

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени М. В.
ЛОМОНОСОВА»

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА ОБЩЕЙ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

МАГИСТЕРСКАЯ РАБОТА

«Прототип пробежной (мюонной) системы детектора SPD/NICA»

Выполнил студент

213м группы

Грибков Данил Юрьевич

Научный руководитель:

к. ф.-м. н., с.н.с

Чепурнов Александр Сергеевич

Допущен к защите _____

Зав. кафедрой _____

Москва 2022

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	3
1. 4-П ДЕТЕКТОРЫ В ФИЗИКЕ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ	5
1.1. Роль пробежной системы в 4-п детекторах	8
2. ДЕТЕКТОР СПИНОВОЙ ФИЗИКИ (SPD)	11
2.1. Ускорительный комплекс NICA	11
2.2. Детектор SPD	16
2.3. Этапы реализации детектора SPD	20
3. ПРОБЕЖНАЯ (МЮОННАЯ) СИСТЕМА ДЕТЕКТОРА SPD	23
3.1. Задачи и структура пробежной (мюонной) системы	23
3.2. Система детектирования частиц	26
3.3. Электроника первичной обработки сигналов (fron-end электроника)	31
4. ПРОТОТИП ПРОБЕЖНОЙ (МЮОННОЙ) СИСТЕМЫ ДЕТЕКТОРА SPD	34
4.1. Электроника первичной обработки сигналов прототипа	37
4.2. Система контроля прототипа	39
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	48
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	49

Введение

NICA (Nuclotron-based Ion facility) – это новый ускорительный комплекс, который создается на базе Объединённого института ядерных исследований (Дубна, Россия) с целью изучения свойств плотной барионной материи. После того как коллайдер NICA будет запущен, учёные ОИЯИ смогут воссоздать в лабораторных условиях особое состояние вещества, в котором пребывала наша Вселенная первые мгновения после Большого Взрыва, — кварк-глюонную плазму (КГП). [1] В данный момент идет строительство и разработка физических и инженерных решений для различных частей ускорительного комплекса. Основным объектом этого ускорительного комплекса является кольцевой ускоритель частиц, на котором будут расположены два детектора: MPD (Multi-Purpose Detector) и SPD (Spin Physics Detector).

Любой детектор в физике высоких энергий — большой и сверхсложный объект. В связи с этим процесс создания таких детекторов занимает длительное время, а подсистемы детектора вначале создаются в виде прототипов, представляющих собой уменьшенную во много раз по количеству каналов измерения подсистему детектора вместе со всеми необходимыми системами и инфраструктурой.

В данный момент детектор SPD-NICA еще не создан, но существует прототип его мюонной системы, который представляет собой уменьшенную копию планируемой мюонной системы. НИИЯФ МГУ активно участвует в работе над созданием различных подсистем, обеспечивающих работу прототипа, которые в дальнейшем будут масштабированы и применены в пробегной (мюонной) системе детектора SPD.

Данная работа посвящена разработке как аппаратных и технических, так и программных решений для создания прототипа пробегной (мюонной) системы детектора SPD.

Актуальность работы заключается в беспрецедентности и масштабности для российской науки проекта ускорительного комплекса NICA: каждая разработка в рамках этого проекта, в том числе и исследуемый в данной работе прототип мюонной системы, несет огромную практическую значимость для любых других будущих детекторов, которые будут разработаны в ОИЯИ и НИИЯФ МГУ, а также для всего научного сообщества РФ в целом.

В работе рассказывается о 4-л детекторах в физике высоких энергий, структуре и назначении ускорительного комплекса NICA, а также его детекторе SPD, показана его пробегная (мюонная) система, а также ее прототип, на котором будут опробованы все программные и технические решения, которые в дальнейшем будут масштабированы на всю пробегную систему детектора SPD.

1. 4-π детекторы в физике высоких энергий

Основной инструмент исследований в физике высоких энергий на встречных пучках — 4π-детекторы, имеющие слоистую структуру. Примером служит детектор DELPHI [2] (DEtector with Lepton, Photon and Hadron Identification). Этот детектор был одним из четырех основных детекторов на Большом электрон-позитронном коллайдере (LEP), работавшим ранее в международном ядерном научно-исследовательском центре CERN. Целью его работы было высокоточное определение частиц, рождающихся в e^+e^- столкновениях, для всестороннего изучения W^\pm и Z^0 бозонов и электрослабого взаимодействия. LEP проработал с 1989 по 2000 год, а сейчас его кольцевой туннель служит для Большого адронного коллайдера (БАК, или LHC – Large Hadron Collider).

Большой адронный коллайдер начал свою работу в 2008 году, с тех пор провел два сеанса работы, а в данный момент остановлен для модернизации к третьему сеансу. Его основной задачей является проверка Стандартной модели и поиск «новой физики» вне её пределов. На LHC находится детектор CMS (Compact Muon Solenoid) [3], который имеет схожую конструкцию с DELPHI. Эти детекторы имеют цилиндрическую форму и концентрическую, или «луковичную», структуру. Они включают в себя следующие функциональные блоки: ближайший к пучку внутренний трековый детектор, необходимый для точного определения вершины, электромагнитный калориметр, адронный калориметр и внешнюю часть детектора — мюонную подсистему. Мюонная подсистема в этих детекторах сделана слоистой — газовые детекторы перемежаются слоями железа, которые замыкают магнитное поле от сверхпроводящих магнитов. Схема детектора CMS представлена на рис. 1, мюонная система отдельно выделена черным цветом.

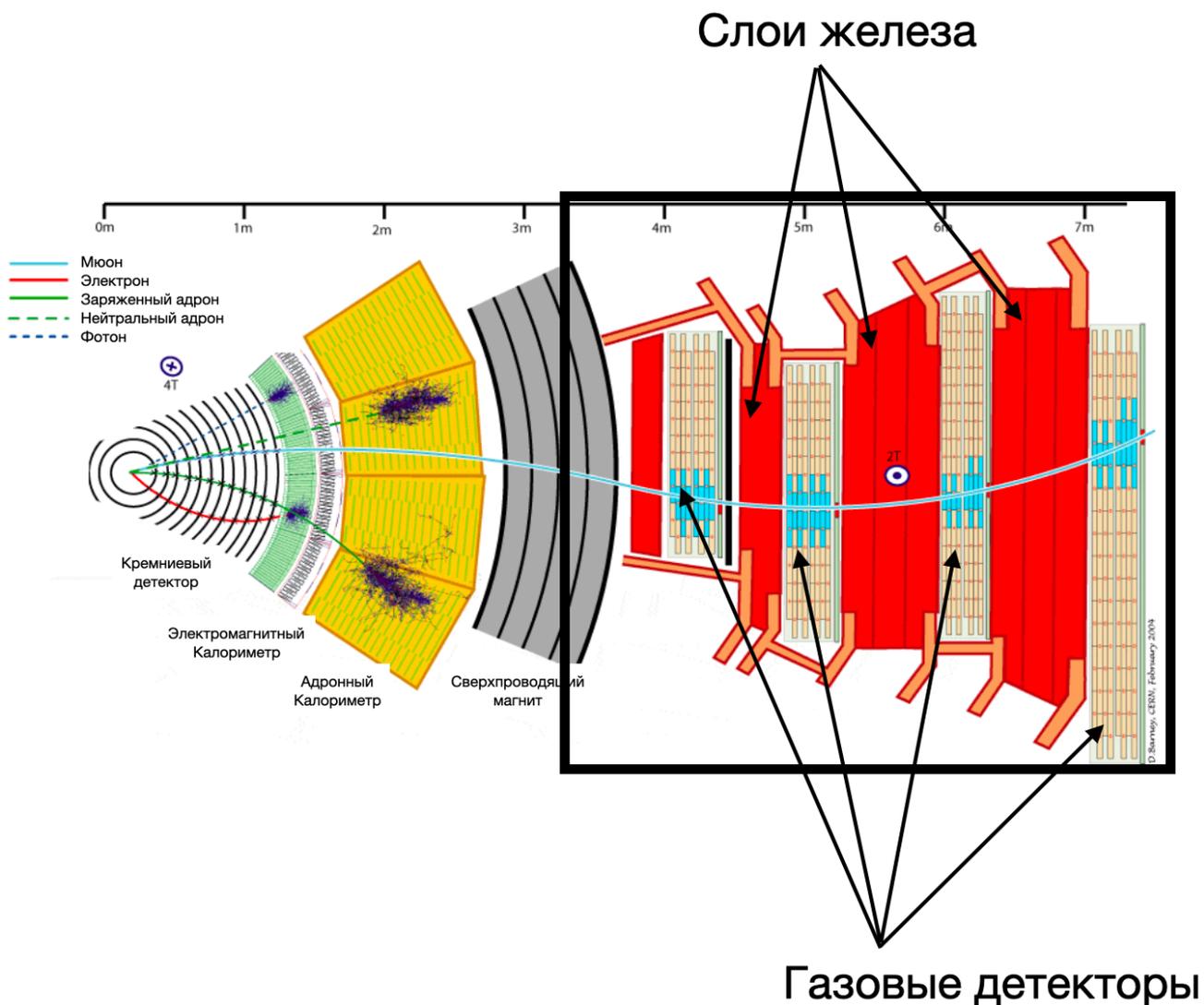


Рисунок 1. Схема детектора CMS.

Другим примером 4π-детектора является детектор эксперимента PANDA, строящийся в данный момент на базе ускорительного комплекса FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) в городе Дармштадт, Германия. [4] Этот детектор будет изучать столкновения антипротонов с фиксированной мишенью с энергиями в диапазоне 1,5 – 15 ГэВ. Схема детектора PANDA показана на рис. 2, мюонная система также является внешней частью детектора и выделена синим цветом.

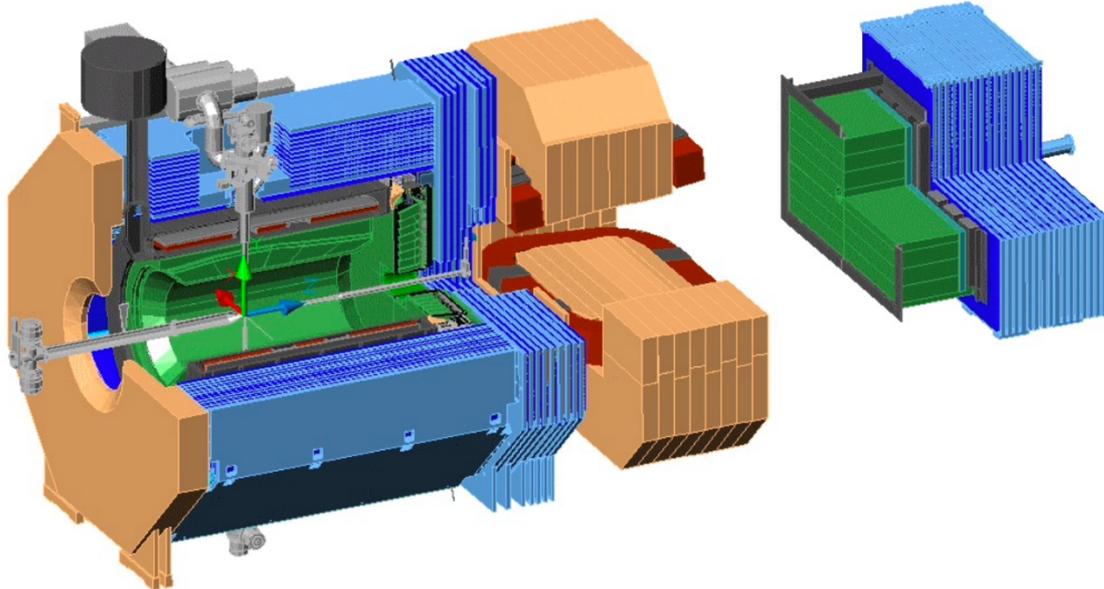


Рисунок 2. Схема детектора PANDA, мюонная система выделена синим цветом.

Мюонная подсистема детектора PANDA также будет сделана слоистой, где газовые детекторы перемежаются слоями железного поглотителя. Общй вес мюонной системы этого детектора составит около 24 тонн, из которых больше 22 тонн будет весить железный поглотитель.

1.1. Роль пробежной системы в 4-π детекторах

В столкновениях заряженных частиц всегда рождается большое количество разнообразных частиц, их все необходимо зарегистрировать. Разные частицы по-разному взаимодействуют с веществом, что влияет на способ и сложность их детектирования. В каждом таком столкновении всегда рождаются мюоны, которые также необходимо детектировать.

Мюоны – элементарные частицы, являющиеся лептонами. Мюон имеет отрицательный электрический заряд, его масса равна 105,66 МэВ, а время жизни порядка нескольких микросекунд. Эта частица была открыта в 30-х годах прошлого века в космических лучах. Характерным свойством мюона, с точки зрения его детектирования, является его высокая проникающая способность, связанная с большой массой мюона, обеспечивающей низкие тормозные потери, а также с тем, что мюон не подвержен сильному взаимодействию.

Именно высокая проникающая способность мюона в веществе послужила причиной того, что в «луковичных» 4-π детекторах подсистема, отвечающая за регистрацию мюонов, располагается в самой внешней части. Остальные внутренние системы являются своего рода фильтром для большинства остальных частиц.

Эффективным способом детектирования мюонов являются пробегные системы (range systems), в которых детекторы перемежаются слоями поглотителя для того, чтобы измерить длины пробега искомых мюонов.

