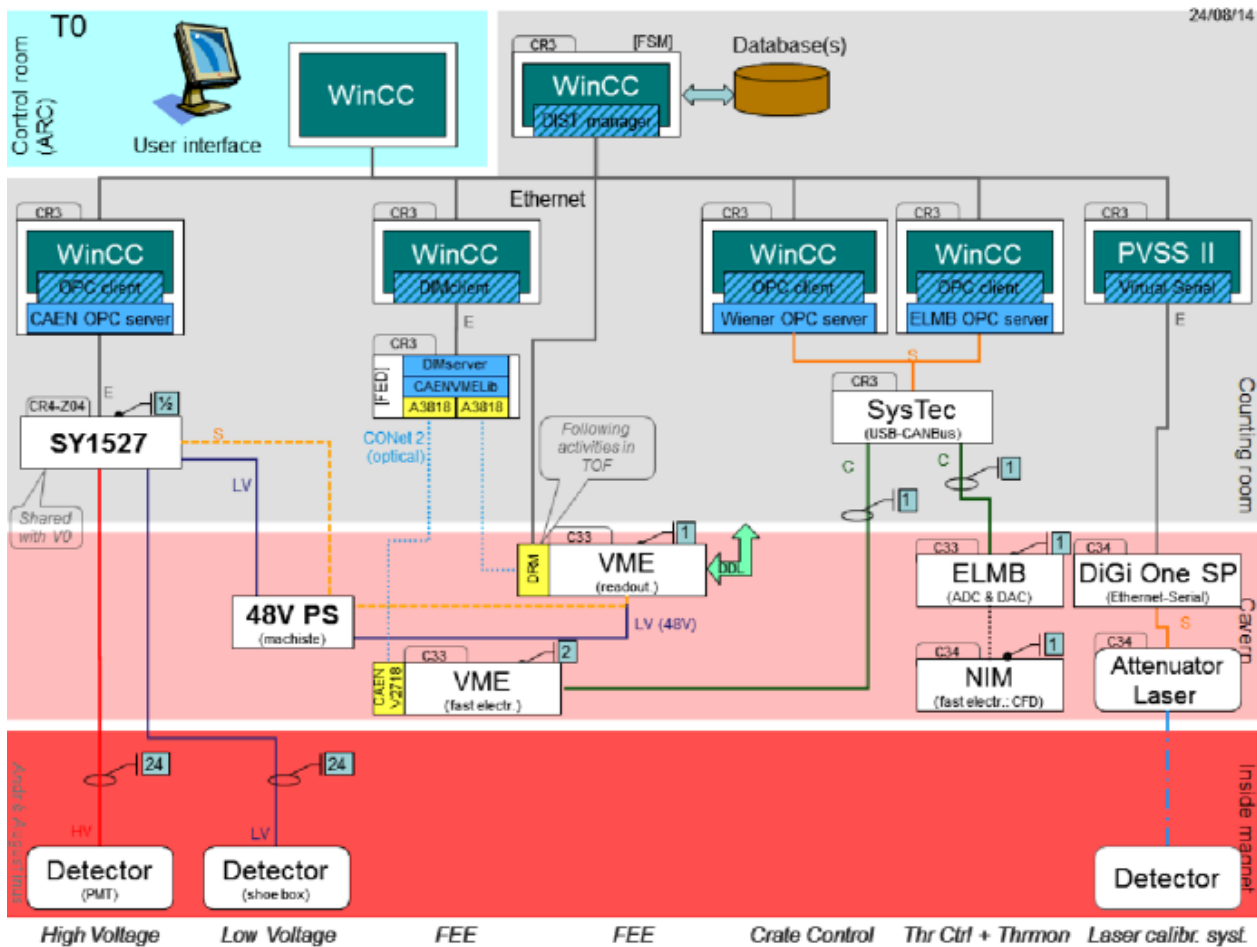


Рис. 5. Схема распределения управляемых подсистем

- ◆ Крейт с модулями питания CAEN SY1527 и интерфейс управляемого крейта VME для считывающей электроники;
- ◆ Система сбора данных DRM;
- ◆ Контроллеры крейта VME CAEN v2718.

Объекты управления располагаются в экспериментальной зоне и обрабатывают электрические сигналы:

- ◆ Модули быстрой электроники;
- ◆ Каналы считывающей электроники TRM;
- ◆ Лазер для калибровки детекторов;
- ◆ Фотоэлектронные умножители;
- ◆ Предусилители;
- ◆ Каналы электропитания VME крейта и термодатчики;
- ◆ Каналы электропитания VME крейта считывающей электроники.

У детектора имеется 15 контролируемых подсистем.

Крейт управляемых каналов питания. Он позволяет задавать необходимые напряжения и ограничение предельных токов удаленно, как пользователем, так и в автоматическом режиме. Возможно также и считывание данных о текущих напряжениях и токах, которые затем заносятся в архив.

Для электроники детектора имеются несколько асинхронных магистральных крейтов, которые можно включать удаленно, а также контролировать температуру и подаваемые на шину напряжения. Так как эти крейты являются стандартными для многих систем, для них имеется готовая система контроля.

