

**Учреждение Российской Академии Наук
Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН**

На правах рукописи

ЖУКОВ КОНСТАНТИН ИГОРЕВИЧ

**Многоканальные системы высоковольтного
питания для газовых детекторов переходного
излучения в экспериментах по физике
высоких энергий.**

01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2011

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН.

Научный руководитель: кандидат технических наук,
Канцеров Вадим Абдурахманович
Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН,
г. Москва

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
Рыкалин Владимир Иванович
Институт физики высоких энергий, г. Протвино

кандидат физико-математических наук,
Сомов Сергей Всеволодович
Национальный исследовательский ядерный
университет «МИФИ», г.Москва

Ведущая организация: Объединенный институт ядерных исследований ОИЯИ,
г. Дубна, Московской обл.

Защита состоится «___» _____ 2011 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 002.023.02 при Физическом институте им. П.Н.Лебедева РАН по адресу: 119991 г. Москва, Ленинский проспект 53, тел. (499) 135 42 64

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физического института им. П.Н.Лебедева РАН. С авторефератом диссертации можно ознакомиться на сайте www.lebedev.ru/.

Автореферат разослан «___» _____ 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 002.023.02
доктор физико-математических наук

Я.И. Истомин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Предметом диссертации являются:

1. исследование критических условий работы трекового детектора переходного излучения;
2. разработка соответствующего высоковольтного источника питания;
3. исследование опытных образцов и отработка методики тестирования многоканальной системы высоковольтного питания для трекового детектора переходного излучения (т.д.п.и.);
4. установка системы в эксперимент ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS) на Большом адронном коллайдере LHC, внедрение в единую систему контроля эксперимента.

Т.д.п.и. (трековый детектор переходного излучения или TRT) является одним из важнейших элементов внутреннего детектора (Inner Detector) в ATLAS и выполняет две функции: детектора переходного излучения и координатного детектора. Т.д.п.и. расположен вблизи точки взаимодействия пучков коллайдера и поэтому практически недоступен для обслуживания в течение всего времени эксплуатации. В связи с этим очень остро стоит проблема надежности функционирования всего детектора в целом.

Т.д.п.и. состоит из пассивного радиатора (стопки полипропиленовых фольг в торцевых частях и полиимидных волокон в центральной части) и детектирующих элементов, дрейфовых трубок, называемых straw (от англ. **straw** - соломинка). Это цилиндрические пропорциональные дрейфовые камеры диаметром 4 мм и длиной 370 мм для торцевых частей детектора и 1440 мм для центральной части. Всего таких трубок в детекторе 298 304.

Каждая straw подключается к высоковольтному источнику питания напряжением 1530 В. Количество таких трубок столь велико, что было довольно трудно обеспечить каждую отдельным источником питания. В связи с этим было предложено сгруппировать их по высоковольтному питанию, обеспечив каждую группу отдельным предохранителем, тем самым сократив количество высоковольтных каналов до 2000.

Трековый детектор переходного излучения будет выполнять свои функции при наибольшей светимости ускорителя $2 \cdot 10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Это обеспечено за счет использования самых передовых технологий в производстве детектора и обеспечения его работы. Детектор позволяет восстанавливать трек заряженной частицы, имея в среднем 36 координат частицы при пересечении трубок. В пространстве между слоями straw размещены высокоструктурированные радиаторы, обеспечивающие переходное излучение заряженных частиц при пересечении ими границ раздела сред. Фотоны

переходного излучения регистрируются дрейфовыми трубками наряду с сигналами от релятивистских частиц. Эффективная регистрация переходного излучения позволяет выделять электроны на высоком адронном фоне (режекция пионов).

Совмещение в детекторе т.д.п.и. функций измерения координат проходящей релятивистской частицы и идентификацией электронов требует высокой стабильности коэффициента газового усиления в straw. А это, в свою очередь, требует прецизионной установки и стабилизации во времени высоковольтного напряжения питания дрейфовых трубок (менее 0.1%).

Также важным требованием к высоковольтной системе питания является необходимость точной диагностики состояния straw по количеству допустимых пробоев в камере в единицу времени и своевременное быстрое отключение высоковольтной линии. Отказ в работе системы диагностики пробоев может привести к прожиганию тонкой катодной стенки трубки, утечке дорогостоящего газа Хе и выходу из строя всего детектора переходного излучения. Такого высоковольтного источника не было найдено среди существующих промышленных образцов. Подобные источники питания не соответствовали тем или иным требованиям т.д.п.и.

В связи с этим была разработана, изготовлена и установлена в эксперимент новая многоканальная высоковольтная система питания.

Цель диссертационной работы

- Определение критических условий работы straw в реальном эксперименте на коллайдере. Анализ возможностей современных промышленных источников питания с целью использования их в т.д.п.и. для надежной идентификации электронов.
- Исследование характеристик straw с целью определения требований к высоковольтному источнику питания.
- Разработка требований и изготовление нового источника высоковольтного питания, удовлетворяющего специфическим требованиям трекового детектора и обеспечивающего высоковольтным питанием ~ 2000 каналов т.д.п.и.
- Разработка методики тестирования и калибровки каждого канала системы высоковольтного питания.

Научная новизна и практическая ценность работы

1. Исследованы критические режимы работы трекового детектора переходного излучения.
2. Определение набора требований к источнику высоковольтного питания, на основании которого изготовлен новый высоковольтный источник питания, обеспечивающий работу т.д.п.и. в критических условиях на ускорителе LHC.

3. Разработана методика тестирования уникальной многоканальной системы высоковольтного питания.
4. Предложена оригинальная схема подачи высокого напряжения на дрейфовые трубки, обеспечивающая компромисс между общим количеством каналов высоковольтного питания и минимальным количеством отключаемых трубок, в случае обнаружения дефектной straw.
5. Разработана методика калибровки каждого канала высоковольтной системы питания, обеспечивающая необходимую точность установки и измерения выходных параметров (напряжения и тока) каналов питания.
6. В результате разработки нового высоковольтного источника питания и методик его тестирования, а также калибровки, получена уникальная, высоконадежная и недорогая система высоковольтного питания, обеспечивающая необходимую стабильность напряжения для идентификации электронов. Система уже более четырех лет работает в реальных условиях эксперимента. За это время не было ни одного серьезного отказа в ее работе.
7. Результаты этой работы могут быть использованы в физических экспериментах на ускорителях заряженных частиц и космофизических экспериментах.

Основные результаты, представленные к защите

Основными результатами, представленными к защите, являются:

- Результаты исследований критических режимов работы straw в детекторе т.д.п.и.
- Разработка структуры и организация многоканальных систем высоковольтного питания с числом каналов питания порядка 2000 и количеством питаемых элементов порядка 300 000.
- Разработка уникальной высоковольтной системы питания трекового детектора переходного излучения в эксперименте ATLAS, обеспечивающей высокую надежность работы straw и стабильную режекцию пионов.
- Разработка методики исследования, тестирования и калибровки высоковольтных источников питания для физики высоких энергий.

Количество публикаций в реферируемых журналах: 3

1. Система высоковольтного питания трекового детектора переходного излучения эксперимента ATLAS. К.И.Жуков, [др.]. Приборы и техника эксперимента. -2009.-No.5.-с.66-71.-Библиогр.:8.
2. Приборы для обнаружения электрических пробоев в пропорциональных дрейфовых камерах трекового детектора переходного излучения эксперимента ATLAS. К.И.Жуков, [др.]. Приборы и техника эксперимента. Поступила в редакцию 07.04.2010 г.

3. Трековый детектор переходного излучения эксперимента ATLAS. Е.Абат, К.И.Жуков, [др.]. Приборы и техника эксперимента. -2011 год, в печати.