На описанном выше детекторе эксперимента PANDA необходимо проводить измерения мюонов с широким диапазоном импульсов от величин ниже 1 ГэВ до 10 ГэВ (J/ψ , чармоний, Дрелл-Ян и т. д.), это требует хорошей идентификации мюонов. Например, если мы возьмем пары мюонов процесса Дрелла-Яна в качестве эталонного процесса для оценки производительности детектора PANDA, то будут иметь значение следующие характеристики: средняя

энергия около нескольких ГэВ, максимально достижимая около 10 ГэВ, а также полярный угол мюонов, приближающийся к 150 градусам (в лабораторной системе отсчета для импульса пучка 15 ГэВ/с). Процесс Дрелла-Яна является естественным выбором для оптимизации мюонной системы PANDA, поскольку ее мюонные пары имеют максимальный разброс по импульсу, который покрывает спектры других представляющих интерес процессов с мюонами в конечном состоянии, например, возникающими из J/ψ и D-мезонов.

Представляющие интерес процессы, имеющие мюоны в конечных состояниях, имеют малые сечения по сравнению с фоном. Это предполагает очень хорошую идентификацию мюона, чтобы максимизировать отношение сигнала к фону. Идентификация мюонов может осуществляться с помощью различных детекторных систем и методов, например:

- 1) мюонный трекер (хорошая и четкая видимость образца трека даже в присутствии адронных ливней);
- 2) калориметрия, как электромагнитная, так и адронная (выделение энергии dE/dx);
- 3) сцинтилляционные счетчики (времяпролетное измерение);
- 4) черенковские счетчики.

Первую систему можно считать основной для надежной идентификации мюонов, остальные – важными, но дополнительными. Корреляция сигналов от всех независимых систем должна обеспечить желаемый уровень чистоты сигнала для мюонов. Эти корреляции становятся более важными при более низкой энергии луча. Как обычно, основной задачей мюонной системы является распознавание образов (мюонная идентификация) и сопоставление с сегментом трека внутри магнитов. Точное измерение импульса мюона осуществляется внутренними трекерами магнитных спектрометров.

В эксперименте PANDA в качестве подсистемы детектирования мюонов была выбрана именно пробегная система. В качестве поглотителя используется

железо, которое также выполняет функцию магнитного ярма, что достаточно часто встречается в подобных системах. Пробежная система в PANDA будет обладать надлежащей степенью детализации, близкой к рассеянию мюона в железном поглотителе. Это является хорошим решением как для обнаружения мюонов, остановленных поглотителем, так и для тех, которые пересекают железо. В первом случае можно даже грубо оценить энергию мюона. Тормозная способность железа составляет около 1,5 ГэВ на метр поглотителя для релятивистских мюонов с $dE/dx = 2$ МэВ/г.

2. Детектор спиновой физики (SPD)

2.1. Ускорительный комплекс NICA

В 1951 году академиком Д.В. Скобельцыным был утвержден проект грандиозного кольцевого ускорителя-синхрофазотрона протонов до энергии 10 ГэВ. Синхрофазотрон был построен в Московской области в городе Дубне и заработал в 1957 году. Научным руководителем проекта был член-корреспондент АН СССР В.И. Векслер, получивший за создание этого проекта в 1959 году Ленинскую премию. [5]

В результате разработки этого беспрецедентного проекта был образован Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ). Там же была образована лаборатория высоких энергий имени В.И. Векслера и А.М. Балдина, на базе которой в 1980-1990 гг. был построен более современный ускоритель пучков многозарядных ионов с энергиями до 6 ГэВ на нуклон, протонов, а также поляризованных дейтронов – «Нуклотрон». [6]

В 2010 году ОИЯИ представил проект российского суперколлайдера на базе Нуклотрона NICA (Nuclotron-based Ion facility), который сразу получил большую поддержку со стороны государства и международных коллабораций. Также этот проект получил статус «мегасайенс» в классификации Минобрнауки в рамках Национального проекта «Наука». [7]

В своей работе NICA будет использовать взаимодействия пучков самых разных частиц: от протонов и поляризованных дейтронов до массивных ионов золота. Тяжелые ионы планируется разгонять до энергий 4,5 ГэВ (на нуклон), протоны – до 12,6 ГэВ. Регистрация параметров столкновений потоков частиц будет проводиться в двух точках. В этих точках будут расположены проектирующиеся детекторы: MPD (Multi-Purpose Detector), предназначенный для проведения экспериментов в области релятивистской ядерной физики при

столкновениях пучков ядер тяжелых элементов (золота), ядер тяжелых элементов с протонами и протон-протонных столкновениях, а также SPD (Spin Physics Detector), предназначенный для проведения экспериментов по физике спина при столкновениях пучков ядер легких элементов. Эксперименты, которые будут проводиться на этих детекторах, а также эксперимент BM@N (Baryonic Matter at Nuclotron) на выведенном пучке, будут являться основными экспериментами суперколлайдера NICA.

Схема ускорительного комплекса NICA представлена на рис. 3 и состоит из следующих частей:

1) инжектор тяжелых ионов (Heavy Ion Linear accelerator — HiLac), размещаемый во вновь сооружаемой пристройке к зданию инжектора;

2) инжектор легких ионов и поляризованных пучков и канал транспортировки частиц в «Нуклотрон»;

3) бустерный синхротрон (Бустер) — быстроциклирующий сверхпроводящий (СП) протонный синхротрон с максимальной магнитной жесткостью 25 Тлм;

4) канал транспортировки пучка из Бустера в «Нуклотрон»;

5) канал транспортировки пучка из Бустера в экспериментальный зал 1Б;

6) «Нуклотрон» СП протонный синхротрон с максимальной магнитной жесткостью 45 Тлм;

7) каналы транспортировки пучка из «Нуклотрон» в кольца коллайдера; размещаемые в малом измерительном павильоне Ф3;

8) коллайдер — два накопительных кольца с длиной окружности 500 м.

Изучение экстремально горячей и плотной ядерной материи представляет интерес для современной физики в связи с возможностью обнаружить новое и пока слабо изученное состояние материи — кварк-глюонную плазму (КГП), существование которой предсказано квантовой хромодинамикой (КХД) — теорией, изучающей сильное взаимодействие. В результате изучения КГП при высоких энергиях сталкивающихся нуклонов $\sqrt{s_{NN}} = 10 - 200$ ГэВ был

обнаружен ряд новых явлений, таких как сильные коллективные потоки вторичных частиц, значительное уширение распределений по поперечным импульсам, сильная немонотонность отношения K/π в зависимости от энергии столкновения, повышенный выход странных частиц, подавление струй при прохождении через возбужденную ядерную струю и другие закономерности, представляющие огромный интерес для современной физики. [8]

Также эти исследования позволят изучить аспекты возникновения Вселенной несколько миллиардов лет назад и, прежде всего, процесс формирования из глюонов и кварков частиц барионной материи, существовавшей только на ранних этапах эволюции Вселенной и в недрах нейтронных звезд.



Рисунок 3. Схема ускорительного комплекса NICA.

Ускорительный комплекс NICA имеет своей основной задачей изучение образования кварк-глюонной плазмы в столкновениях релятивистских тяжелых ионов в области энергий $\sqrt{s_{NN}} = 2 - 11$ ГэВ, так как согласно последним теоретическим представлениям, именно в этой области энергии должен наблюдаться фазовый переход между различными состояниями ядерной материи, связанный с кварк-глюонной плазмой. Ускоритель будет обладать очень высокой

светимостью, $L = 10^{27} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Для протонных пучков светимость должна быть на уровне $L \approx 10^{27} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, а энергия столкновений $\sqrt{S_{pp}} = 20 \text{ ГэВ}$.

Помимо фундаментальных исследований экстремально горячей и плотной ядерной материи на пучках комплекса NICA могут проводиться также и прикладные работы. В частности, ОИЯИ имеет богатый опыт в проведении медико-биологических исследований в области адронной лучевой терапии. Также на выведенных пучках планируется изучать новые типы экспериментального ядерного топлива в сотрудничестве с государственной корпорацией по атомной энергии «Росатом».

Непосредственно на кольце коллайдера предусмотрено две точки столкновения пучков, где будут расположены два основных детектора ускорительного комплекса: MPD и SPD.

Многоцелевой детектор MPD уже прошел стадию концептуального дизайн-проекта (CDR), и в данный момент идет разработка технического дизайн-проекта (TDR). [9] Главной целью проекта MPD-NICA является изучение столкновений тяжелых ионов при энергиях $\sqrt{S_{NN}} = 4 - 11 \text{ ГэВ}$ для исследования свойств адронов в сверхплотной ядерной среде, а также уравнения состояния ядерной материи и свойств фазовых переходов, включая поиск возможных сигналов деконфайнмента, критической точки и частичного восстановления киральной симметрии.

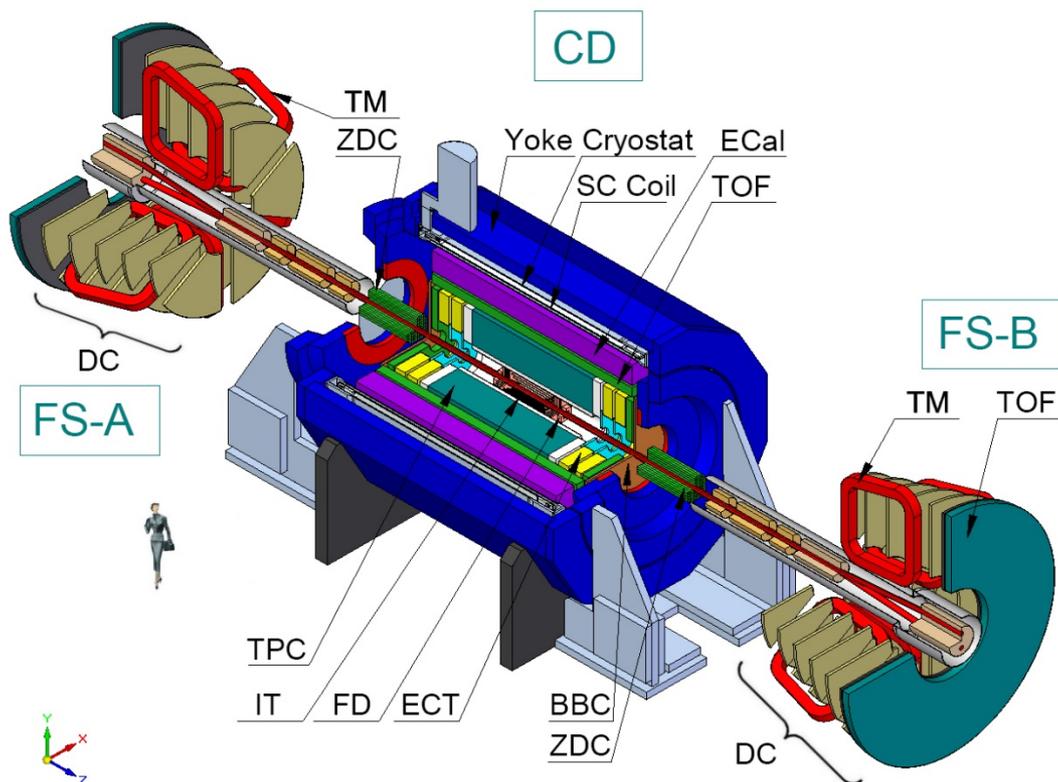


Рисунок 4. Общий вид детектора MPD.

CD – центральный детектор, FS-A,B – передние спектрометры, SC Coil – сверхпроводящий магнит, ECal – электромагнитный калориметр, TOF – времяпролетный детектор, IT – внутренний детектор, TPC – проекционная дрейфовая камера, FD – быстрые передние детекторы, BBC – счетчики столкновения пучков, ZDC – калориметр под нулевыми углами.

Структура детектора MPD представлена на рис. 4: CD – центральный детектор, FS-A и FS-B – два передних спектрометра. Подсистемы детектора MPD: сверхпроводящий соленоид (SC Coil) и ярмо магнита (Yoke), внутренний детектор (IT), трековый детектор на основе тонкостенных трубок, время-проекционная дрейфовая камера (TPC), время-пролетные счетчики (TOF), электромагнитный калориметр (ECal), быстрые передние детекторы (FFD), счетчики столкновения пучков (BBC), калориметр под нулевыми углами (ZDC).

2.2. Детектор SPD

По астрофизическим и космологическим данным относительный вклад видимой барионной материи, свойства которой определяются сильными и электромагнитными взаимодействиями, составляет около 5% массы Вселенной. Что касается двух других компонентов, темной материи и темной энергии, то барионная материя кажется хорошо изученной. Фактически, несмотря на большие успехи квантовой хромодинамики в описании взаимодействия кварков и глюонов в рамках пертурбативного подхода, вопрос о том, почему нуклоны именно такие, какими мы их видим, остается открытым. Понимание структуры и фундаментальных свойств нуклона непосредственно из динамики его кварков и глюонов на основе первых принципов является одной из основных нерешенных проблем КХД.