Система управления быстрой электроникой базируется на клиент-серверном приложении, в связи с тем, что прямого интерфейса работы с контроллером крейта в программном пакете системы управления нет. Приложение было разработано автором, оно позволяет посылать данные в электронный блок и читать ответ, где это возможно.

Отдельно организовано управление блоком формирователя временной отметки со следящим порогом (ФСП) на базе платформы ELMV. Так как первоначально ФСП не имел дистанционного управления, но подходил по характеристикам, для него было разработано схемотехническое решение для управления порогом, и затем он был интегрирован в общую систему управления. Для связи с системой управления используется интерфейс связи CanBUS. Данную систему разработали коллеги из Польши, и автор участвовал в интеграции данного блока в систему управления.

В схеме детектора предусмотрена система лазерной калибровки, состоящая из лазера (PIL040G 408 nm), управляемого оптического аттенюатора и оптического разветвителя. На тестовом пучке система лазерной калибровки была испытана, и был подобран коэффициент ослабления лазерного сигнала. Количество света, прошедшее через систему оптического аттенюатора и оптических разветвите-



лей, соответствует свету, полученному в кварцевом радиаторе при прохождении одной релятивистской частицы (MIP). Значение ослабления лазерного сигнала можно менять удаленно, пропорционально значению одного MIP и таким образом проводить калибровку.

Алгоритм управления детектором реализован на системе конечных состояний (FSM). Для детектора T0 определен набор состояний, которые может принимать детектор в зависимости от состояния подсистем детектора. Перевести детектор из одного состояния в другое можно с помощью команд управления FSM, при этом будут исполнены определенные для этого действия инструкции, которые проведут необходимые действия с подсистемами детектора. Существует определенный набор состояний для каждого детектора, который позволяет организовать централизованное управление всеми детекторами [14]. На рисунке (Рис. 6) представлена схема состояний детектора и возможные переходы и команды переходов.

Распределенная система управления позволяет распределить нагрузку, создаваемую системой управления на несколько компью-

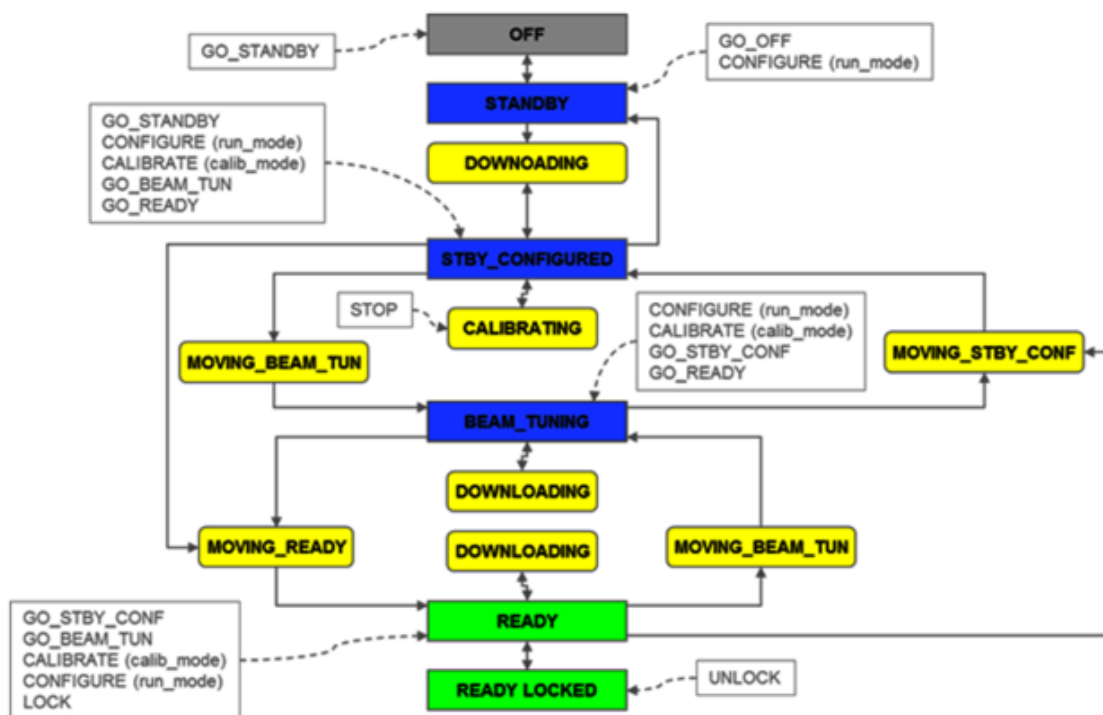


Рис. 6. Схема состояний FSM

теров. Это также дает преимущества при замене какой-либо части, минимально затрагивая работающую систему управления.

Генерация триггерных сигналов детектора T0 происходит по правилам, определенным центральной триггерной группой (СТР). Для коммуникации между детектором и СТР был настроен сервер обмена данными, который позволяет с центрального триггерного терминала менять состояние триггерной электроники детектора.