Апробация работы

Основные результаты и выводы, содержащиеся в диссертации, докладывались и обсуждались на рабочих совещаниях коллаборации ATLAS, научных конференциях и сессиях по физике элементарных частиц в России, а также международных конференциях.

Публикации

Сущность и новизна исследований, выполненных по теме данной диссертации, изложены в статьях, опубликованных в журналах «Приборы и техника эксперимента», Journal of Instrumentation, в трудах российских и международных конференций по физике элементарных частиц. Всего по теме диссертации опубликовано 7 работ, из них 3 – в реферируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, а также приложения и основных результатов и выводов.

Диссертация содержит 120 страниц, включая 63 рисунков, 4 таблицы и список цитируемой литературы из 30 ссылок.

Личный вклад автора

При непосредственном активном участии автора были проведены исследования критических режимов работы трекового детектора переходного излучения, проведен анализ промышленных высоковольтных источников питания на предмет использования их в т.д.п.и. детекторе, предложена новая многоканальная система высоковольтного питания в соответствии с требованиями эксперимента. Автор участвовал в разработке методик тестирования и калибровки всей системы в целом и каждого канала в отдельности перед установкой детектора в шахту эксперимента. Непосредственно автором разработаны стенды для тестирования работы системы внутреннего отключения высоковольтного источника питания, изготовлен имитатор пробоев в трубках детектора. Изготовлены устройства для пережигания специальных предохранителей в линиях высоковольтного питания детектора для исключения из работы дефектных straw. Разработаны методики тестирования и калибровки высоковольтных каналов питания детектора. Автором была проведена калибровка всех 2205 каналов питания (включая запасные).

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность выполненных исследований, сформулирована цель диссертационной работы, показана научная новизна работы и описана структура диссертации.

Первая глава содержит краткое описание основных физических задач, поставленных перед физиками в экспериментах на Большом адронном коллайдере, и описание основных его установок ALICE, ATLAS, CMS, LHCb и TOTEM. Установки используются для изучения протон-протонных соударений при энергиях сталкивающихся пучков 7 ТэВ. Эксперименты помогут ученым больше узнать об основных силах, сформировавших нашу Вселенную и затем определяющих ее судьбу. Среди целей экспериментов можно выделить такие, как изучение природы массы вещества, открытие дополнительных измерений пространства, объединение фундаментальных сил природы и наличие частиц темной материи во Вселенной.

Здесь же представлено описание установки ATLAS с целью определения роли и места т.д.п.и. детектора в установке и в эксперименте в целом.

Эксперимент ATLAS состоит из четырех составных частей:

1. Внутренний детектор (Inner Detector, ID) – измеряет траектории каждой заряженной частицы и обеспечивает идентификацию электронов. Он состоит из пиксельного детектора, полупроводникового трекового детектора (SCT, semiconductor tracker) и трекового детектора переходного излучения (т.д.п.и. или TRT, transition radiation tracker).

2. Калориметры, состоящие из жидко-аргонового электро-магнитного калориметра ЭМ LAr (Liquid Argon), окружающего внутренний детектор, и адронных калориметров, включающих в себя три части: жидко-аргоновый Endcap калориметр HEC, находящийся с торцов ЭМ калориметра, так называемый Forward калориметр FCal (также на жидком аргоне) и Tile калориметр, окружающий ЭМ LAr.

3. Мюонный спектрометр, включающий в себя четыре различных вида детекторов: MDT-детектор (Monitoring Drift Tubes – мониторируемые дрейфовые трубки) и CSC (Cathode Strip Chambers – катодные полосковые камеры) – для высокоточного определения траектории, RPC (Resistive Plate Chambers – резистивные камеры) и TGC-детекторы (Thin Gap Chambers – камеры с тонкими зазорами) – используются в качестве триггера.

4. Магнитная система, состоящая из двух частей: цилиндрический соленоид вокруг внутреннего детектора и ЭМ жидко-аргонового калориметра и тороидальный сверхпроводящий торцевой магнит, обеспечивающие магнитное поле 2-8 Тл.

Далее приведены основные характеристики трехуровневой триггерной системы отбора полезных событий. От частоты пересечения сгустков на LHC в 40 MHz путем отбора полезных событий необходимо перейти к частоте событий 100 Гц, которую система сбора данных способна записать.

Первый уровень триггера (LVL 1) работает с информацией от калориметра и мюонных детекторов. Время принятия решения – около 2 мкс.

Второй уровень триггера (LVL 2) отбирает события, используя полную информацию с ячеек всех детекторов, включая внутренний детектор с т.д.п.и. Время принятия решения – около 10 мкс.

Третий уровень работает с использованием процессорных ферм для данных полного события. Количество данных при ожидаемых 10^9 событиях в год с эквивалентным объемом одного события 1 Мб потребует свыше 1 Петабайта (10^{15} байт) ежегодно.

Вторая глава посвящена трековому детектору переходного излучения. Т.д.п.и., являющийся важнейшей частью Внутреннего детектора (см. рис.1), окружает пиксельный детектор, расположенный ближе всего к оси пучка, и полупроводниковый трековый детектор с его слоями кремниевых полосок-сенсоров.

Т.д.п.и. – это крупномасштабный газовый детектор, обеспечивающий выделение электронов на высоком адронном фоне с возможностью традиционного восстановления треков заряженных частиц (до 36 точек на трек). Современные материалы позволяют ему работать в условиях высокого радиационного фона при максимальной светимости ускорителя $2 \cdot 10^{34} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$. Полная ожидаемая радиационная доза при переводе в ионизационный ток – 0,15 мкА/см и равна ~ 10 Кл/см суммарного заряда на проволочку.

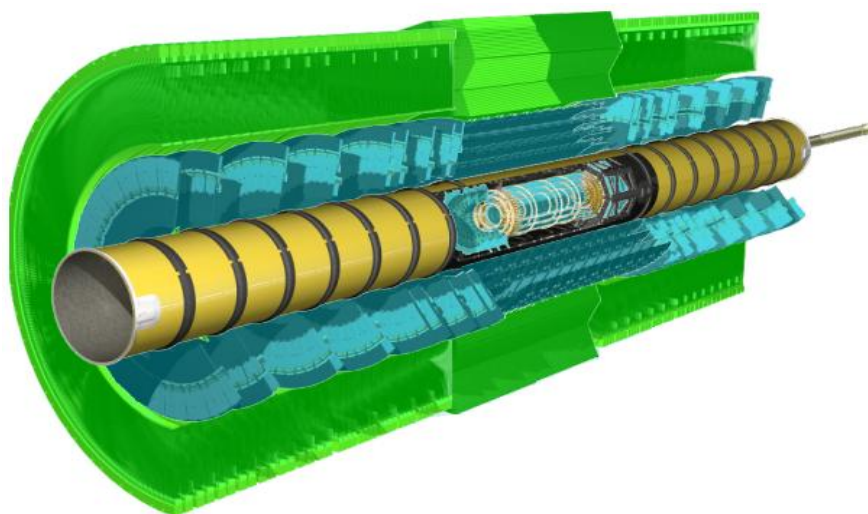


Рис.1 Общий вид внутреннего детектора

Временной анализ электронного сигнала straw позволяет определить расстояние от трека частицы до анода (рис.2). Чем ближе к аноду проходит частица, тем меньше время прихода сигнала с трубки относительно триггерного сигнала. Среднее время сбора заряда электронов составляет ~ 48 нс. Электроника обеспечивает пространственное разрешение 130 мкм. Сигнал от ионизационных потерь частицы регистрируется при низком пороге энерговыведения в т.д.п.и. $\sim 2,5$ кэВ. Для регистрации фотонов переходного излучения используется высокий порог 6-7 кэВ, см. рис.2.