Спин нуклона равен $\hbar/2$ и отвечает за такие фундаментальные свойства природы, как магнитный момент нуклона, различные фазы вещества при низких температурах, свойства нейтронных звезд и стабильность известной Вселенной. Вот почему изучение спиновой структуры нуклона имеет особое значение. Классическая кварковая модель успешно предсказала такие свойства адронов, как заряд, четность, изоспин и свойства симметрии, а также их соотношения. Некоторая динамика взаимодействия частиц также может быть качественно понята в рамках этой модели. Однако эта модель не может объяснить спиновые свойства адронов с точки зрения их составляющих. Со времени знаменитого «спинового кризиса», начавшегося в 1987 г. [10], проблема спиновой структуры нуклона остается одной из самых интригующих загадок современной физики высоких энергий. Центральной проблемой, на протяжении многих лет привлекающей как огромные теоретические, так и экспериментальные усилия, является проблема того, как спин нуклона складывается из спинов и орбитальных импульсов его составляющих — валентных и морских кварков, а также глюонов.

Полное описание можно дать в терминах так называемых партонных функций распределения, зависящих от поперечного импульса.

За последние 25 лет эксперименты по поляризованному глубоконеупругому рассеянию (CERN, DESY, JLab, SLAC) и высокоэнергетические поляризованные протон-протонные столкновения (RHIC в BNL) были основными источниками информации о спин-зависимых структурных функциях нуклона. Тем не менее наши знания о внутренней структуре нуклона все еще ограничены. Особенно это относится к глюонному вкладу.

Детектор спиновой физики (Spin Physics Detector, SPD) — это универсальная установка для изучения спиновой структуры нуклонов и других спиновых явлений с поляризованными пучками протонов и дейтронов. В основе проекта лежит обширный опыт работы с поляризованными пучками в ОИЯИ. Именно всестороннее исследование спина протона, изучение поляризованных частиц, а также изучение рождения J/ψ -мезонов с помощью механизма Дрелла-Яна для получения новых спиновых и поляризационно-зависимых партонных функций распределения являются основной целью эксперимента SPD. [11]

Также эти исследования позволят изучить аспекты возникновения Вселенной несколько миллиардов лет назад и, прежде всего, процесс формирования из глюонов и кварков частиц барионной материи, существовавшей только на ранних этапах эволюции Вселенной и в недрах нейтронных звезд.

Энергия столкновения поляризованных пучков протонов и дейтронов в детекторе SPD будет достигать величин до 27 ГэВ, а предельная светимость будет равна $1032 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$. Экспериментальная установка SPD представляет собой универсальный 4 π -детектор с расширенными возможностями отслеживания и идентификации частиц на основе современных технологий, который будет установлен в экспериментальном зале SPD коллайдера NICA. (Рис. 5)

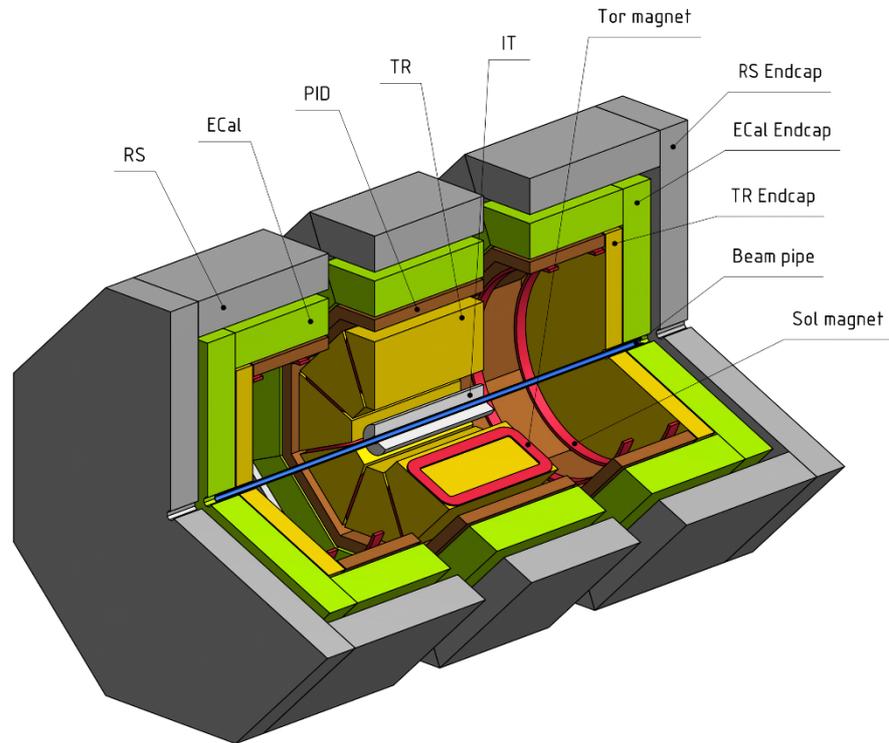


Рисунок 5. Общий вид детектора SPD.

RS – пробежная (мюонная) система, ECal – электромагнитный калориметр, PID – времяпролетная система, TR – трековая система, IT – вершинный детектор, Endcap – торцевая часть детектора, Beam pipe – трубка пучка

Кремниевый вершинный детектор (VD) обеспечит определение положения вершины, необходимое для реконструкции вторичных вершин распадов D-мезонов, с пространственным разрешением на уровне менее 100 мкм. Трековая система (ST) на основе строу-трубки, помещенная в соленоидальное магнитное поле до 1 Тл на оси детектора, должна обеспечивать разрешение по поперечному импульсу $\sigma_{p_T} / p_T \approx 2\%$ для импульса частицы 1 ГэВ/с. Времяпролетная система (PID) с временным разрешением около 60 пс обеспечит разделение 3σ π/K и K/p примерно до 1,2 ГэВ/с и 2,2 ГэВ/с соответственно. Возможное использование черенковского детектора на основе азрогеля в торцевых крышках расширит этот диапазон. Детектирование фотонов будет обеспечиваться пробоотборным электромагнитным калориметром (ECal) с энергетическим разрешением

$\sim 5\%/\sqrt{E}$. Чтобы свести к минимуму эффекты многократного рассеяния, а также конверсию фотонов, материал детектора будет сведен к минимуму во всей внутренней части детектора. Для идентификации мюонов планируется мюонная (пробежная) система (RS). Она также может действовать как грубый адронный калориметр. Пара счетчиков пучков (BBC) и калориметров нулевого градуса (Zero Degree Calorimeter) будут отвечать за локальную поляриметрию и контроль светимости. Чтобы свести к минимуму возможные систематические эффекты, SPD будет оснащена автономной (без триггера) системой сбора данных. Высокая частота столкновений (до 4 МГц) и несколько сотен тысяч каналов детектора создают серьезную проблему для сбора данных, онлайн-мониторинга, автономной вычислительной системы и программного обеспечения для обработки данных.

2.3. Этапы реализации детектора SPD

Процесс создания современного 4π-детектора от идеи до конкретной реализации – это долгий и сложный процесс, в котором участвуют тысячи людей. Этот процесс состоит из нескольких этапов, концом каждого этапа является написание объемного документа, где описывается промежуточный результат работ:

- 1) первый этап начинается с идеи создания какого-либо детектора, утверждения его физической программы и создания приблизительного списка технических решений, а заканчивается написанием концептуального дизайн-проекта (CDR, Conceptual Design Report), в котором описываются общие идеи и концепции детектора, существующие подсистемы, требования к инфраструктуре, электропитанию, строительно-монтажным работам, моделирование и макетирование детектора, а также приблизительная оценка стоимости;
- 2) второй этап начинается сразу после написания CDR — на основе этого документа уточняются технические характеристики, добавляются какие-либо подсистемы, необходимость которых стала ясна на основании дизайн проекта, утверждаются сроки изготовления, ответственные лица, уточняются до мельчайших деталей все концепты, создаются прототипы всех подсистем, утверждается стоимость подсистем. Результатом второго этапа становится технический дизайн-проект (TDR, Technical Design Project), на основании которого формируется бюджет всего детектора;
- 3) третий этап является заключительным — на основании TDR начинаются масштабные работы по непосредственному сооружению детектора, сбор и проверка всех подсистем, непосредственная сборка детектора из подсистем в экспериментальном зале, создание необходимой

инфраструктуры и прочие работы по введению детектора в эксплуатацию. Результатом третьего этапа является работающий детектор, а также идеи по его возможной модернизации.

Детектор SPD в данный момент находится на втором этапе: уже существует концептуальный дизайн-проект детектора, где были утверждены все основные концепты, а сейчас активно создается технический дизайн-проект, который должен быть представлен уже в этом году. В процессе разработки TDR была проведена оценка сроков введения детектора в эксплуатацию, а также уже на этом этапе была запланирована модернизация детектора после нескольких лет работы.

(Рис. 6)



Рисунок 6. План внедрения и модернизации детектора SPD.

Так как после написания TDR сразу начинаются работы по созданию детектора, должна быть уверенность в том, что все описанные на бумаге технические решения будут работать именно так, как задумывалось. В этом разработчикам каждой подсистемы детектора помогает прототипирование – создание небольшого прототипа каждой подсистемы для проверки работы детекторов, системы сбора данных (DAQ, Data Acquisition), системы контроля, а также проверки работы всех этих систем в сборе. Эти прототипы проходят

сначала первичную проверку на космических лучах, а затем непосредственно на выведенном пучке в специальной зоне ускорительного комплекса, названной зоной теста пучка (BTZ, Beam Test Zone).

В данный момент создан прототип различных подсистем детектора SPD, который называется miniSPD (Рис. 7). Этот прототип задумывался в качестве лабораторного стенда, куда можно добавлять новые подсистемы и убирать старые в процессе работы. Помимо непосредственной проверки работы различных детекторов, целями прототипа также является тестирование системы сбора данных (DAQ), сравнение математического моделирования прототипа с его реальной работой, проверка временной стабильности всех компонентов в течение длительного времени, отработка узлов системы контроля, а также выявление проблемных мест для каждой подсистемы.

Сейчас прототип ориентирован вертикально для работы с космическими мюонами, но в дальнейшем он будет перемещен в тестовую зону для тестирования на выведенном пучке.

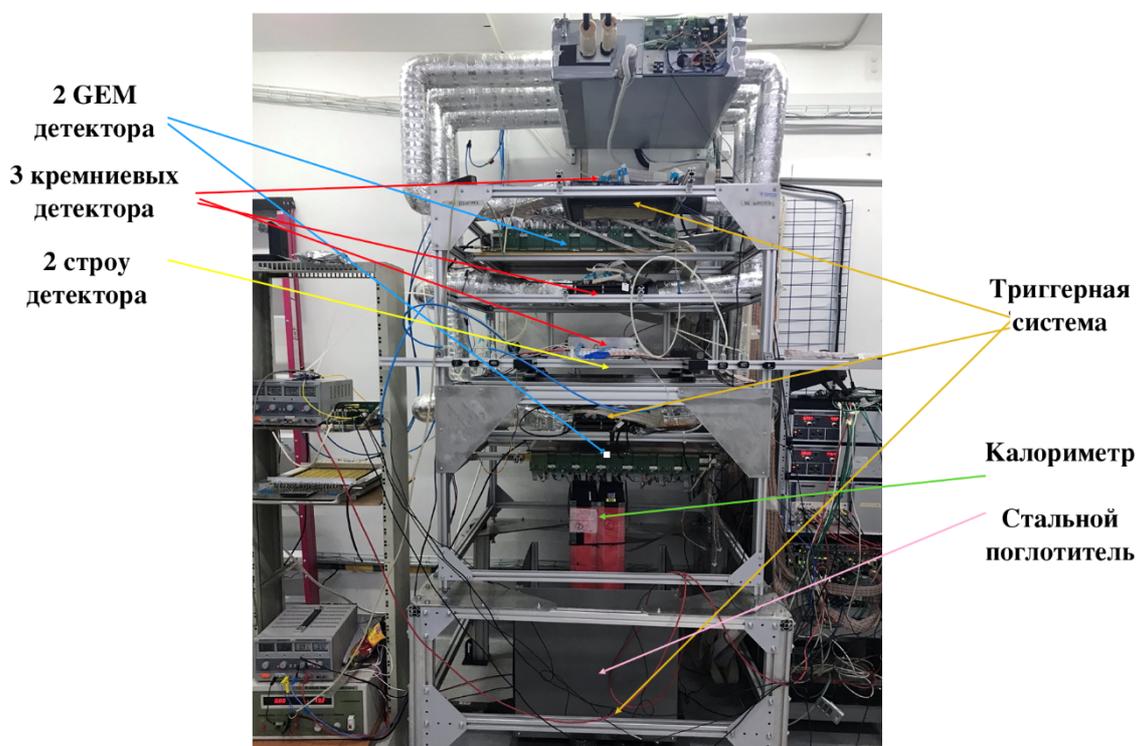


Рисунок 7. Прототип miniSPD.

3. Пробежная (мюонная) система детектора SPD

3.1. Задачи и структура пробежной (мюонной) системы

Пробежная (мюонная) система детектора SPD (Рис. 8) служит следующим целям:

- 1) идентификация мюонов при значительном адронном фоне;
- 2) оценка адронной энергии (грубая адронная калориметрия).