Наблюдение за температурой критических узлов одна из важных задач автоматизированной системы. При аварийном отключении водяного охлаждения температура в крейтах может подняться до опасного значения за 15 минут, для того, чтобы исключить влияние человеческого фактора в подобной ситуации, выключение аппаратуры происходит автоматически.

Когда пучки выводятся в ускоритель, существует риск потери пучка или касание пучком трубы. Поэтому во время работы ускорителя важно, чтобы детекторам не был причинён урон от высокой нагрузки. Для этой цели была введена матрица безопасных состояний детекторов [15]. Система контроля и управления детектором публикует реальное состояние чувствительных подсистем, вычисленное независимо от состояния FSM. Это делается для того, чтобы исключить возможность потери контроля над безопасностью детектора, если потеряна связь с сервером FSM. Матрица безопасных состояний является частью системы обмена информацией между оператором эксперимента ALICE и оператором CCC (CERN Control Center). До тех пор, пока детекторы не будут в защищенном состоянии, будет запрещена инжекция пучков.

Для оповещения оператора о возможных отклонениях в работе детектора используется система тревожных сообщений. При отклонениях от заданного параметра, система немедленно выдаст сообщение об этом на специальный экран, снабдив пояснением и возможными действиями по устранению неполадки.



При работе с детектором очень важно иметь средства, которые позволяют разобраться в причинах неполадок с детектором.

Одним из важных средств работы с детектором является визуализация данных от прошедших событий. Архивация и последующая визуализация значений помогает разобраться в отклонениях в работе детектора.

При проведении исследований на пучке система управления и контроля позволяет наблюдать за состоянием счета, по электронным счетчикам. Благодаря этому, можно давать оценку светимости пучка в реальном времени, если внести известную поправку на эффективность детектора.

Полученная светимость используется для мониторинга качества пучка как для эксперимента ALICE так и для независимого подтверждения ожидаемой светимости, которую дает ускоритель. Все значения записывается в базу данных и в последующем могут использоваться при обработке данных [16].

Оценочная светимость также может применяться как для предотвращения длительного влияния высокоэнергичных пучков на детекторы, если они были включены, так и для предотвращения включения чувствительных к фону детекторов, на этапе подготовки эксперимента.

Автоматизированная система предполагает, что к управлению привлечен оператор. Для оператора система управления детектором T0 оборудована человеко-машинным интерфейсом, панелями управления и настройками.

Оператор должен быть подготовлен и действовать согласно инструкции. Чтобы подготовить оператора к работе с детектором была разработана модель системы управления, основанная на реальной системе управления. Модель основана на симуляции основных рабочих моментов, таких как включение питания, конфигурирование электроники и отработки навыков при работе с конечным автоматом системы.

В связи с тем, что работа ведется в составе международной группы, куда входят люди из разных международных институтов, были подготовлены инструкции на английском языке.

**Третья глава.** Калибровка и функционирование T0 детектора в экспериментах на установке ALICE.

Для настройки и тестирования детектора T0 в его состав включена лазерная система, позволяющая осуществлять настройку временных параметров. Импульсный полупроводниковый лазер запускается сигналами с центрального триггерного процессора, Central Trigger Processor (СТР) ALICE. Для детектора T0 был предложен специальный режим срабатывания лазера во время физического набора данных. Срабатывание лазера происходит в технический промежуток, где отсутствуют сгустки частиц (такой интервал, длительностью  $\approx 3$  мкс., появляется в структуре каждые 89 мкс.).

Лазерная система детектора T0:

1. Предназначена для отладки и настройки системы детектора T0 перед физическим сеансом;
2. Используется для амплитудной коррекции и получения временных сигналов;
3. Для определения плоскости реакции и множественности необходима калибровка в минимальных ионизационных частицах (MIP);
4. Используется для контроля стабильности детектора во время набора физических данных.

Детектор T0 оснащен системой лазерной калибровки, которая предназначена для настройки и калибровки двадцати четырех временных каналов детекторов «T0». Основой лазерной системы калибровки является импульсный лазер типа P1L040G фирмы Advanced Photonics Systems с длительностью светового импульса менее 40 пс., и длиной волны 408 нм., что соответствует спектральному диапазону чувствительности используемого в качестве детектора ФЭУ.

Импульсный лазер подключается к оптоволоконной системе, состоящей из оптического аттенюатора и системы оптических делителей, с помощью которых световые импульсы подаются на все 24 детектора одновременно.

Система лазерной калибровки используется для проверки стабильности амплитуд и является частью системы по наблюдению и контролю над временным разрешением детектора. Калибровку можно проводить в автоматическом режиме и по команде оператора.

Калибровка детектора T0 состоит из 2х частей:

- 1) выравнивание задержек во временных каналах (offline);
- 2) измерение время-амплитудной зависимости для каждого канала.

Все калибровочные данные записываются в специальную, общую для всех детекторов, базу данных (OCDB), которая хранится в AliEn и используется при реконструкции событий.

Калибровку необходимо проводить для различных параметров конфигурации детектора.