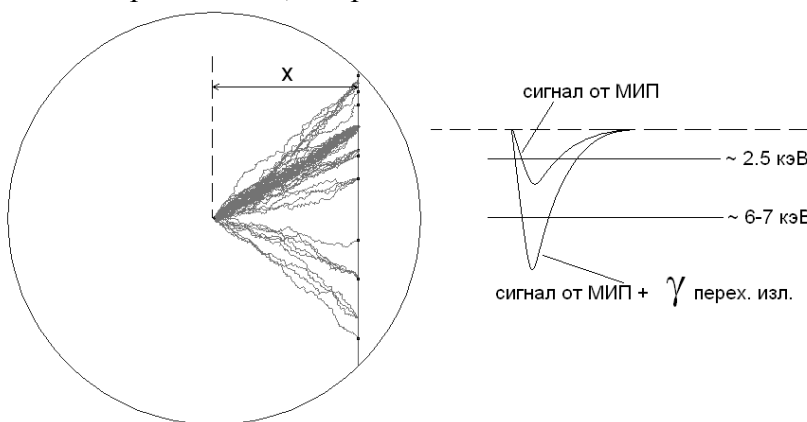


Рис.2 Схема прохождения заряженной частицы через straw. Расстояние x координаты внутри трубки определяется временем прихода относительно триггера сигнала с низким порогом регистрации.

Наведенная радиоактивность конструктивных материалов и Хе затрудняет доступ и техническое обслуживание TRT-детектора. С другой стороны, для эффективной режекции пионов от электронов необходимо обеспечить стабильность коэффициента газового усиления ($dG=10\%$, при $G=5 \cdot 10^5$ для смеси Хе- CO_2 - O_2 70/27/3%) за время проведения всего эксперимента. Это предъявляет особые требования к т.д.п.и., в том числе и к разработке системы высоковольтного питания детектора.

TRT выполняет две функции: идентификацию электронов и участвует в определении координат треков. Идентификация электронов происходит в основном в электромагнитном калориметре, который обеспечивает режекцию на уровне 10^{-3} , однако при участии TRT этот показатель можно улучшить примерно в 50 раз. Основной функцией детектора является все-таки получение координат треков заряженных частиц. Распознавание треков в области, близкой к точке взаимодействия пучков, - нетривиальная задача ввиду большой плотности частиц. Однако при участии силиконовых полупроводниковых детекторов, которые дают вершины треков, TRT обеспечивает надежную реконструкцию треков с пространственной точностью около 150 мкм на радиусах от 1 до 2 м от точки взаимодействия.

Далее излагается принцип работы детектора переходного излучения, его координатное разрешение (предельное 130 мкм) и возможность идентификации электронов в области энергий 1-100 ГэВ для отделения их от пионов. Дискриминатор с

высоким порогом на 6-7 кэВ оптимизирован для разделения электронов и пионов. Выделение энергии в т.д.п.и. является суммой ионизационных потерь заряженной частицы (2.5 кэВ в среднем) и поглощения фотонов переходного излучения (> 5 кэВ) (см. рис.3).

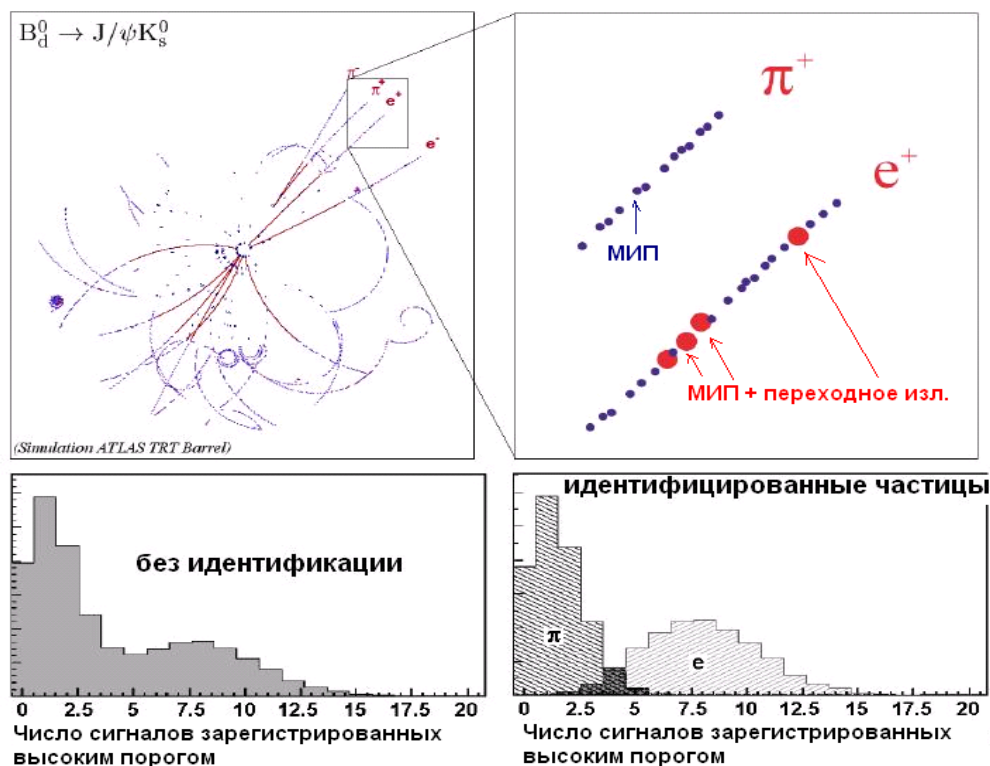


Рис.3 Иллюстрация событий от электрон-позитронного и пионного трека (моделирование). Большие красные точки указывают на срабатывания straw от конвертации фотонов переходного излучения на треке, маленькие синие точки – от минимально ионизирующих частиц. Внизу показано разделение пионов и электронов.

Далее подробно рассматривается цилиндрическая дрейфовая трубка, являющаяся детектирующим элементом TRT-детектора, ее конструктивные (рис.4) и технологические особенности, достоинства и недостатки. Рабочим газом является смесь Xe-CO₂-O₂ (в пропорции 70%-27%-3%), обеспечивающая поглощение γ -кванта и образование кластера электронов, регистрируемого в straw.

Выбор газовой смеси на основе Хе при длительной эксплуатации детектора в условиях высокого радиационного фона требует циркуляционной системы подачи газа и, соответственно, непрерывной его очистки. Для этого используется специально разработанная газовая система.

Работа TRT-детектора в условиях больших потоков частиц, высокого радиационного фона приводит к необходимости охлаждения не только front-end (электроники считывания) интерфейсной электроники, но также и самих трубок. Средняя энергия,

выделяемая в straw, – около 2.5 кэВ на МИП частицу. Ионизационный ток приводит к общему рассеянию энергии около 10-20 мВт на канал на пиковой светимости ускорителя. Чтобы поддерживать характеристики детектора и сохранять установленный экспериментально градиент температуры в детекторе, необходимо охлаждение детектора. Т.д.п.и. охлаждается вентиляцией CO₂ (около 150 м³/ч). Также CO₂ выполняет функцию защиты от влаги.