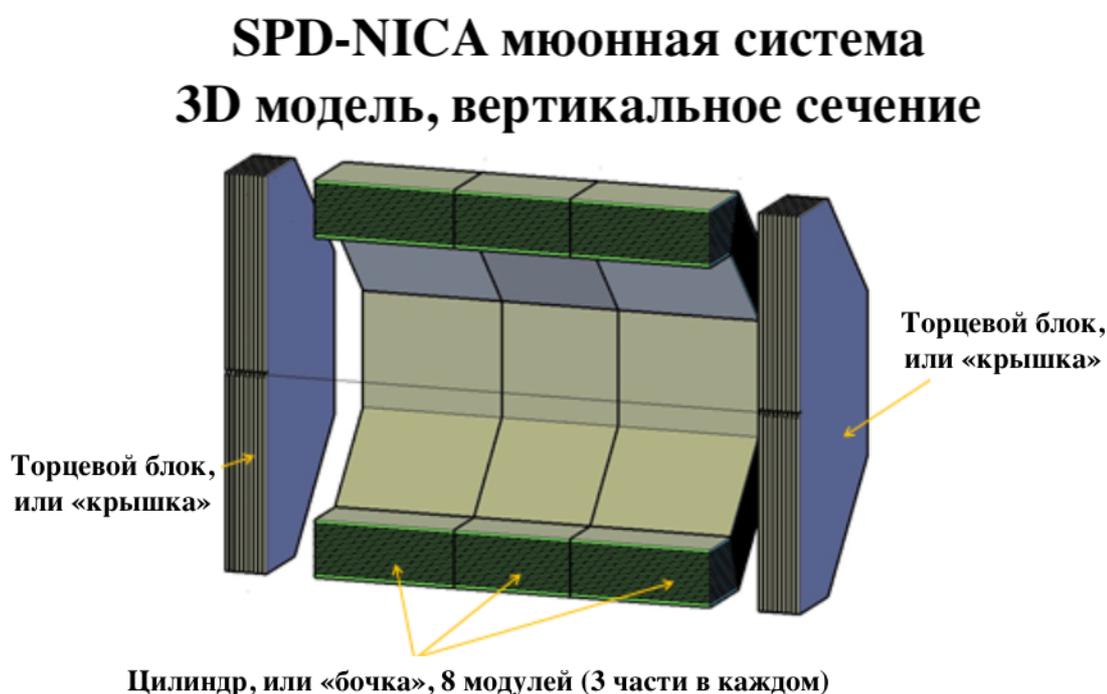


Рисунок 8. 3D модель мюонной системы детектора SPD.

Необходимо отметить, что эта система является единственным устройством в установке SPD, которое может идентифицировать нейтроны, сопоставив полученные сигналы с сигналами от электромагнитного калориметра и внутренних детекторов. Мюонная идентификация обеспечивается системой распознавания образов и дальнейшим поиском совпадений сегментов трека с треками внутри магнитов. Прецизионное определение импульса мюонов обеспечивается внутренними трекерами в магнитном поле. Мини-дрейфовые

трубки (The Mini Drift Tubes, MDT) [12] используются в пробежной системе в качестве трековых детекторов, обеспечивающих двухкоординатное считывание, особенно необходимое для событий с высокой множественностью, а также для реконструкции пространственного угла нейтронов.

Одной из основных физических целей пробежной системы является идентификация мюонов из $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ распадов, осложненная ошибочно идентифицированными пионами и их распадами.

Для проектирования и конструирования пробежной системы коллаборация SPD решила использовать опыт мюонной системы детектора PANDA, о котором говорилось ранее. Эти системы (в SPD и в PANDA) создаются для детектирования мюонов со сравнимыми величинами импульса и будут решать одинаковые задачи по идентификации, поэтому при их создании была выбрана схожая концепция.

Пробежная система служит поглотителем для адронов и «фильтром» для мюонов, а также образует магнитное ярмо. Эта система состоит из трех частей: «бочка» (Barrel) – внутренняя часть цилиндра, а также две «крышки» (End Caps) – торцевые части цилиндра. «Бочка» состоит из восьми модулей (октантов), а каждая «крышка» состоит из двух половин (створок), разделенных по вертикали. Каждая створка в свою очередь также разделена на две равные части в вертикальной плоскости, идущей перпендикулярно направлению пучка. Такое разделение системы (всего 16 частей) выбрано для оптимизации дальнейшей сборки.

Укрупненная схема структуры пробежной системы показана на рис. 9. Внешние 60-миллиметровые слои железа используются для соединения модулей друг с другом, а также для крепления внутренних детекторов и внешних сервисных устройств. Расстояние между слоями в 35 мм необходимо для надежного крепления детектирующих слоев, включающих в свой состав минидрейфовые трубки, стриповые платы и платы с электроникой нормализации сигнала. 30-мм поглотительные пластины необходимы для разделения мюонов и пионов, а также обеспечения хорошей выборки для адронной калориметрии.



Рисунок 9. Структура пробежной системы детектора SPD.

Общий вес системы около 856 тонн, включая 30 тонн детекторов. Общее количество мини-дрейфовых трубок составляет около 10000 штук, которые будут размещены следующим образом: в «бочке» вдоль направления пучка, а в «крышках» перпендикулярно пучку (горизонтально). «Бочка» пробежной системы, а также «бочка» с «крышками» показана на Рис. 10.

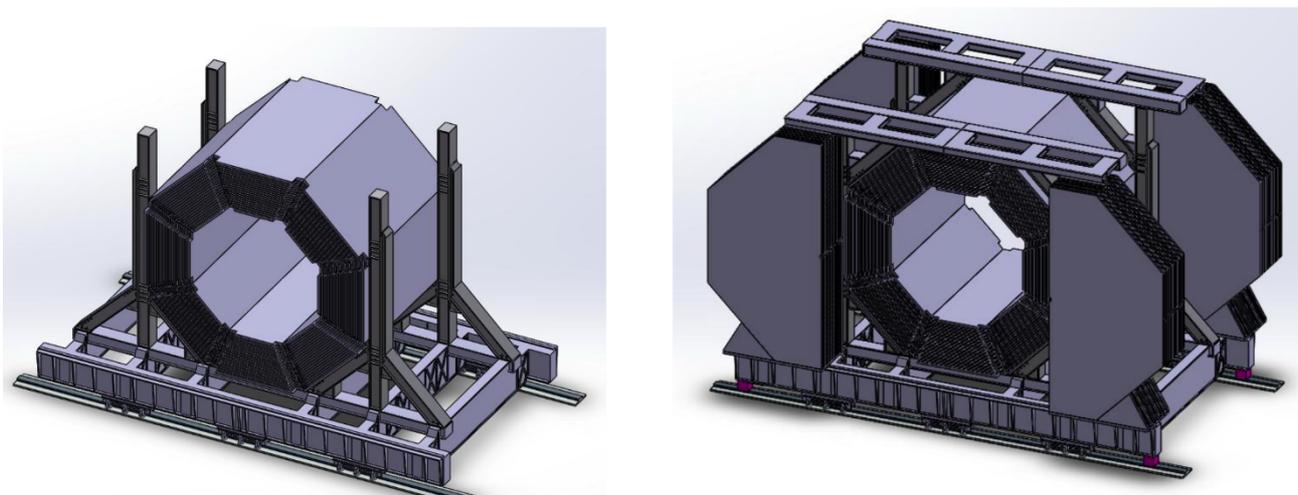


Рисунок 10. «Бочка» мюонной системы слева и «бочка» с «крышками» справа.

3.2. Система детектирования частиц

Основным инструментом пробежной (мюонной) системы с точки зрения регистрации частиц является газовый детектор под названием «Мини-дрейфовая трубка» (The Mini Drift Tubes, MDT). Эти детекторы были разработаны и созданы в ОИЯИ для мюонной системы эксперимента D0 на ускорителе Теватрон в Национальной ускорительной лаборатории им. Э. Ферми в США [13]. В дальнейшем эти детекторы также были использованы в мюонной системе эксперимента COMPASS на Большом адронном коллайдере в ЦЕРН [14]. (Рис. 11)

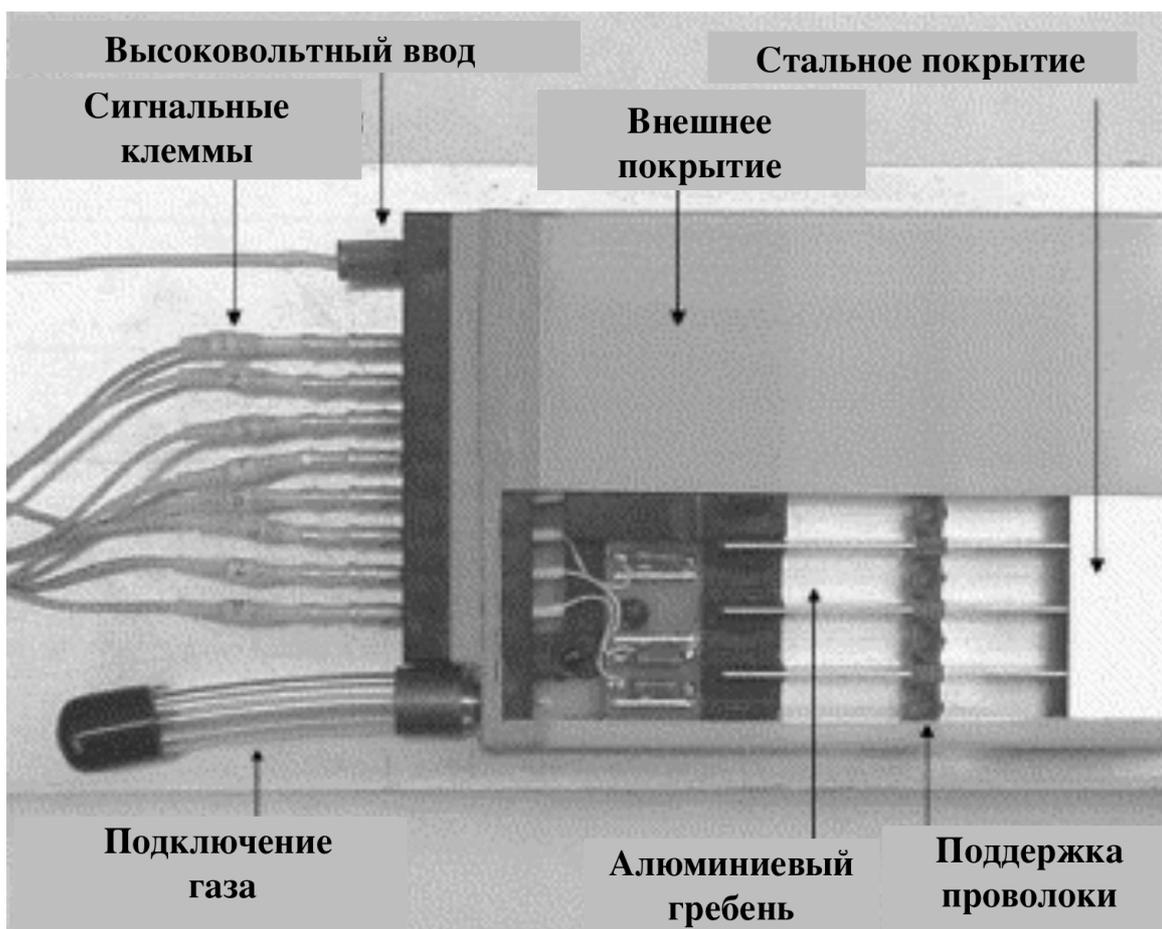


Рисунок 11. MDT-детектор для экспериментов D0 и COMPASS.

Следующим этапом в развитии мини-дрейфовых трубок стал эксперимент PANDA, для мюонной системы которого была разработана модифицированная версия детектора с геометрией открытого катода и внешними отводящими электродами, которая позволила проводить двухкоординатное считывание. Разработанная модификация детектора MDT обладает радиационной стойкостью, координатным и временным разрешением, точностью и надежностью, необходимыми для задач пробегной (мюонной) системы детектора SPD. Это вместе с теми фактами, что были проведены научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы новой версии MDT в рамках эксперимента PANDA, а также то, что эти детекторы разрабатывались и производятся на базе ОИЯИ, сделали MDT лучшим кандидатом на роль детектирующей части пробегной (мюонной системы) для SPD.

Поперечное сечение и макет MDT с геометрией открытого катода показаны на рис. 12. Детектор MDT состоит из металлического катода (гребенчатый 8-секционный профиль из экструдированного алюминия), проволок анода с пластиковыми поддержками и полимерного корпуса для газовой непроницаемости.



Рисунок 12. Сечение и макет MDT с геометрией открытого катода.