Сначала проводится калибровка при выключенном магнитом поле, проверяется стабильность амплитуд и настройка временных параметров.

При включении магнитного поля, амплитуды сигналов, полученные с фотоумножителей, падают, так что требуется дополнительное напряжение, чтобы выровнять амплитуды. Соответственно делается калибровка для данной конфигурации детектора.

Набор полученных калибровочных данных записывается в электронный журнал и затем поступает в обработку. После обработки получаем набор цифровых коррекций, которые используются в системе DQM.

**Для контроля настройки детектора был предложен метод использования калибровочного триггера во время набора данных.** Для запуска лазерной системы центральный триггерный процессор (СТР) формирует специальный калибровочный триггер. Стратегия

такого триггера состоит в том, что во время работы LHC существует период, когда нет столкновения протонов или ионов. Этот период называется “Long gap”, его длительность 119 ВС или 2,975 мкс. В это время центральный триггерный процессор подает на детектор T0 по оптической линии TTS пре-импульс (pre-pulser) за 2 микросекунды до передачи стандартной последовательности триггерных сигналов (L0, L1, L2a). По сигналу pre-pulser запускается лазерная система, и по триггеру L2a данные передаются в систему считывания данных (DAQ). Использование новых возможностей триггерной системы позволяет осуществлять контроль над качеством набираемых данных.

**В четвертой главе** представлены физические результаты о столкновении протонов и ядер, полученные на установке ALICE.

Расположенный при больших значениях быстрот детектор T0 дает информацию о множественности (Рис. 7) и о распределении по псевдобыстроте заряженных частиц дополнительно к данным V0 и FMD детекторов.

Детектор T0 используется также при определении светимости встречных пучков, для чего определяется его сечение сканированием пучков по методу Ван дер Меера [17].

Детектор T0 определяет точное время взаимодействия, которое используется TOF детектором как ноль, относительно которого считаются время пролета частиц. Время старта для запуска время-пролетной системы детектором T0 обеспечивается с разрешением 40 пикосекунд для столкновения протонов и 25 пикосекунд для столкновения ядер свинца, что позволяет идентифицировать пионы, каоны и протоны до значения импульса несколько ГэВ/с.

Положение сигнала точной временной отметки «T0» на временной оси не должно меняться в зависимости от положения точки столкновения вдоль оси установки ALICE в диапазоне  $\pm 0,6$  см.

Ширина распределения показывает, насколько время взаимодействия может отклоняться от сигнала LHC. Ширина обусловлена

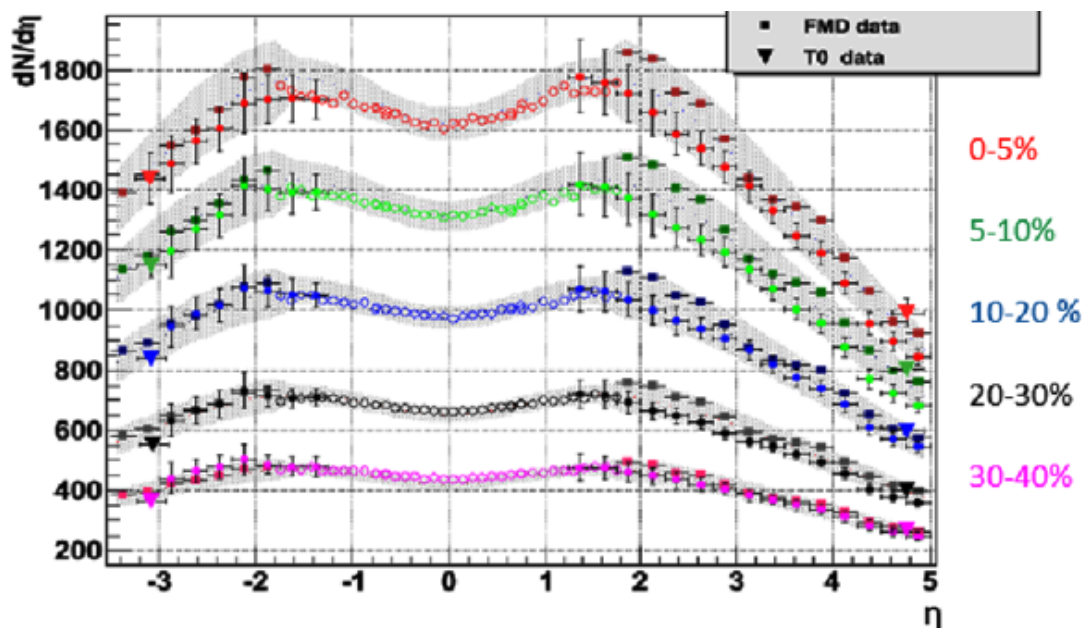


Рис. 7. Распределение первичных заряженных частиц по псевдобыстроте при столкновении ядер свинца с энергией 2,76 ТэВ на нуклон

конечным размером сгустков пучков. Временное разрешение детектора T0, полученное как разность сигналов от T0A и T0C, составляет 20-25 пикосекунд для столкновения ядер (Рис. 8 справа) и около 40 пикосекунд для столкновения протонов. [18]

Эффективность T0 детектора равна 100% для наиболее центральных столкновений ядер и около 50% для событий с центральностью около 90%. Для столкновения протонов при энергии  $\sqrt{s} = 7$  ТэВ — эффективность 50% для совпадений (T0A и T0C) и 70% для одного из детекторов T0 (T0A или T0C).