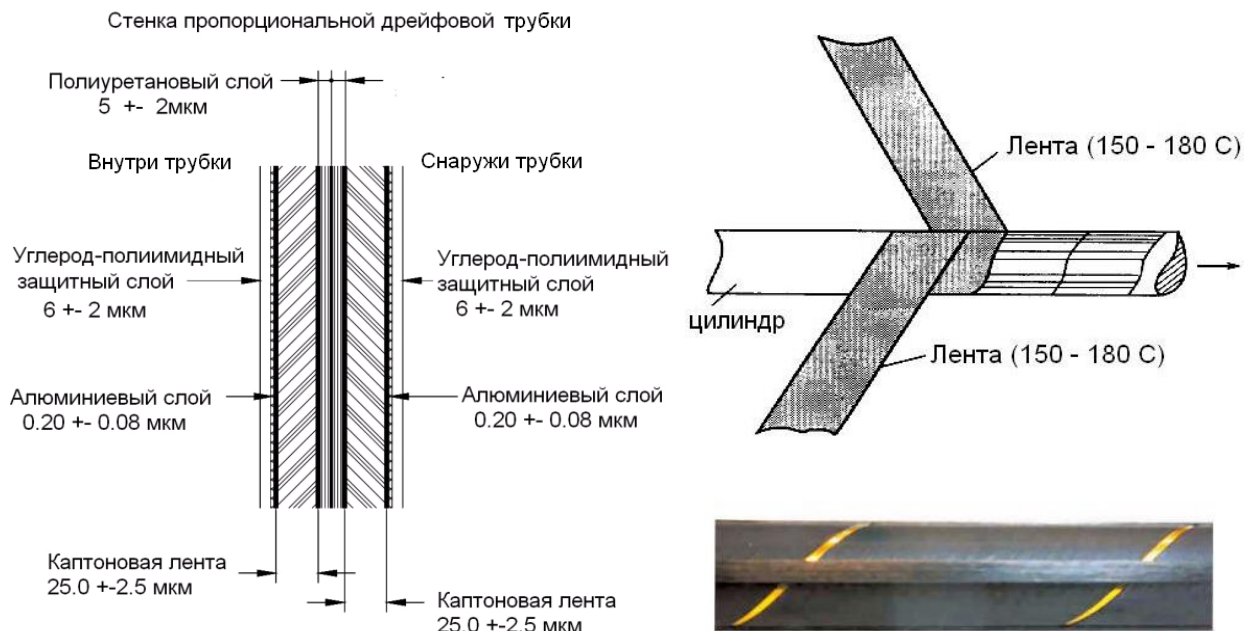


Рис.4 Многослойная лента (слева) используется для производства straw наматыванием на точный сердечник (справа сверху). Четыре углепластиков волокна снаружи трубочки обеспечивают жесткость (внизу справа).

Большое количество straw (298 304) потребовало новых решений в организации front-end электроники и системы считывания данных. В основе считывающего интерфейса лежат 8-канальный биполярный усилитель – формирователь (ASDBLR) и цифровой чип CMOS (DTMROC). Это уникальная электроника, сделанная по заказу в соответствии с требованиями TRT-детектора. Схема считывающей электроники и интерфейса баз данных в т.д.п.и. приведена на рис.5.

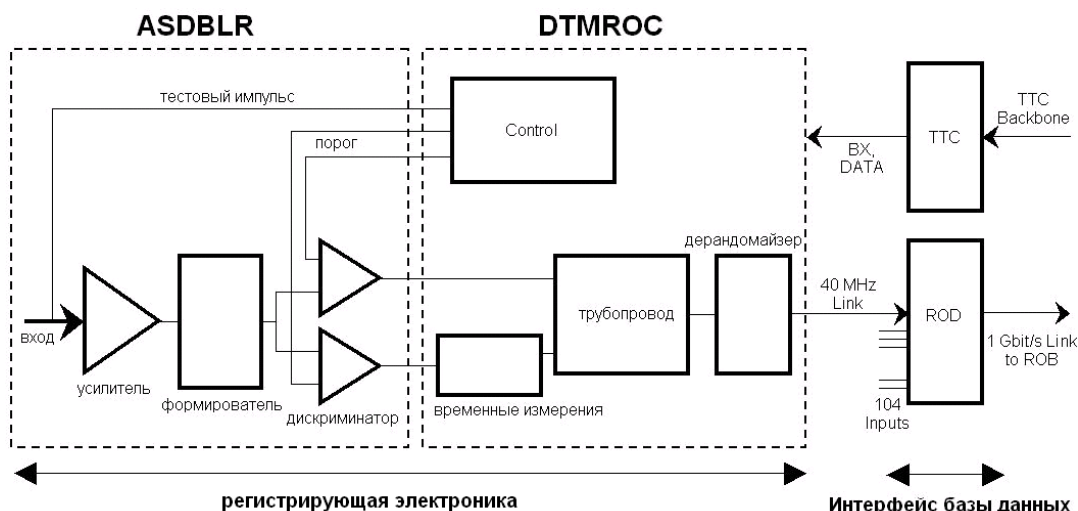


Рис.5 Схема регистрирующей электроники и интерфейса баз данных в ATLAS

Третья глава посвящена разработке и исследованию оригинальной системы высоковольтного питания для т.д.п.и. эксперимента ATLAS, обеспечивающей выполнение функции идентификации электронов, а также измерения координат треков релятивистских частиц.

Характерной особенностью трекового детектора переходного излучения является практически абсолютная недоступность его обслуживания, так как т.д.п.и. представляет собой внутреннюю часть установки (Inner Detector). При этом коэффициент газового усиления должен быть стабильным во времени (см. рис. 6).

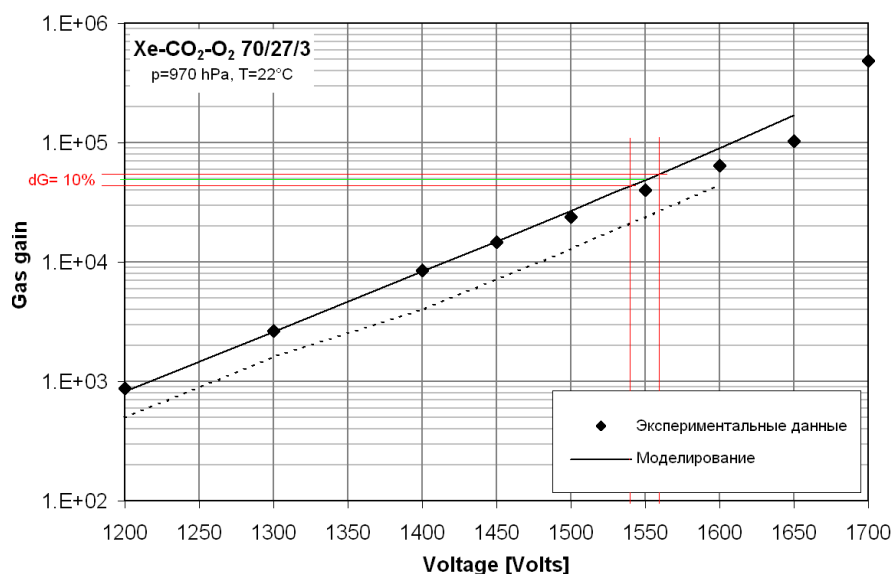


Рис.6 Зависимость коэффициента газового усиления от напряжения на straw. Рабочее напряжени 1530 В. Газовая смесь Xe-CO₂-O₂. Из экспериментальных данных и симуляции dU<=10В при коэффициента газового усиления 5*10⁴ и dG=10%.

Незначительное изменение высокого напряжения может привести к изменению коэффициента газового усиления и затруднить или вовсе сделать невозможной идентификацию электронов. Поэтому от высоковольтной системы питания требуется высокая надежность и стабильность.