Гребенчатый профиль катода обеспечивает каждой проволоке открытое пространство, чтобы индуцировать сигналы проволок на внешних электродах (стрипах), перпендикулярных проволокам. Стрипы применяются для получения второй координаты отсчета. Форма наведенного сигнала повторяет исходный, имеет противоположную полярность, а амплитуда составляет около 15% от сигнала проволоки. Таким образом, считывание стрипового сигнала требует повышенного усиления и надлежащего электромагнитного экранирования. (Рис. 13)

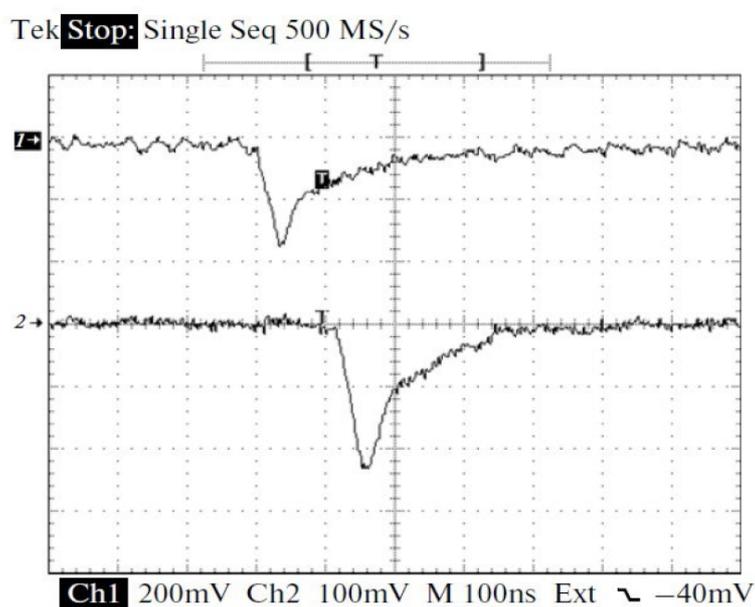


Рисунок 13. Осциллограмма сигнала: с анодного провода (1) и со стрипа (2, инвертированный) коэффициенты пересчета равны 60 и 480 мВ/мкА соответственно.

Версия MDT с геометрией открытого катода показала меньшую эффективность по сравнению с предыдущей версией MDT, но эта проблема исчезла при повышении рабочего напряжения на 100-200 вольт. Также были проведены тесты по проверке радиационной стойкости детекторов, которые показали долговременную стабильность работы MDT с геометрией открытого катода.

В пробежной системе детектора SPD будет использоваться относительно простая газовая система (рис. 14). Следует приготовить и распределить по всему объему детектора негорючую и невзрывоопасную смесь аргона и углекислого газа: $Ar : CO_2 = 70:30$. Такая смесь является дешевой и не требует замкнутого контура для рекуперации отходящего газового потока. Она в течение многих лет успешно использовалась в работе мюонных подсистем эксперимента COMPASS, где использовались практически одинаковые детекторы MDT.

Предполагается, что смесь газов будет готовиться массовыми расходомерами. Требуемая точность смеси составляет около 1% (относительное значение по отношению к меньшему значению, то есть объем углекислого газа). Основные компоненты — аргон и углекислый газ — должны подаваться централизованно системой распределения газов для детектора SPD на входы массовых расходомеров. Выходы массовых расходомеров будут подключены к буферной емкости, где будет происходить смешивание газов. Далее из буферной емкости смесь распределяется по всем каналам пробежной системы с помощью механических расходомеров (ротаметров).

В данный момент предполагается наличие 16 основных каналов для контроля входящего газового потока (ротаметры) и их выходы (простые барботеры). Эти 16 каналов будут состоять из следующих частей: 8 октантных модулей «бочки» и 8 полустворок торцевых «крышек». Суммарный объем этих каналов следующий: около 4 м^3 на каждый модуль «бочки» и около 2 м^3 на каждую полустворку «крышек». В каждом канале/модуле плоскости детектирования будут соединены параллельно, а детекторы MDT каждой плоскости – последовательно.

Общий объем пробежной системы детектора SPD составит около 50 кубических метров. Скорость газообмена, определяющая расход, составит примерно $0,5-1 * V_0/\text{сутки}$, где V_0 – номинальный объем системы (около 50 м^3). Это соответствует суммарным потокам в диапазоне 1000-2000 литров в час. Для

нормальной работы системы (длительная стабильная работа) предполагается расход 1000 л/ч.

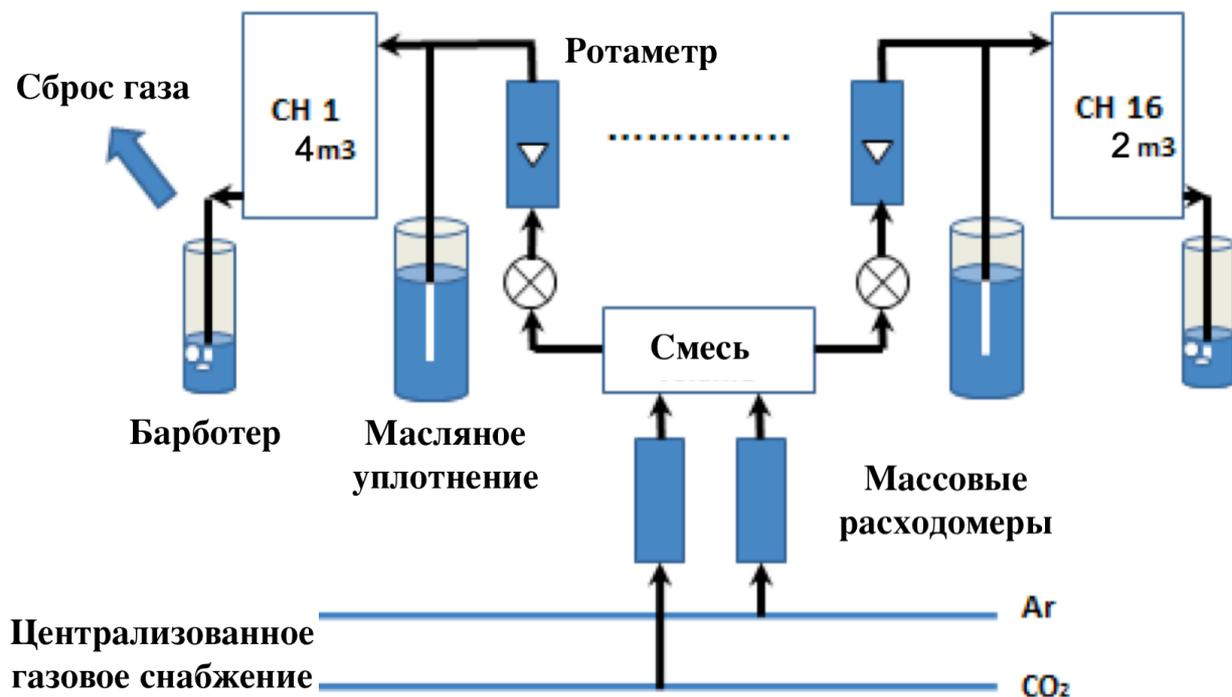


Рисунок 14. Структурная схема газовой системы для пробежной системы SPD.

3.3. Электроника первичной обработки сигналов (front-end электроника)

В связи с тем фактом, что пробегная система детектора SPD наследует все технические решения, разработанные для пробегной системы детектора PANDA, для аналоговой электроники нормализации сигнала (analog front-end electronics, FEE) будут использоваться общие идеи считывания сигналов с проволок и стрипов, уже разработанные и опробованные на прототипе пробегной системы детектора PANDA. Таким образом планируется использование аналоговой электроники (с небольшими изменениями), разработанной для экспериментов D0 на ускорителе Теватрон, COMPASS на ускорителе Большой адронный коллайдер, а также принятые для эксперимента PANDA на ускорителе FAIR.

Процесс считывания сигнала детекторов основывается на двух интегральных микросхемах (ASIC chips): восьмиканальный усилитель сигнала Ampl-8.3 [15] и восьмиканальный компаратор/дискриминатор Disc-8.3 [16]. Для организации считывания сигнала с проволок необходим распределитель высокого напряжения и усилитель-дискриминатор с выходами LVDS (Low Voltage Differential Signal, низковольтная дифференциальная передача сигналов). Комбинация HV/S-8 и платы ADB-32 [17] является наиболее распространенной среди существующих вариантов (см. рис. 3.16 (а), (б)). Для считывания стрипового сигнала используется схема с двумя каскадами Ampl-8.3, за которыми следует дискриминатор с выходом LVDS. Комбинация платы предусилителя A-32 (рис. 3.16 (в)) и ADB-32 (рис. 3.16 (б)) решает эту задачу. Указанные электронные платы без каких-либо доработок могут применяться для проволочных и стриповых сигналов «крышек» мюонной системы. Внешний вид основных электронных плат системы показан на рис. 15.

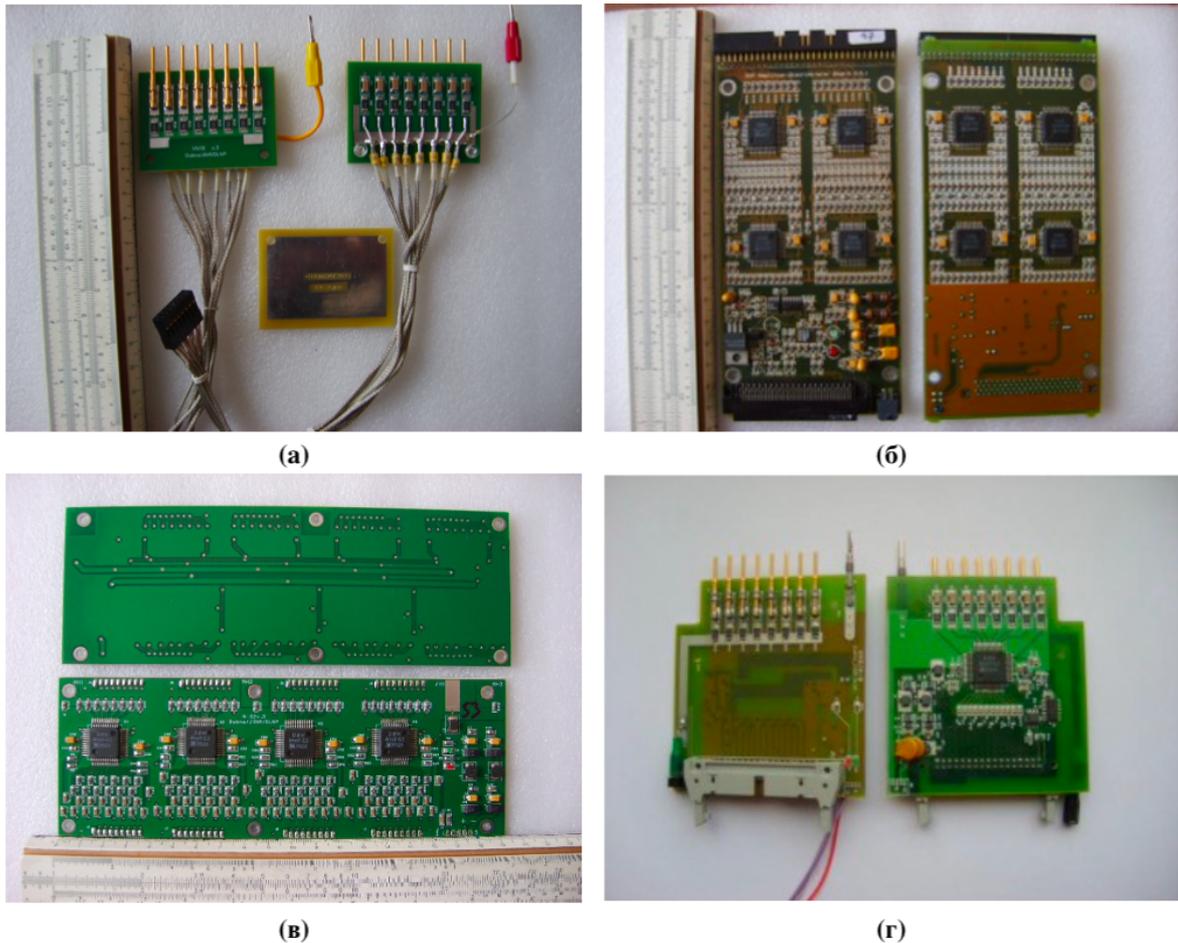


Рисунок 15. Основные электронные платы аналоговой электроники считывания сигнала для пробежной системы SPD.

Для «бочки» пробежной системы будет использоваться та же общая идея считывания сигнала, но конкретная реализация будет отличаться от упомянутой выше электроники. Это связано с тем, что аналоговая электроника считывания сигнала будет являться конструктивной частью детекторного слоя «бочки» и будет закрыта в недоступном месте.

В качестве решения этой проблемы была выбрана 8-канальная электронная карта для считывания проволочных и стриповых сигналов в «бочке» со всеми необходимыми электронными схемами, реализованными на одной плате. Для проволочного считывания это будет модификация платы HVS/A-8, разработанной для «бочки» пробежной системы эксперимента PANDA (рис. 15, г). Модифицированная плата будет включать в свой состав схему распределения

высокого напряжения, а также усилитель и дискриминатор со всеми необходимыми схемами. Аналоговая электроника считывания стриповых сигналов будет представлять собой восьмиканальную плату, содержащую предусилитель, усилитель и дискриминатор со всеми соответствующими схемами. Всего в пробегной системе планируется 130200 каналов считывания (80000 для проволок и 50200 для стрипов) для «бочки» и «крышек» вместе.

В данный момент продолжаются научно-исследовательские работы по изучению возможности модернизации электроники считывания сигнала, а испытания прототипа пробегной системы позволят комплексно подойти к этому вопросу.

4. Прототип пробежной (мюонной) системы детектора SPD

Помимо прототипа miniSPD, о котором говорилось ранее, для детектора SPD было принято решение создать прототип пробежной (мюонной) системы. Так как идеи пробежной системы для SPD во многом похожи на решения для пробежной системы детектора PANDA, то и их прототипы будут похожи, а прототип пробежной системы детектора PANDA уже прошел все этапы тестирований (рис.16). Этот прототип имеет вес 8 тонн, содержит 288 детекторов MDT и 22 стриповых детектора, а также соответствующую систему сбора данных и контроля.