На рисунке (Рис. 9) приведено распределение скоростей частиц, полученных в TOF-T0 системе в зависимости от импульса частиц, рожденных при столкновении ядер свинца. Аналогичный результат для столкновения протонов с ядрами свинца приведен на рисунке (Рис. 10). Из рисунков видно, что уровень фоновых событий выше для столкновения ядер свинца, но разделение электронов, пионов, каонов, протонов и дейтронов одинаково.

Идентификация заряженных частиц при использовании системы TOF-T0 позволила получать экспериментальные данные по множественности и поперечному импульсу отдельно для пионов,



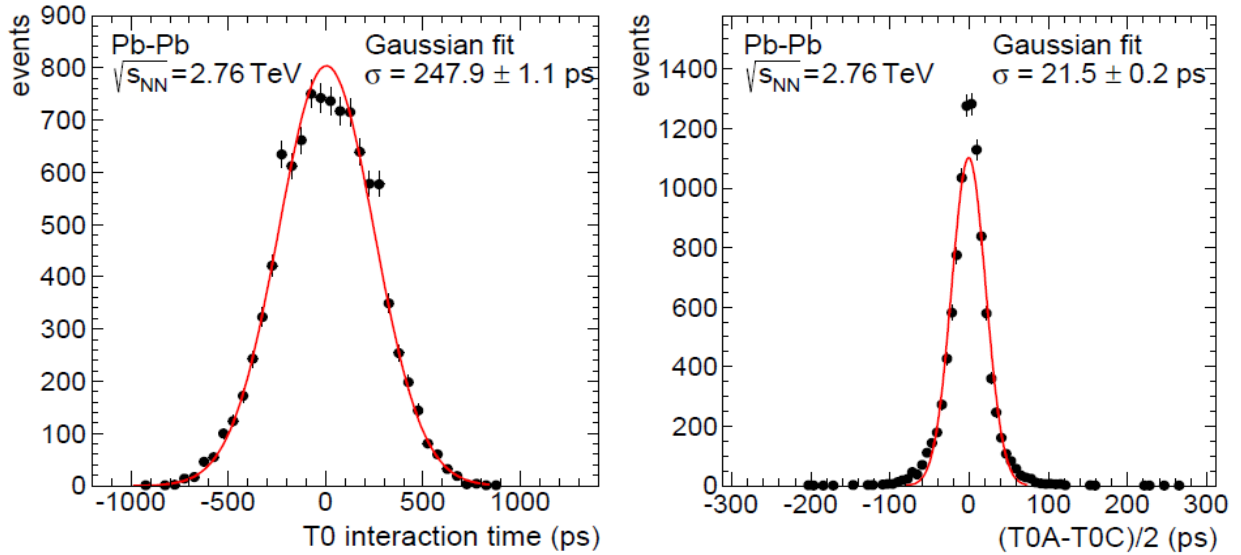


Рис. 8. Распределение времени взаимодействия по отношению к сигналу синхронизации, измеренное как сумма времен T0A и T0C (слева), и разрешение системы T0 детекторов, определяемое как разность времен T0A и T0C (справа). В разность времен внесена коррекция по положению вершины взаимодействия по данным трекера ITS