Также в функцию высоковольтной системы питания входит исключительно важная задача диагностики состояния камер на наличие электрических пробоев и своевременное отключение высокого напряжения. Признаком неисправности straw является наличие многократных пробоев, количество которых в единицу времени превышает некоторый предел. Опасность проявления такого дефекта состоит в том, что это может привести к прогоранию тонкой стенки катода и, как следствие, к потере герметизации и утечке дорогостоящего газа Хе – основной компоненты рабочего вещества детектора.

Все вышеизложенное предъявляет специфические требования к высоковольтной системе питания. Были проведены исследования на предмет стабильности высокого напряжения во времени, стабильности калибровок во времени и определения допустимого количества пробоев, при котором straw не выходит из строя.

На первом этапе исследований в качестве источника высоковольтного питания использовался промышленный одноканальный источник питания CAEN 126. В этом источнике питания устанавливаемый порог отключения определяется средним интегральным током нагрузки. Это может быть и постоянный ток при коротком замыкании в нагрузке и средний ток от многократных пробоев в камере straw. Осциллограммы тока и напряжения, полученные в условиях пробоев в камере, приведены на рис.7.

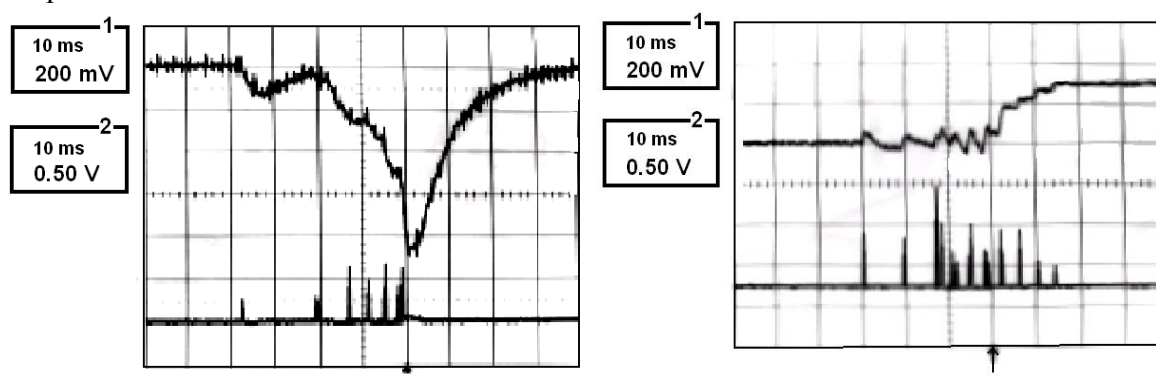


Рис.7 Слева – характерная осциллограмма изменения тока нагрузки, полученная в условиях пробоев в straw (верхний луч осциллограммы). Справа – изменение выходного напряжения при наличии пробоев в straw (верхний луч осциллограммы). Нижний луч – пробои в камере straw.

На рис.8 представлены экспериментально полученные зависимости порогового тока (I_{trip}) отключения высоковольтного источника от частоты пробоев и количества пробоев. Высоковольтное питание отключается при превышении среднего интегрального тока,

которое может возникать либо от большой частоты, либо от определенного количества микропробоев в трубке.

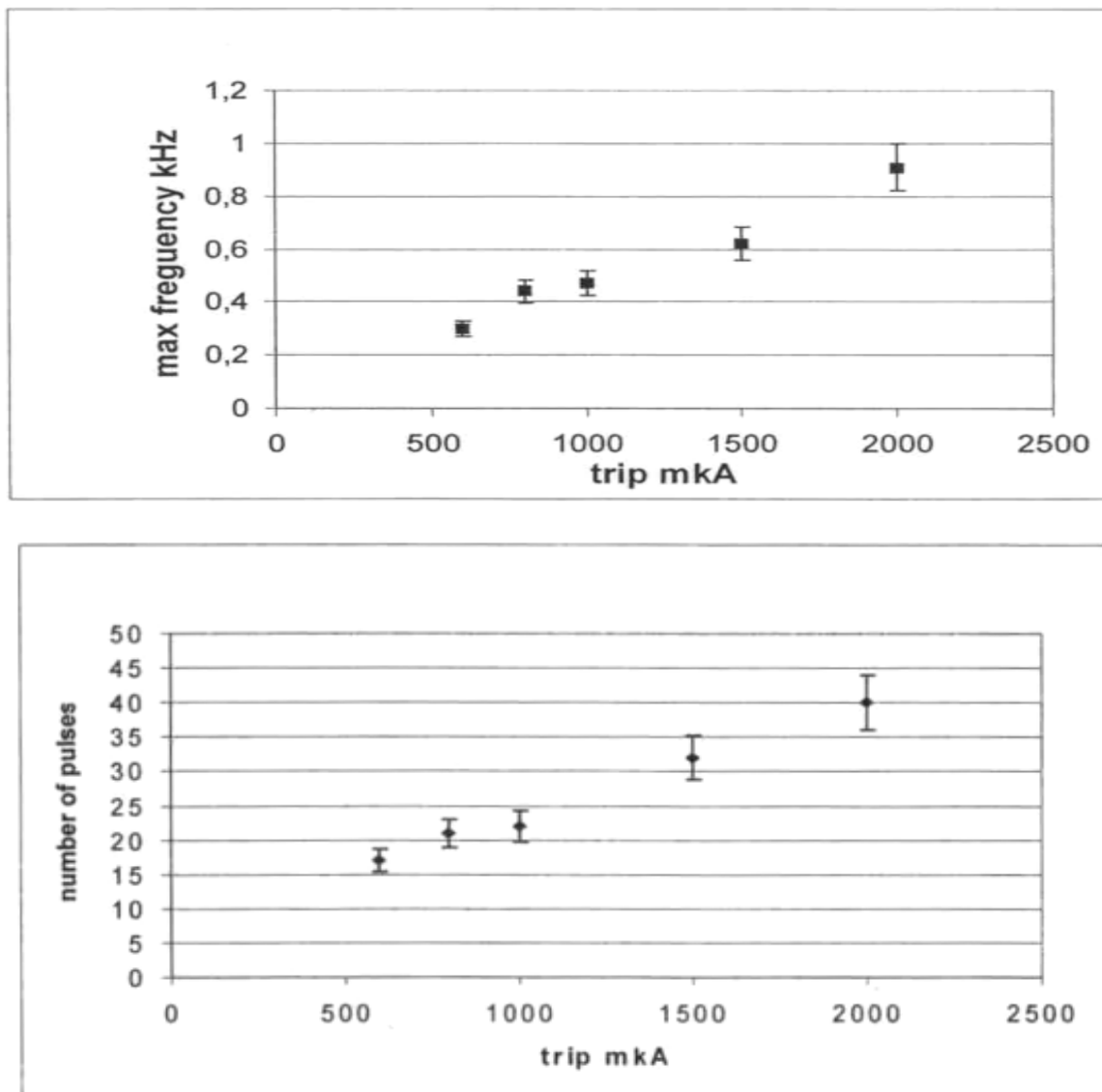


Рис.8 Представлены зависимости порогового тока (I_{trip}) отключения высоковольтного источника от частоты пробоев (сверху) и количества пробоев (внизу).

Дальнейшие исследования показали, что безопасным для работы straw является наличие серии пробоев в количестве 40 в течение 20 мс. В соответствии с этим критерием высоковольтный источник питания должен отключить высокое напряжение полностью или опустить его до безопасного уровня (т.н. StandBy, 500 В). В результате анализа возможных вариантов высоковольтного источника питания первоначально была выбрана система фирмы CAEN SY1527, укомплектованная 12-канальными модулями A1734.