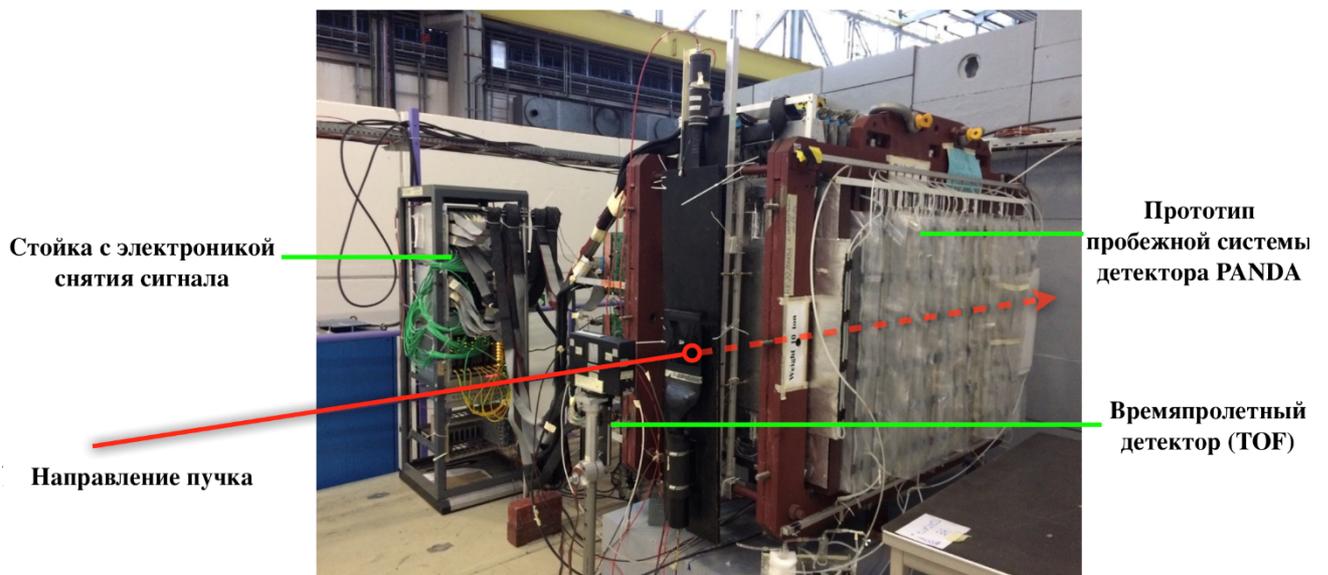


Рисунок 16. Прототип пробежной системы детектора PANDA, установлен на пучке в CERN.

Прототип пробежной системы будет иметь схожие параметры, но размеры и количество каналов будет меньше (рис. 17): на первом этапе тестирования будет собрано 16 плоскостей детектора, а также железные поглотители. В каждой

плоскости 6 MDT, то есть всего 96 детекторов MDT. В каждой трубке 8 проволок, соответственно, общее количество каналов считывания на первом этапе будет равно 768.

Вторым этапом тестирования прототипа будет добавление плоскостей со стриповыми детекторами, расположенных между плоскостями с детекторами MDT. Таким образом общее максимальное количество каналов съема сигнала прототипа в сборе будет около тысячи. Масса такого прототипа около полутора тонн.

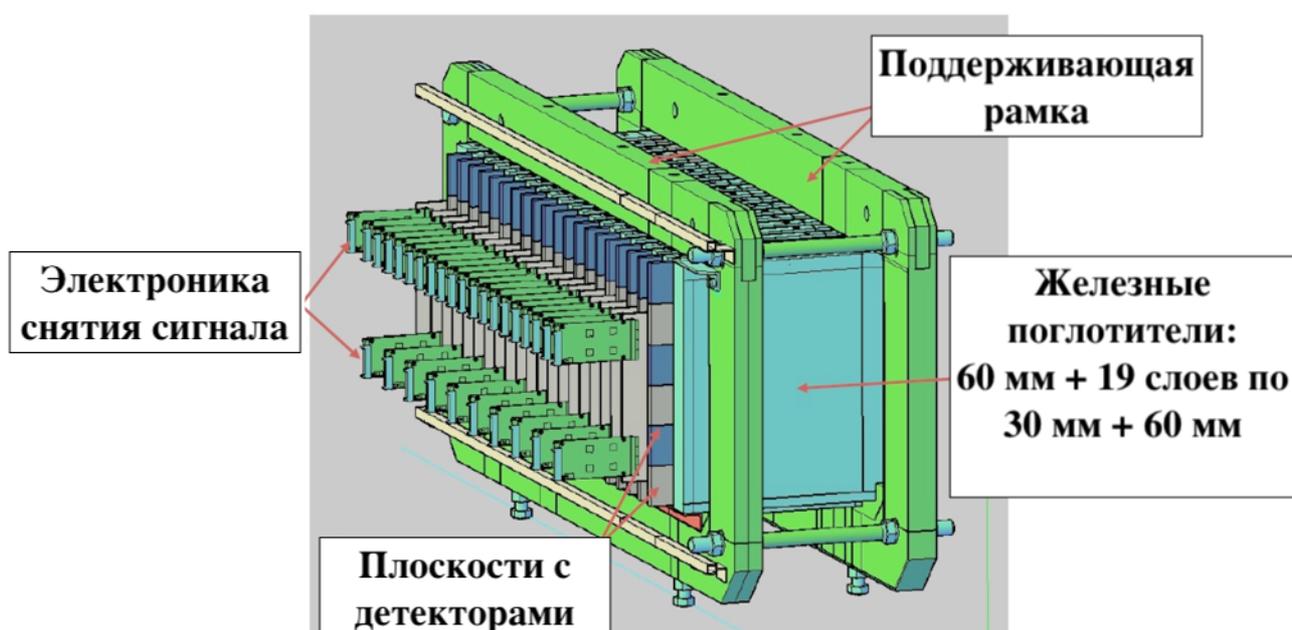


Рисунок 17. Модель прототипа мюонной подсистемы детектора SPD.

Вначале прототип будет расположен вертикально, как на рис. 18 расположена его поддерживающая рамка, для проверки правильности сбора и корректной работы детекторной электронной и программной части на космических мюонах. После этого детектор будет повернут горизонтально и установлен в зоне теста пучка непосредственно на выведенном с ускорителя пучке для имитации будущей работы, а также проверки заявленной радиационной стойкости оборудования.



Рисунок 18. Поддерживающая рамка прототипа, установленная в зоне теста пучка.

4.1. Электроника первичной обработки сигналов прототипа

Помимо проверки работоспособности детекторов и достоверности получаемых физических данных, другой главной целью работы прототипа является проверка работы системы сбора данных, которая представлена в виде специализированной электроники.

Так как на первом конструктивном этапе прототипа испытываются только газоразрядные детекторы MDT, то тестируется соответствующая аналоговая электроника съема сигнала: платы ADB-32 с интегральной микросхемой усилителя Ampl-8.3.

Первым этапом проверки работы электроники считывания является проверка корректного реагирования на космические мюоны каждой плоскости по отдельности: на рис. 19 видно собранную плоскость с подключенной платой сбора сигнала.

На этом этапе в качестве компаратора/дискриминатора используется стендовый вариант, где пороги дискриминатора можно настраивать вручную во время тестов – это важно для первичных проверок конкретно электроники усилителя. Соответственно, сигнал усиливается, а затем идет на первый канал осциллографа и на стендовый дискриминатор, где отсекаются шумы, и его выход подключен ко второму каналу осциллографа. На рис. 20 можно наблюдать результат регистрации космического мюона исследуемой плоскостью с описанным механизмом съема сигнала в виде двух осциллограмм.

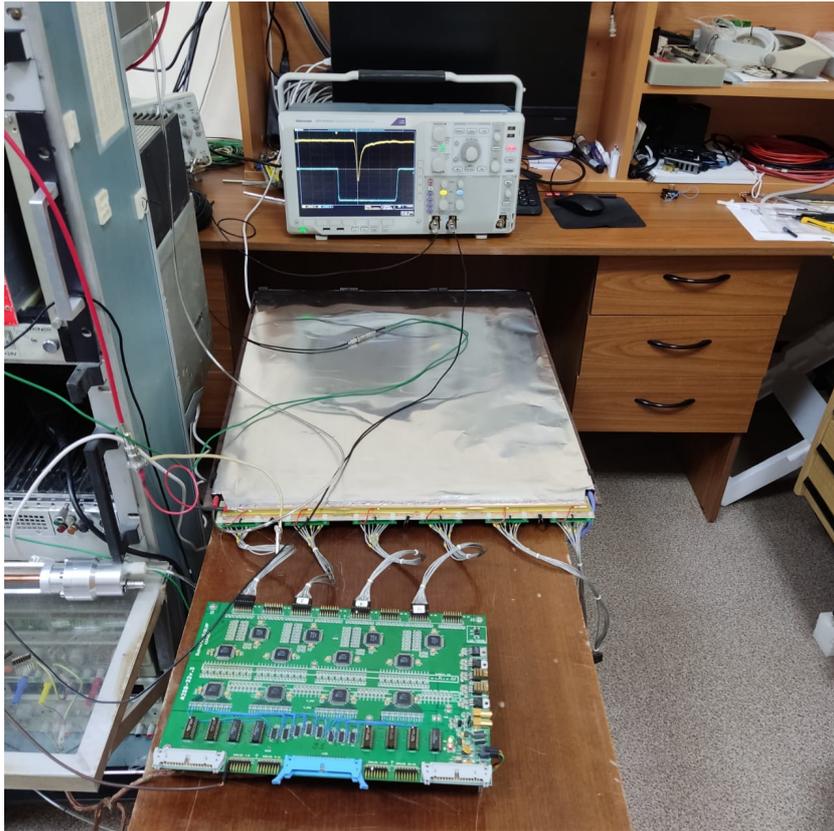


Рисунок 19. Испытания платы с детекторами MDT с космическими мюонами.

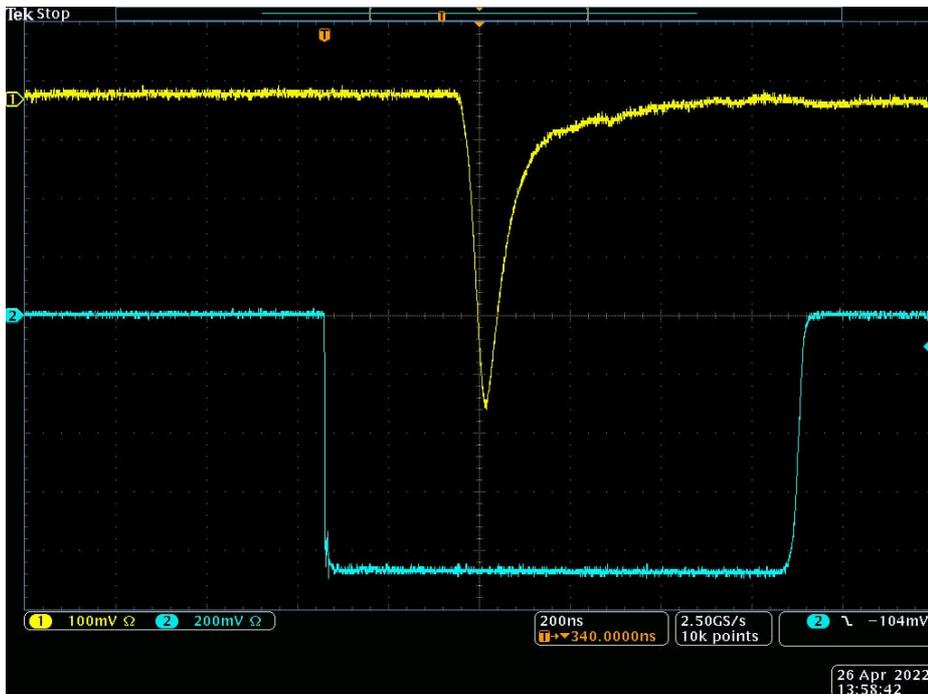


Рисунок 20. Осциллограмма сигнала от космического мюона.

4.2. Система контроля прототипа

У каждого детектора в физике есть медленно меняющиеся параметры, которые необходимо контролировать для стабильной и нормальной работы. Система медленного контроля делится на три логических уровня, каждый из которых имеет свое назначение и, соответственно, аппаратную и программную реализацию: нижний уровень — датчики и устройства ввода-вывода, средний уровень — программируемые логические контроллеры и комплексированные устройства (вакуумные посты, газовые пульта и т.п.) и верхний уровень — персональные компьютеры (ПК) и серверы с человеко-машинным интерфейсом и базами данных, связь с другими установками (ускоритель, детекторы и т.п.) и системами (система энергоснабжения, безопасности, доступа и т.п.), реализация общих алгоритмов макро-управления.

Все эти уровни объединяются в сеть с помощью полевых шин между нижним и средним уровнем, например, RS-485 с протоколом Modbus RTU, Profibus или CAN-bus с протоколом CANopen. Между средним и верхним уровнем используются шины типа Ethernet. На верхнем уровне используется специальное программное обеспечение (ПО) для диспетчеризации SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition), которое обеспечивает сбор, управление и хранение данных в реальном времени. Общая схема системы медленного контроля представлена на рис. 21.