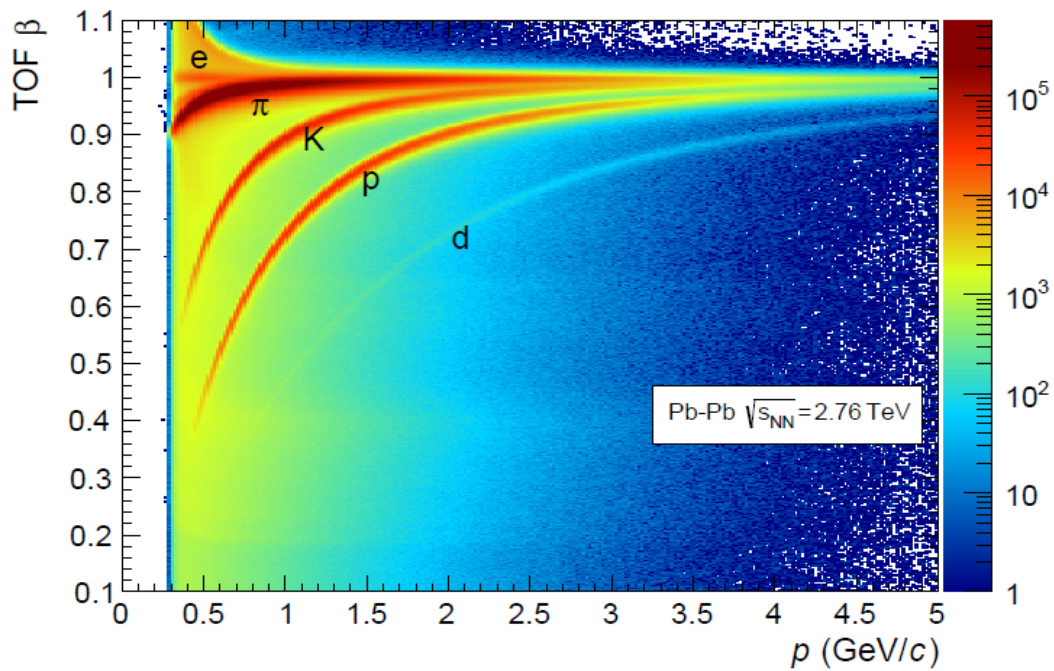


Рис. 9. Распределение скоростей  $\beta$ , измеренное детектором TOF в зависимости от импульса заряженных частиц, рожденных при столкновении ядер свинца каонов, протонов и лямбда частиц в столкновениях ядер свинца и в столкновениях протонов с ядрами свинца. Исследование протон-ядерных столкновений является промежуточным между

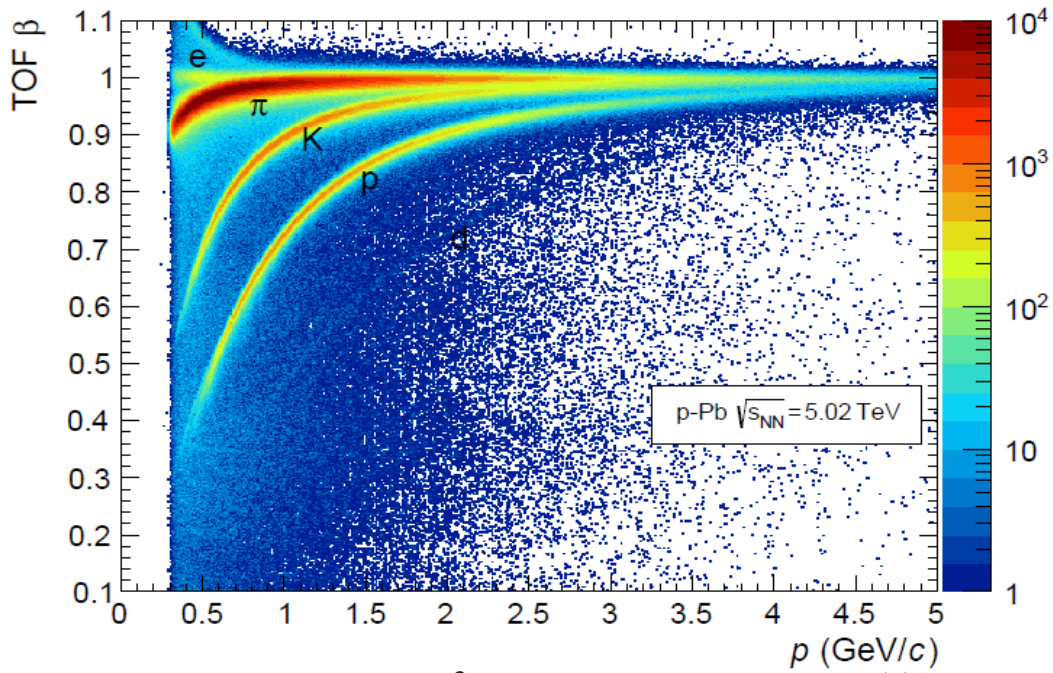


Рис. 10 Распределение скоростей  $\beta$ , измеренное детектором TOF в зависимости от импульса заряженных частиц, рожденных при столкновении протонов с ядрами свинца