Поскольку невозможно каждую из 298304 straw подключить к отдельному источнику высоковольтного питания (в основном из-за большого количества высоковольтных

кабелей), пришлось объединить трубочки детектора в группы, при этом учитывая тот факт, что при обнаружении дефектной straw можно было бы отключить вместе с ней минимальное количество трубок, состоящих в группе с дефектной.

Было принято решение объединить по высокому напряжению 192 дрейфовые трубки.

Схема подключения одного из высоковольтных каналов к дрейфовым трубкам приведена на рис.9. Такое подключение определяется структурой построения разводки высоковольтного питания к straw.

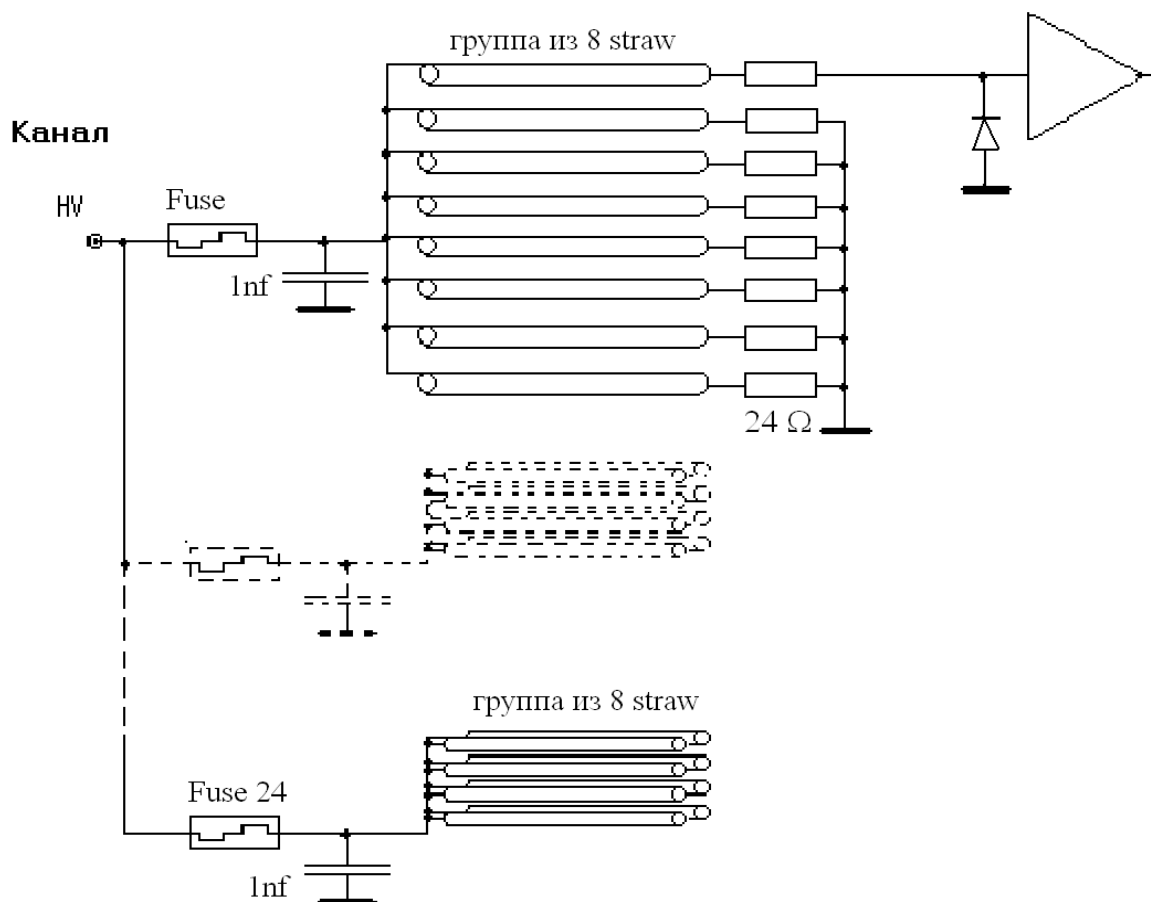


Рис.9 Схема подключения одного из высоковольтных каналов к straw

Чтобы не допустить отключения всех 192 трубок из-за одной дефектной, все straw детектора были объединены в подгруппы по 8 штук. Каждая из этих подгрупп подключается к высоковольтной линии через специально разработанный предохранитель. При обнаружении высоковольтным источником дефектной straw происходит отключение группы из 192 трубок. Затем эта линия подключается к специально разработанному источнику питания, обеспечивающему принудительное пережигание предохранителя в

соответствующей подгруппе, так как при электрических пробоях внутри трубки резко падает ее электрическое сопротивление и весь ток от источника идет через предохранитель той группы, где расположена именно эта дефектная straw.

Затем схема питания восстанавливается, но уже для группы из 185 straw (подгруппа из 8 отключена), и детектор готов к продолжению работы. При такой организации системы высоковольтного питания вместе с дефектной трубкой отключается еще 7 трубок, а не вся высоковольтная линия целиком (192 straw).

Такое решение является разумным компромиссом между количеством высоковольтных каналов, потребляемой мощностью и количеством отключаемых в случае проблем трубок.

В таблице 1 представлено распределение линий высоковольтного питания (каналов) в модулях детектора.

Таблица 1

Торцевая часть (сторона А)	
Общее число HV линий	768
Общее число straw	147456
Торцевая часть (сторона В)	
Общее число HV линий	512
Общее число straw	98304
Центральная часть	
Общее число HV линий	704
Общее число straw	52544
Общее число высоковольтных линий	1984
Общее число straw	298304

В таблице 2 представлены токи, ожидаемые в одном регистрирующем элементе (straw) для модулей разного типа в условиях работы детектора при максимальной светимости ускорителя LHC.

Таблица 2

	Кол-во straws	Кол-во линий	straw/ линия	I(mA)/straw при полной светимости	Общий I(mA)/line	I_{max}/ли нии mA
Торцевая часть (сторона А)	147456	768	192	0.0045	0.864	1.7
Торцевая часть (сторона В)	98304	512	192	0.0045	0.864	1.7
Центральная часть модуль типа 1	10528	192	55	0.02	1.1	1.7
Центральная часть модуль типа 2	16640	192	87	0.01	0.87	1.7
Центральная часть модуль типа 3	25376	320	80	0.006	0.48	1.7

В таком виде высоковольтная система питания состоит из 2000 высоковольтных каналов (линий). Максимальный ток в отдельной линии при максимальной светимости не более 1.7 мА, максимальное напряжение питания 2000 В (при рабочем 1450-1600 В), полярность отрицательная.

Одним из главных критериев пригодности высоковольтного источника питания для питания straw является надежная система защиты от пробоев (trip-логика) при указанных выше критериях (40 пробоев в течение 20 мс). Критическим являются 2-3 таких цикла, после чего тонкая стенка трубки может быть повреждена, вплоть до прогорания.

На рис.10 приведены осциллограммы сигналов изменения напряжения на катоде при разных задержках срабатывания trip-логики, отключающей высокое напряжение. Источник питания CAEN имеет фиксированные дискретные значения времени задержки dT 0; 200; 300 мс. Согласно осциллограммам при dT=0 полное отключение высокого напряжения происходит через 100 мс. Это может быть опасным для straw. Кроме того, при включении высокого напряжения возникает выброс, в два раза превышающий установленное напряжение и который, несмотря на то, что он довольно короткий (около секунды), может спровоцировать разряд в дрейфовой трубке.

Еще одним серьезным недостатком высоковольтной системы питания CAEN является высокая стоимость, связанная с большой избыточностью возможностей системы, рассчитанной на самые различные области применения.