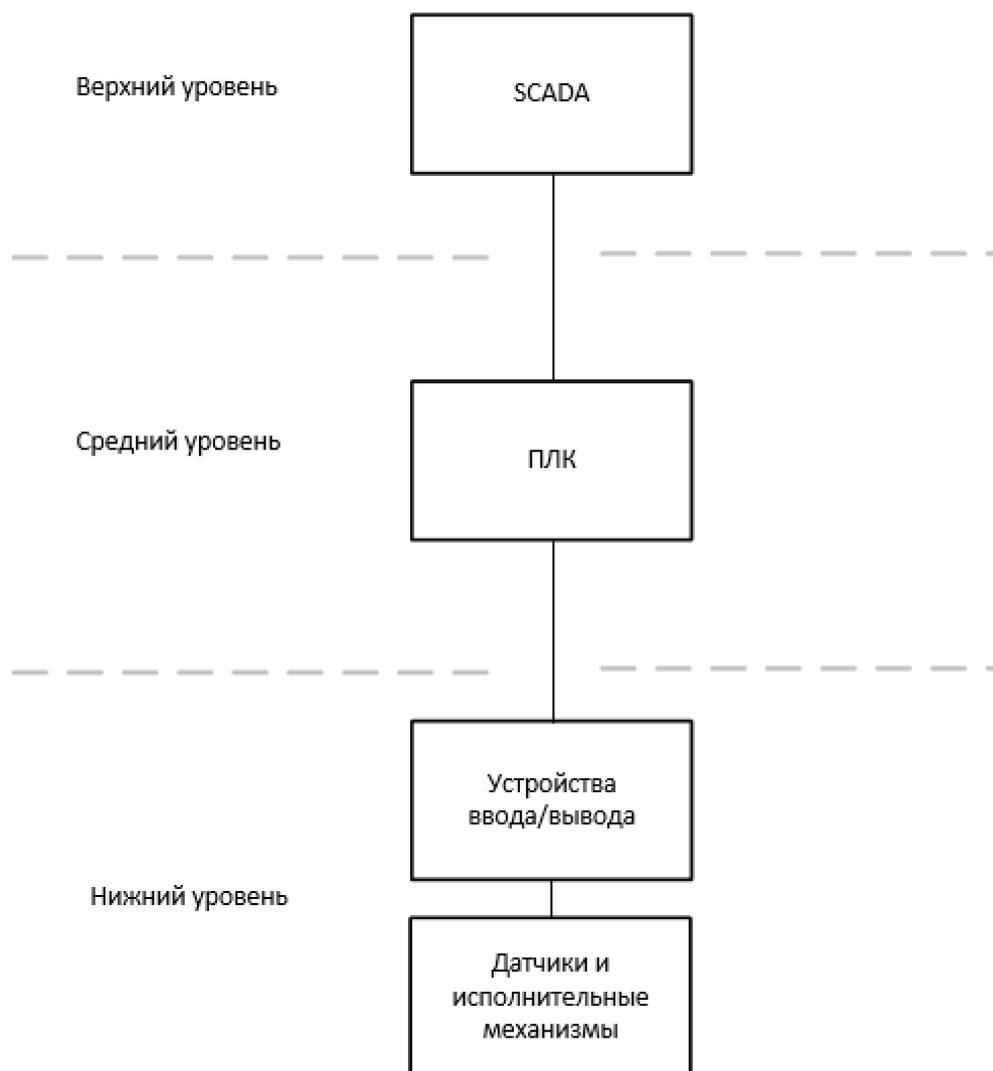


Рисунок 21. Обобщенная схема трёхуровневой системы контроля.

НИИЯФ МГУ разрабатывает систему контроля для детектора SPD. Эта система должна удовлетворять следующим требованиям: надёжность, современность, масштабируемость, консистентность данных, а также обеспечивать долговременную стабильность работы детектора. Для отработки программных и аппаратных средств было принято решение создать систему контроля для прототипа пробегной (мюонной) системы детектора SPD. В дальнейшем планируется расширить эту систему для работы с прототипом miniSPD, чтобы проверить систему контроля для остальных подсистем детектора SPD.

Медленно меняющимися параметрами прототипа мюонной системы детектора SPD являются высокое и низкое напряжение питания, давление газа в газоразрядных трубках и температура. Для разработки системы медленного контроля была выбрана классическая система из трёх уровней (рис. 22), каждый из которых имеет свое назначение и, соответственно, аппаратную и программную реализацию:

- 1) нижний уровень датчиков и исполнительных устройств. Состоит из источников высоковольтного (ВВ) питания, источников низковольтного (НВ) питания, системы контроля и управления подачей газовой смеси и системы контроля окружающей среды. Компоненты нижнего уровня объединены полевой шиной CAN с протоколом CANopen, так как она обеспечивает синхронную последовательную передачу, возможность работы в реальном времени, высокую помехоустойчивость и надежный контроль ошибок;
- 2) средний уровень системы предназначен для сбора данных с нижнего уровня, реализации алгоритмов контроля и управления, которые не могут быть реализованы на нижнем уровне. Кроме того, на этом уровне происходит параметризация разнородных данных нижнего уровня для последующего представления оператору и упаковки в базу данных;
- 3) верхний уровень предназначен для связи со средним уровнем, реализации интерфейса оператора и поддержания работы базы данных, в которой хранятся настройки и измеренные значения параметров, подлежащих контролю. Интерфейс между средним и верхним уровнем – Ethernet.

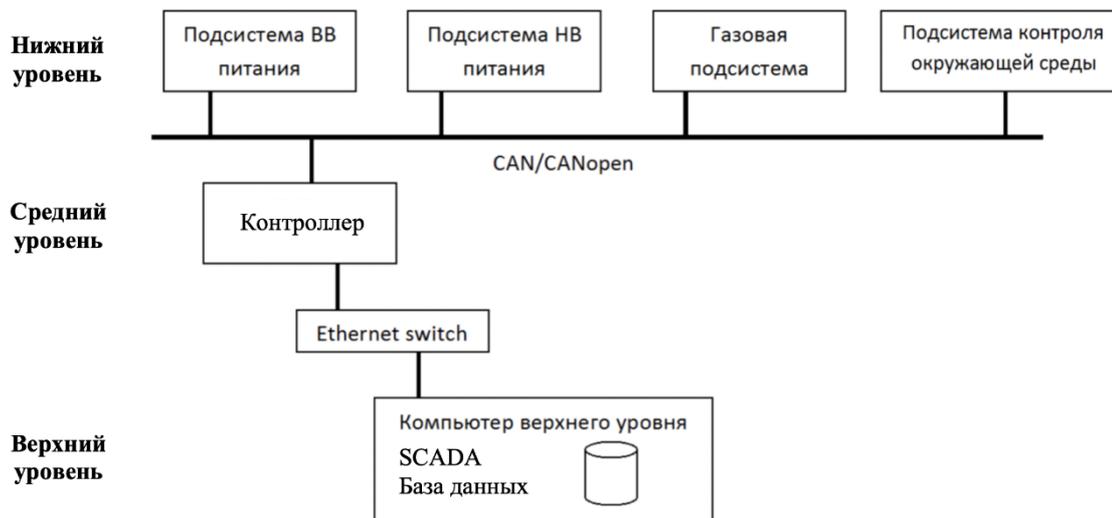


Рисунок 22. Структурная схема системы медленного контроля прототипа мюонной системы.

В качестве системы верхнего уровня была выбрана система WinCC OA. [18] WinCC OA является коммерческой SCADA-системой, представляет своего рода конструктор, который позволяет как использовать наработки разработчиков, так и придумывать и воплощать собственные решения на языке C. Активно используется в экспериментах CERN на LHC, например, в детекторе LHCb [19].

Система подразумевает возможность распараллелить процессы (каждый процесс в системе называется менеджером), запустив их на разных компьютерах с разными операционными системами (ОС), которые связаны между собой по протоколу TCP.

WinCC OA имеет следующую структуру (рис. 23): главный менеджер (процесс) называется Event Manager (EV), он занимается управлением всеми остальными менеджерами, а также следит за происходящими событиями, представляет собой ядро системы также устанавливает связи между драйверами (менеджеры непосредственных устройств, с которых снимаются/передаются данные), базой данных (менеджер DB), графическим интерфейсом пользователя (менеджер UI), а также менеджерами сценариев (менеджер CTRL) и прочими.

Каждый из этих менеджеров может быть запущен на разных ПК, которые могут находиться в разных местах.



Рисунок 23. Иерархическая структурная схема WinCC OA.

Для отработки основных объектов управления пробной системы в зоне теста пучка был разработан проект газовой станции (Рис. 24), состоящей из двух дублированных источников газа (аргон и углекислый газ соответственно), двух регуляторов массового расхода газа, буферной емкости для смешивания газов в необходимых пропорциях, а также необходимых электромагнитных и механических клапанов и датчиков давления.

На примере разработанной газовой станции можно рассмотреть основные идеи системы контроля, ее структурная схема представлена на рис. 25. Слева расположены устройства нижнего уровня, датчики, клапаны, реле, исполнительные механизмы и т.п. В центре схемы находится блок среднего уровня, представленный программируемым логическим контроллером, а также преобразователями различных интерфейсов. В правой части расположен блок верхнего уровня, который представляет собой ПК с установленной SCADA-системой WinCC OA, панель локального управления, а также Ethernet-порт для

выхода в общую сеть ОИЯИ. Красным квадратом обозначены устройства, расположенные в шкафу управления. Шкаф управления газовой системой, а также стенд с датчиками и исполнительными устройствами, установленные в зоне теста пучка, показаны на рис. 26.

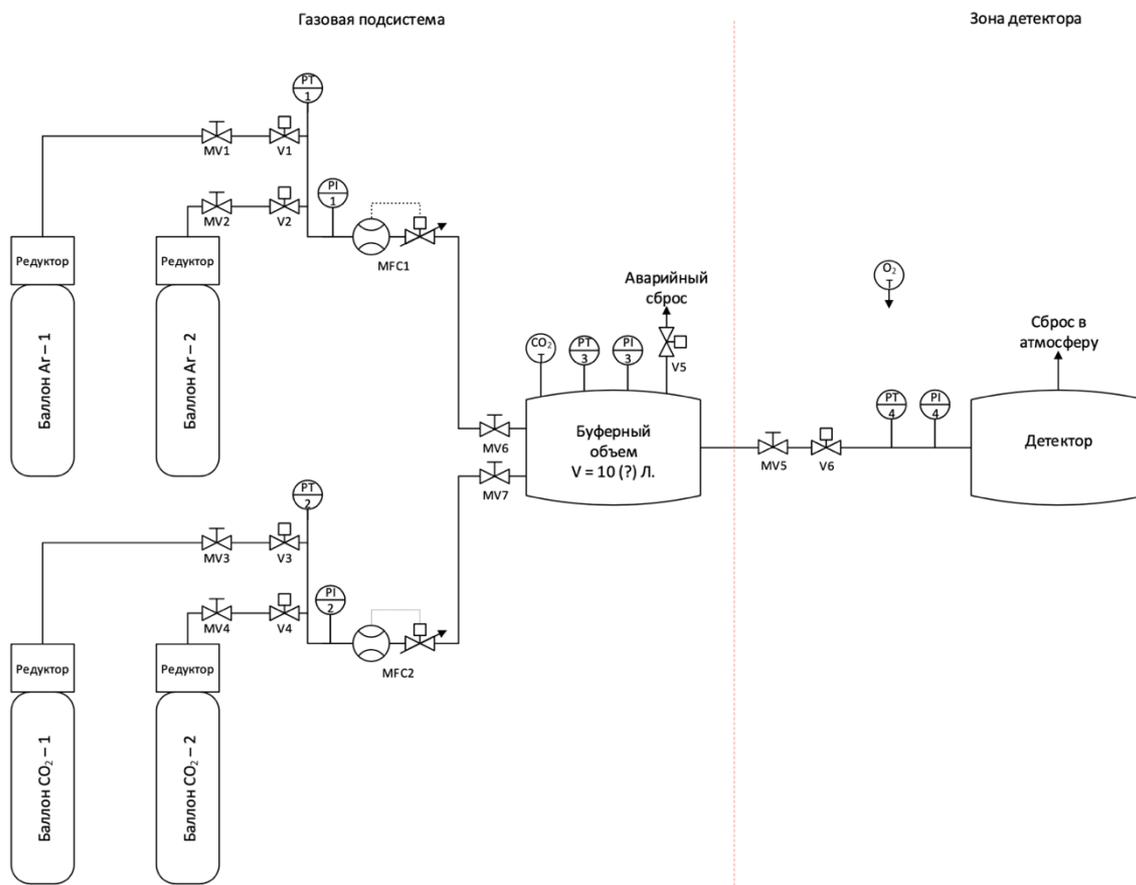


Рисунок 24. Газовая система прототипа мюонной подсистемы.