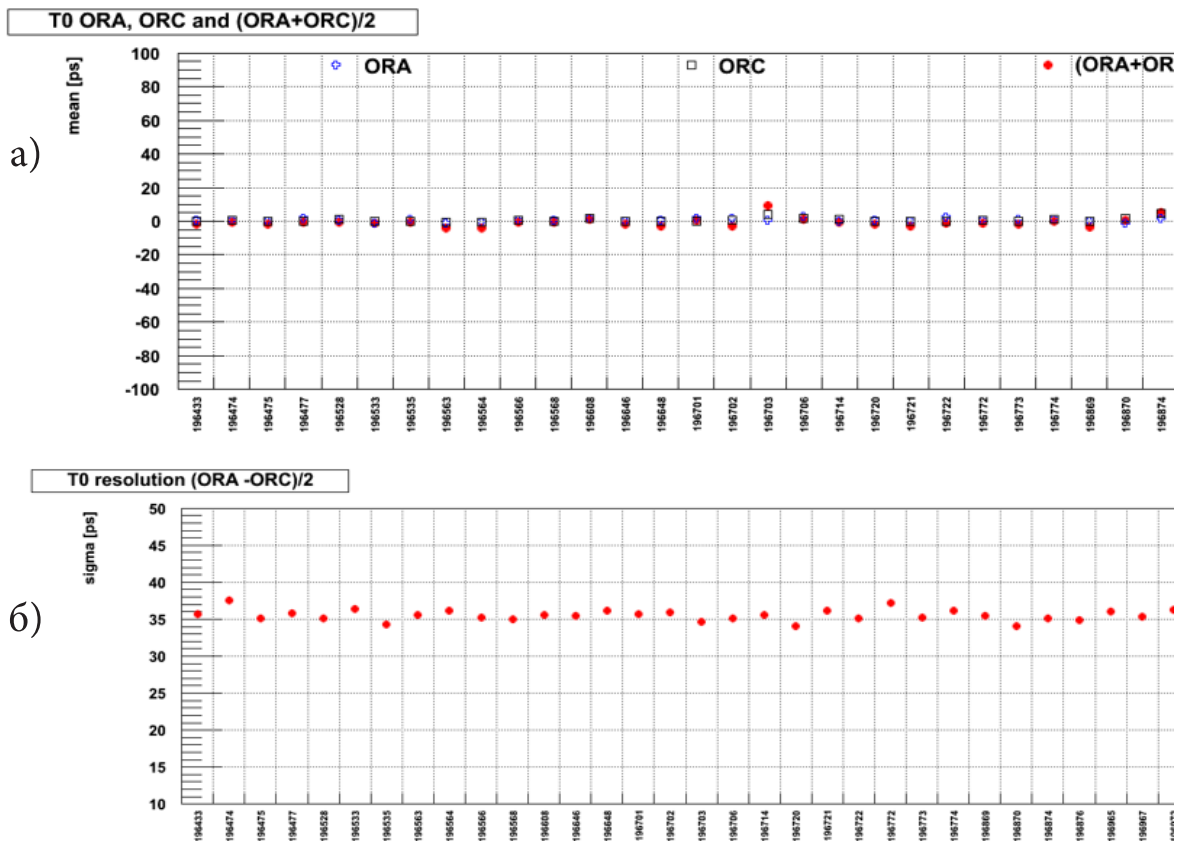


Рис. 11 (а) Зависимость стабильности временной отметки от номера измерения; (б) Зависимость временного разрешения от номера измерения

протон-протонными ядро-ядерными столкновениями по размеру и плотности образующейся ядерной системы.

Как было показано в предыдущих главах, **автоматизированная калибровка и контроль параметров детектора T0 средствами DCS позволяет получить стабильно высокое (для взаимодействий Pb-Pb ~25 пс. и p-Pb ~30 пс.) временное разрешение** стартового детектора времяпролетной системы.

Как показано на рисунке (Рис. 11) временное разрешение детектора T0 поддерживается на стабильном уровне. Однако без системы контроля стабильность временных характеристик нарушается. Таким образом стабильность временного разрешения детектора T0 влияет на стабильность временных показателей времяпролетной системы и соответственно на разделение спектров при идентификации частиц.

**В Заключение** подведены итоги диссертационной работы.

Основной результат диссертации заключается в создании системы управления и контроля детектором T0, что обеспечило его стабильную работу в течение всего периода первых измерений на установке ALICE в 2009-2013 гг. T0 детектор является основным из передних детекторов установки ALICE, расположенных под малыми углами к пучкам коллайдера LHC. Он является главным триггером для запуска остальных детекторов, а также дает «пробуждающий» сигнал на детектор переходного излучения. Обладая высоким временным разрешением до 25 пикосекунд, T0 детектор служит для формирования начальной временной отметки для системы времяпролетных детекторов. Большое значение для количественных измерений сечений взаимодействия имеет использование T0 детектора для определения светимости пучков коллайдера. В ограниченном интервале быстрот он служит для определения множественности рожденных при столкновении заряженных частиц.

Разработанная система управления и контроля позволяет наи-



более эффективно использовать перечисленные возможности детектора T0, а также проведение калибровочных измерений с использованием лазера.

За время работы T0 детектора на установке ALICE были получены новые физические результаты, некоторые из которых рассмотрены в диссертации. Это определение множественности взаимодействия, распределение заряженных частиц по быстрой и поперечному импульсу при различных центральных столкновениях ядер, определение угла плоскости реакции, идентификация заряженных частиц и распределение пионов, каонов, протонов и антипротонов по поперечному импульсу.

В результате эффективной работы T0 детектора было принято решение при модернизации установки ALICE заменить все предыдущие детекторы на новый T0 детектор, получивший название FIT (Fast Interaction Trigger). Выполненные разработки системы управления и контроля будут также использованы в намеченном на 2015 год сеансе измерений дифракционных взаимодействий с детекторами AD-A и AD-C, при больших значениях быстрой на больших расстояниях от точки взаимодействия.