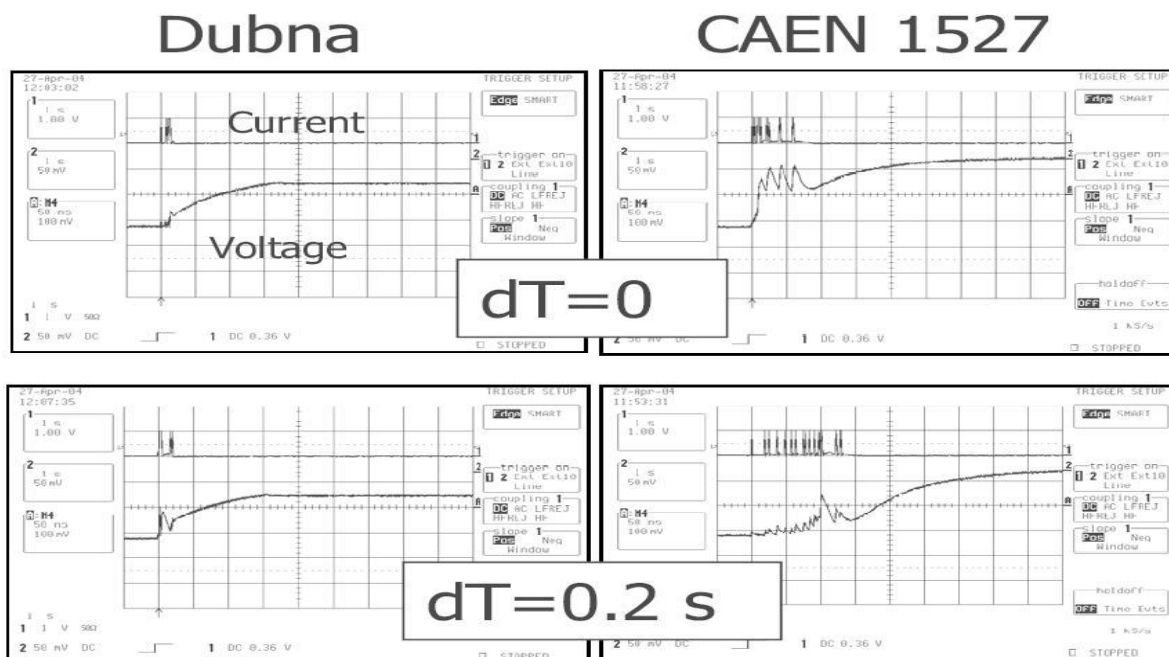


Рис.10 Осциллограммы сигналов для высоковольтных систем слева CAEN (Италия) и справа HVSys (Дубна, Россия)

Для устранения перечисленных недостатков был разработан новый источник высоковольтного питания для т.д.п.и. детектора установки ATLAS.

Совместно со специалистами ОИЯИ (компания HV Sys) была разработана и изготовлена многоканальная система высоковольтного питания для трекового детектора переходного излучения эксперимента ATLAS.

Технические требования к высоковольтному источнику для TRT-детектора ATLAS

Количество высоковольтных каналов – 2000. Каждый канал должен иметь независимый контроль и управление. Основные требования к каналу:

- | | |
|--|---------------------|
| 1. Максимальная выходная мощность | 6 Вт |
| 2. Диапазон выходных напряжений | 500–2000 В |
| 3. Полярность | отрицательная |
| 4. Точность установки выходного напряжения | 0.1% (10 бит) |
| 5. Шаг регулирования напряжения | 1.56 В |
| 6. Разброс выходного напряжения от канала к каналу | менее 1% |
| 7. Стабильность выходного напряжения | 0.1% |
| 8. Пульсация выходного напряжения | <50mVpp |
| 9. Рабочий ток на нагрузке | <1.5mA |
| 10. Предельный выходной ток | 3 мА |
| 11. Точность контроля тока и напряжения | 12 бит |
| 12. Время задержки срабатывания trip-логики | 20, 50, 100, 150 мс |
| 13. Управление источником и контроль параметров обеспечивается с помощью PC через стандартный интерфейс (RS-232, USB). | |

В соответствии с изложенными требованиями был разработан и изготовлен прототип высоковольтного источника питания, содержащий базовый (силовой) блок питания, обеспечивающий работу 420 каналов (20 модулей по 21 каналу в каждом модуле). Модули размещены в крейте Euromechanica. В опытном образце в крейте был размещен один модуль и контроллер, который через интерфейс RS232 связан с PC, управляющим работой системы. Магистраль считывания и управления в крейте – последовательная. Внешний вид опытного образца высоковольтного крейта и высоковольтный модуль на 21 канал представлены на рис.11.

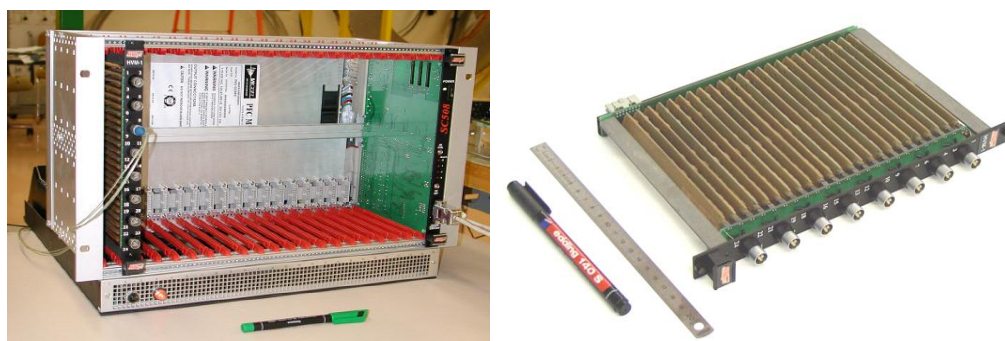


Рис.11 Опытный образец высоковольтного крейта и высоковольтный модуль на 21 канал

На первом опытном образце крейта были проведены тщательные исследования всех параметров системы. Особое внимание было обращено на систему защиты straw от пробоев.

Схема измерений при тестировании высоковольтного канала приведена на рис.12.

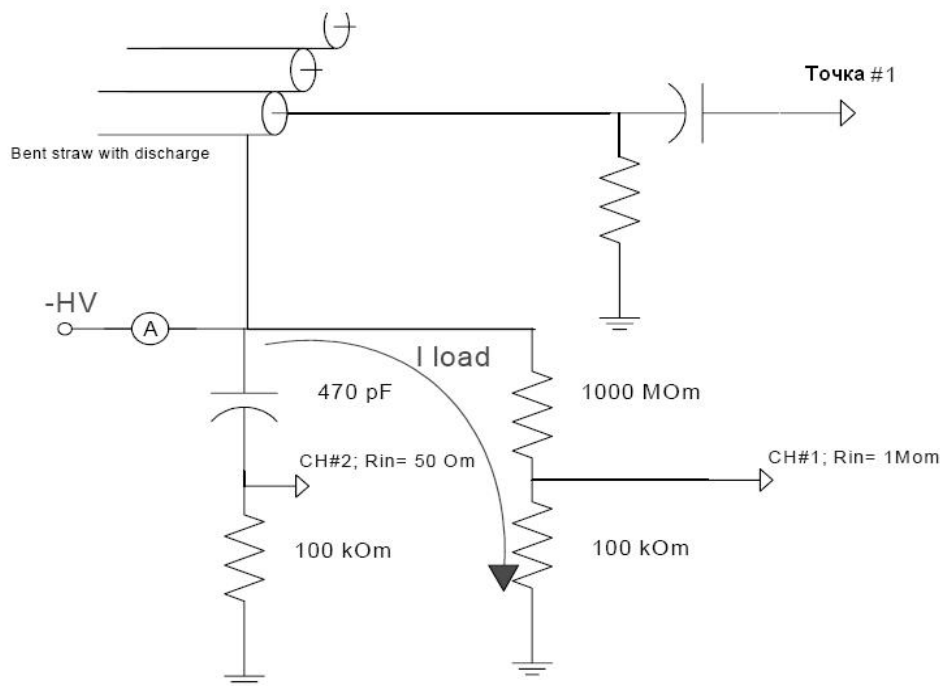


Рис. 12 Схема измерений и методика тестирования trip-логики (защиты от пробоев) была аналогична схеме при исследованиях с CAEN источником

На рис.13 представлены осциллограммы изменения напряжения высоковольтного источника питания в результате отключения высокого напряжения trip-логикой (канал 2) при различных задержках. Канал 1 - сигналы от пробоев в straw.