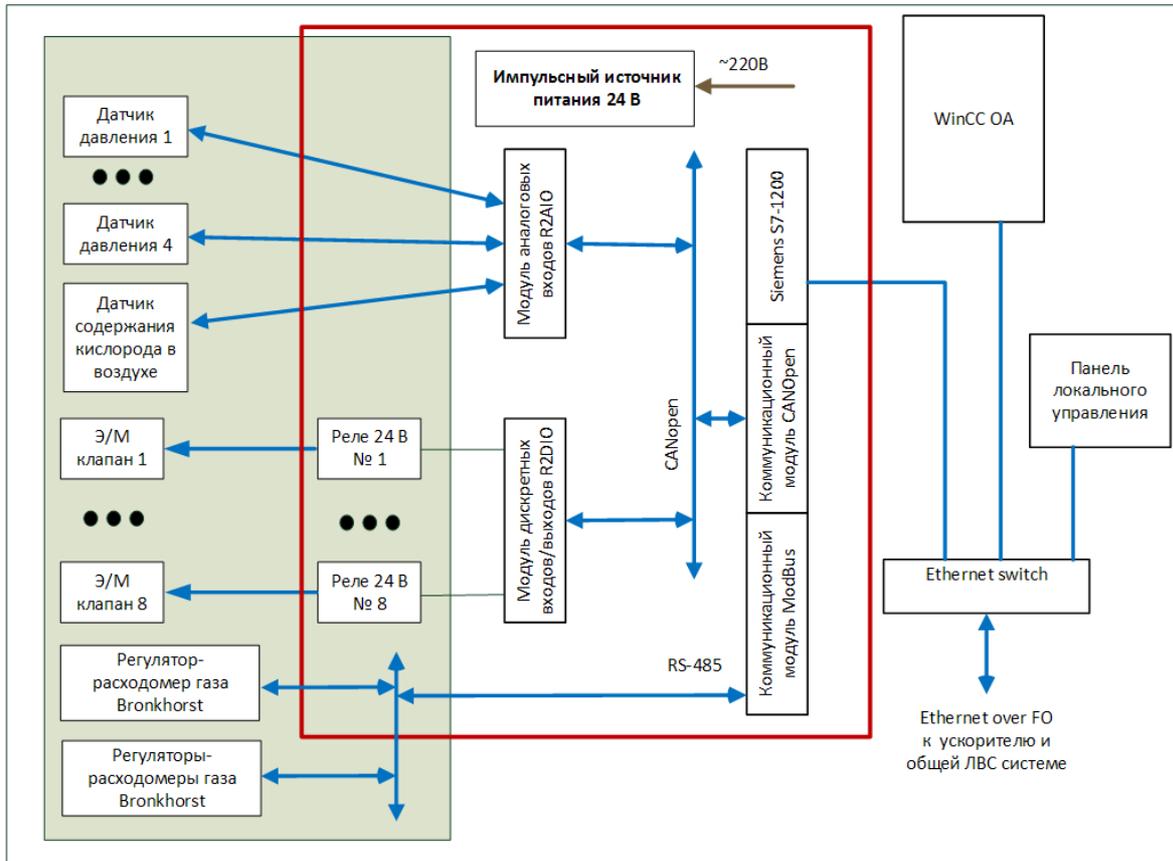


Рисунок 25. Структурная схема контроля газовой системы.



Рисунок 26. Газовая система и шкафы управления в ВТЗ.

Для контроля параметров и управления системой оператором в WinCC OA были разработаны мнемонические схемы, которые имеют в своем составе интерактивные элементы для интуитивно понятного управления. На рис. 27 представлен экран оператора для газовой подсистемы, на нем можно увидеть кнопки переключения между системами управления, мнемоническую схему, всплывающее окно с подробной информацией с датчиков давления, а также лог аварийных сообщений.

Для обеспечения наглядности при контроле работы системы у измеряемых величин задаются возможные границы изменения, выход за которые сопровождается изменением цвета фона поля вывода данного параметра и (где это необходимо) созданием аварийного сообщения. Одной из таких величин в газовой системе является давление – если параметр в пределах нормы, поле будет зеленым, если параметр приближается к заданным границам, поле становится желтым и создается предупреждающее сообщение, а если параметр вышел за пределы диапазона, цвет поля становится красным и создается аварийное сообщение. Если датчик соответствующего параметра не подключен или произошел его обрыв, цвет поля становится фиолетовым.

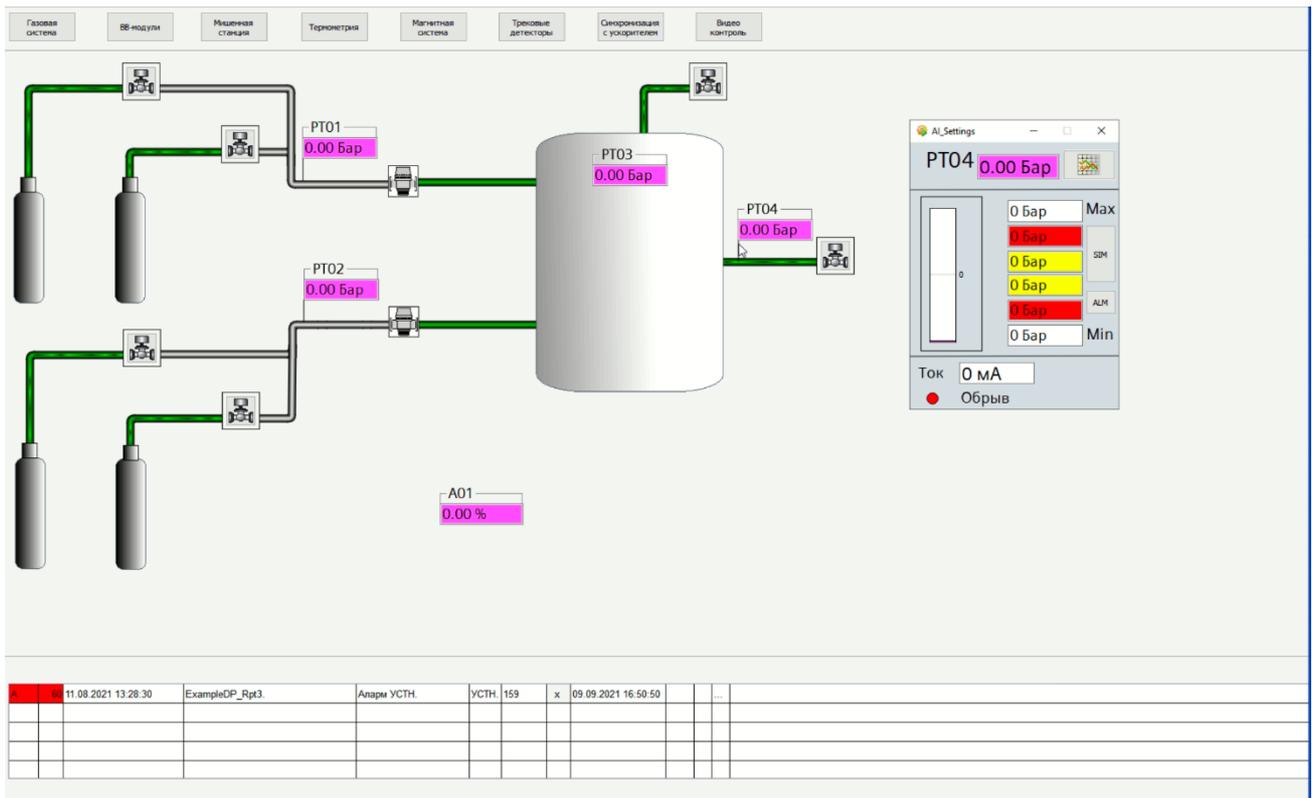


Рисунок 27. Экран управления для газовой системы прототипа мюонной подсистемы в WinCC OA.

Предложенная НИИЯФ МГУ система контроля для прототипа мюонной (пробежной) системы на базе WinCC OA является новейшей разработкой, главная задача которой – отработка технических решений для дальнейшего масштабирования до системы контроля всего детектора SPD. Подобная система является беспрецедентной для современной российской физики высоких энергий, в рамках ее создания используются все передовые технологии в сфере автоматизации и диспетчеризации, а также опыт зарубежных коллег в области систем контроля ускорительных комплексов и 4π-детекторов. Сам факт создания такой системы станет важным этапом для проектов класса мегасайенс, так как технические, инженерные и программные решения для системы контроля детектора SPD являются универсальными и удовлетворяющими всем основным принципам контроля подобных экспериментов.

Заключение

В рамках общепринятого многоступенчатого процесса разработки больших 4-п детекторов для детектора SPD был разработан прототип пробежной (мюонной) системы. Для регистрации частиц будут применяться MDT (The Mini Drift Tubes) и стриповые детекторы. Выбрана электроника первичной обработки сигналов с этих детекторов. Прототип пробежной (мюонной) системы создан и проводится его тестирование на космических мюонах.

Для создания системы управления и контроля детектора SPD была разработана общая архитектура, и были выбраны аппаратные и программные средства реализации. На примере системы управления и контроля прототипа пробежной (мюонной) системы были реализованы и опробованы основные технические и программные решения, подтверждена их эффективность и применимость.

На нижнем и среднем уровне были реализованы системы высоковольтного, низковольтного питания, система подачи и смешивания газов, а также система контроля окружающей среды, объединенные промышленной шиной CANbus с протоколом CANopen. Для верхнего уровня системы контроля прототипа мюонной системы был разработан человеко-машинный интерфейс оператора на базе ПО WinCC OA.

Разработка и внедрение системы медленного контроля для прототипа мюонной подсистемы имеют большую практическую значимость для будущей разработки системы медленного контроля непосредственно мюонной системы детектора SPD, для общей системы контроля детектора, а также для любых других будущих детекторов, которые будут разработаны в ОИЯИ и НИИЯФ МГУ.

Список литературы

- [1] Официальный сайт проекта NICA [В Интернете] <https://nica.jinr.ru/>
- [2] Heuser, J.M.: Construction, Operation and Application of the DELPHI Pixel Detector at LEP2, Dissertation at Bergische Universität-Gesamthochschule Wuppertal, WUB-DIS 99-1.
- [3] CMS Collaboration, «CMS Physics : Technical Design Report Volume 1: Detector Performance and Software», Geneva : CERN, 2006. – 521 p.
- [4] H. H. Gutbrod (Editor in Chief), I. Augustin, H. Eickhoff, K.-D. Groß, W. F. Henning, D. Krämer, and G. Walter. FAIR Project, Baseline Technical Report, Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI), Darmstadt. Technical report, 2006. ISBN: 3-9811298-0-6, EAN: 978-3-9811298-0-9
- [5] Baldin, A.M., Semenyushkin, I.N. Twenty years of the synchrotron of the JINR High-Energy Physics Laboratory. At Energy 43, 1146–1147 (1977).
- [6] А.А. Смирнов, А.Д. Коваленко. «Нуклотрон – сверхпроводящий ускоритель ядер в ЛВЭ ОИЯИ (создание, работа и развитие)», письма в ЭЧАЯ, 2004, Т.1, №6(123), с. 11-40.
- [7] «Паспорт национального проекта «Наука» на сайте Правительства РФ». [В Интернете] <http://government.ru/projects/selection/740/35565/>
- [8] Nucl.Phys.A 982 (2019) pp.1-1066 “Proceedings, 27th International Conference on Ultrarelativistic Nucleus-Nucleus Collisions (Quark Matter 2018) : Venice, Italy, May 14-19, 2018”
- [9] MPD collaboration, Conceptual and technical design of the Main Purpose Detector (MPD) at the NICA collider
- [10] Ashman, J.; Badelek, B.; Baum, G.; Beaufays, J.; Bee, C.P.; Benchouk, C.; et al. (1988). "A measurement of the spin asymmetry and determination of the structure function g_1 in deep inelastic muon-proton scattering". Physics Letters B. Elsevier BV. 206 (2): 364–370.

- [11] SPD collaboration, Conceptual and technical design of the Spin Physics Detector (SPD) at the NICA collider
- [12] V. M. Abazov, G. D. Alexeev, Yu. I. Davydov, V. L. Malyshev, V. V. Tokmenin, and A. A. Piskun. Comparative analysis of the performance characteristics of mini-drift tubes with different design. *Instruments and Experimental Techniques*, 53(3):356–361, May 2010.
- [13] V. M. Abazov et al. The Muon system of the run II D0 detector. *Nucl. Instrum. Meth.*, A552:372– 398, 2005, physics/0503151.
- [14] P. Abbon et al. The COMPASS experiment at CERN. *Nucl. Instrum. Meth.*, A577:455–518, 2007, hep-ex/0703049.
- [15] G. D. Alekseev, M. A. Baturitsky, O. V. Dvornikov, A. I. Khokhlov, V. A. Mikhailov, I. A. Odnok- loubov, and V. V. Tokmenin. The eight-channel ASIC bipolar transresistance amplifier D0M AMPL-8.3. *Nucl. Instrum. Meth.*, A462:494–505, 2001.
- [16] G.D Alexeev, M.A Baturitsky, O.V Dvornikov, V.A Mikhailov, I.A Odnokloubov, and V.V Tok- menin. The eight-channel fast comparator IC. *Nucl. Instrum. Meth.*, A423(1):157 – 162, 1999.
- [17] G. D. Alekseev, M. A. Baturitsky, O. V. Dvornikov, A. I. Khokhlov, V. A. Mikhailov, I. A. Odnok- loubov, A. A. Shishkin, V. V. Tokmenin, and S. F. Zhirikov. The D0 forward angle muon system front-end electronics design. *Nucl. Instrum. Meth.*, A473:269–282, 2001.
- [18] WinCC OA. [В Интернете] <https://www.winccoa.com>
- [19] Valerio Bocci. "A prototype of the LHCb muon detector control system" *Proceedings of 10th ICALEPCS*. Geneva, Switzerland (2005).