### **Список публикаций по теме диссертации**

- [1] ALICE Collaboration (K. Aamodt et al.). The ALICE experiment at the CERN LHC // JINST. 2008. V. 3, № S08002. P. 259.
- [2] ALICE Collaboration (K. Aamodt et al.), ALICE Technical Design Report: Forward Detectors (FMD, T0 and V0), CERN-LHCC-2004-025, 2004.
- [3] В. Григорьев, В. Каплин, Т. Каравичева, А.Н. Курепин и А.Б. Курепин. Методы измерения амплитуд сигналов черенковских счетчиков // Приборы и техника эксперимента. 2009. Т. 3. P. 45-49.
- [4] А. В. Веселовский, В. А. Григорьев, В. А. Каплин, А. Б. Курепин,

- А.Н. Курепин и Т. Л. Каравичева. Система быстрой электроники стартового триггерного детектора T0 эксперимента ALICE // Приборы и техника эксперимента. 2009. Т. 2.
- [5] В.А. Григорьев, В.А. Каплин, В.А. Логинов, и др. Исследование характеристик формирователя временной отметки CFD-DC для детектора T0 эксперимента ALICE // Науч. сессия МИФИ-2005, III Конференция НОЦ CRDF: Сб. науч. тр. М., 2005.
- [6] А. Курепин и В. Григорьев. Программирование формирователя временной отметки CFD-DC для детектора T0 эксперимента ALICE, CERN // Науч. сессия МИФИ-2005. М., 2005.
- [7] А.В.Веселовский, А.В.Григорьев, В.А.Григорьев, А.Б.Курепин, А.Н.Курепин и Т.Л.Каравичева. Модуль формирования управляющих сигналов детектора T0 эксперимента ALICE //Приборы и техника эксперимента. 2010. Т. 5. Р. 73-77.
- [8] A. Augustinus, G. D. Cataldo, P. Chochula, L. S. Jirdén, A. N. Kurepin, M. Lechman, O. Pinazza, P. Rosinský et A. Moreno. Computing architecture of the ALICE detector control system // Proceedings of ICALEPCS2011, Grenoble, France, 2011.
- [9] А.В.Веселовский, А.Б.Курепин, А.Н.Курепин и Т.Л.Каравичева, Автоматизированная система управления стартовым триггерным детектором T0 эксперимента ALICE (LHC, CERN). Препринт ИЯИ РАН, М.: ИЯИ РАН, 2011.
- [10] A. Augustinus, M. Boccioli, P. Chochula, P.M. Bond, L.S. Jirdén, A.N. Kurepin, M. Lechman, O. Pinazza et P. Rosinský. The Design and Operation of the Detector Control System of the ALICE experiment at CERN // Real Time Conference (RT), 2012 18th IEEE-NPSS, 2012.
- [11] A. Augustinus, P. M. Bond, P. Chochula, A. N. Kurepin, M. Lechman, O. Pinazza et P. Rosinský. Managing operational documentation in the ALICE Detector Control System // Journal of Physics: Conference Series. 2012. Т. 396, № 5.

- [12] A. Augustinus, P. M. Bond, P. Chochula, A. N. Kurepin, M. Lechman, O. Pinazza et P. Rosinský. Managing infrastructure in the ALICE detector control system // Proceedings of ICALEPCS2013, San Francisco, CA, USA, 2013.
- [13] A. Augustinus, P. M. Bond, P. Chochula, A. N. Kurepin, M. Lechman, O. Pinazza et P. Rosinský. Operational experiences with the ALICE detector control system // Proceedings of ICALEPCS2013, San Francisco, CA, USA, 2013.
- [14] A. Augustinus, P. M. Bond, P. Chochula, A. N. Kurepin, M. Lechman, O. Pinazza et P. Rosinský How beam driven operations optimize ALICE efficiency and safety // Journal of Physics: Conference Series. T. 396, № 1.
- [15] A. Augustinus, M. Boccioli, P. Bond, G. Cataldo, P. Chochula, L.S. Jirden, A. N. Kurepin, M. Lechman, A. D. Mauro, A. Moreno, O. Pinazza, P. Rosinský et H. Schindler. Protecting detectors in ALICE // Proceedings of ICALEPCS2011, Grenoble, France, 2011.
- [16] T. Malkiewicz, F. Nendaz, A. S. Anoshko, A. Bogdanov, B. Cheynis, L. Ducroux, V. A. Grigoriev, J. -Y. Grossiord, F. F. Guber, V. A. Kaplin, T. L. Karavicheva, O. V. Karavichev, E. V. Karpechev, A. B. Kurepin, A. N. Kurepin, A. I. Maevskaya, T. Nayak, M. Oledzki, A. I. Reshetin, R. Tieulent et W. H. Trzaska. Luminosity determination in ALICE with T0 and V0 detectors // Indian journal of physics. 2011. T. 85, № 6.
- [17] ALICE Collaboration (K. Aamodt et al.). Measurement of visible cross sections in proton-lead collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV in van der Meer scans with the ALICE detector // JINST. 2014. V.9. P11003.
- [18] ALICE Collaboration (B. Abelev et al.). Performance of the ALICE Experiment at the CERN LHC // Int.J.Mod.Phys. 2014. Vol. A29:1430044.

Ф-т 60x84/16 Уч.-изд.л. 1,6 Зак. № 222337 Тираж 100 экз. Бесплатно

Печать цифровая

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт ядерных исследований

Российской академии наук

Издательский отдел

117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а