Следует отметить четкую зависимость задержки отключения высокого напряжения от задаваемой длительности задержки в диапазоне 0, 50 и 200 мс.

Из рис.10 видно, что вновь разработанный высоковольтный источник питания отключается раньше, чем источник фирмы CAEN (минимальные dT в CAEN 150 мс, а в Дубненском источнике – 50 мс), что является важным положительным отличием новой высоковольтной системы питания.

На рис.13 внизу справа приведена осциллограмма пульсаций в выходном напряжении высоковольтного канала питания при нагрузке 1.5 мА.

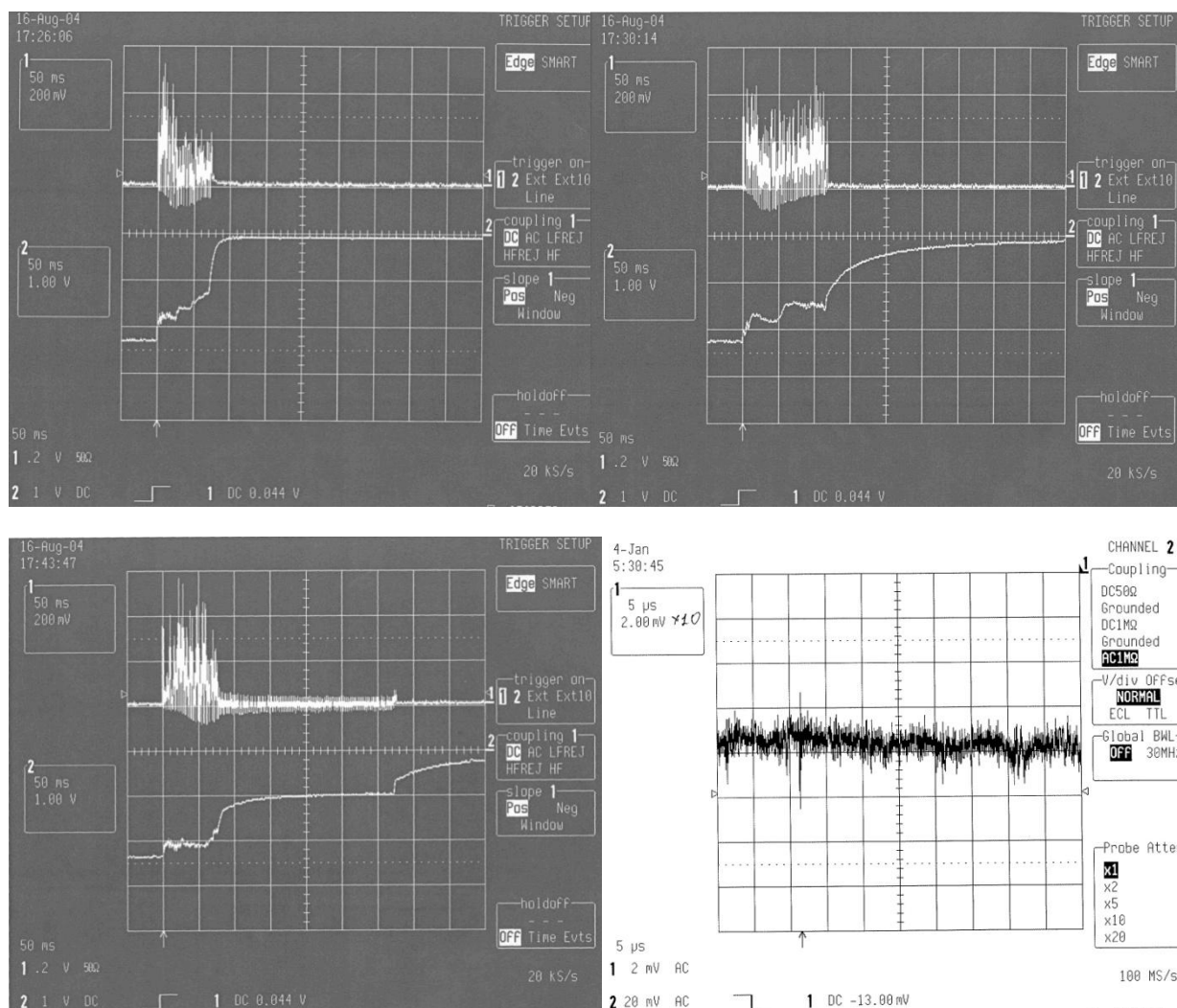


Рис.13 Напряжение 1350 В, ток отключения 3 мА. Слева сверху: задержка срабатывания trip-логики 0 мс, справа сверху – 50 мс, слева внизу – 200 мс. На осциллограмме внизу справа пульсации в выходном напряжении

В результате проведенных исследований характеристик опытного образца крейта был отмечен ряд замечаний и недоработок:

1. Напряжение U_{set} , устанавливаемое от ПК пользователем, напряжение контроля U_{top} и выходное напряжение на нагрузке U_{real} отличались более чем на 20 В, что не соответствовало требованиям ТЗ.
2. Предельный ток нагрузки каждого канала 2 мА было рекомендовано увеличить до 3 мА.
3. Начальное напряжение в канале 500 В (Stand-By) допустимо, но при включении 500 В источник дает выброс напряжения (вследствие переходного процесса), который достигает 1500 В, что недопустимо.
4. Пульсации составляли ~ 100 мВ pp, что не соответствовало требованиям. Кроме того, были выбросы напряжения на выходе с частотой ~ 100 кГц.

5. Интерфейс связи с PC RS-232 слишком медленный. Рекомендован интерфейс USB.
6. Очень трудоемкая и ненадежная методика тестирования trip-логики.

С учетом этих рекомендаций был изготовлен следующий крейт с полным составом модулей (20 в крейте) с новым силовым блоком, обеспечивающим предельный ток нагрузки в каждом канале 3 мА и с управлением через USB интерфейс.

Исследование характеристик HV крейта

При исследовании характеристик этого крейта отрабатывалась методика для массового тестирования всех последующих 6 крейтов (всего 2000 HV каналов). Для защиты от пробоев в высоковольтной системе предусмотрено отключение высокого напряжения при превышении порога по току в цепи нагрузки выше определенной величины (trip-логика). Принцип работы trip-логики представлен на рис.14. В случае возникновения пробоев (верхняя кривая) высоковольтная система переходит в режим стабилизации по току в цепи нагрузки, при этом напряжение на выходе высоковольтного источника понижается до величины, при которой ток в цепи нагрузки не превышает заданный предел (нижняя кривая). Если пробой не прекращается в течение времени ΔT , то высокое напряжение отключается до безопасной величины вплоть до нуля (на рис.13 эта безопасная величина составляет 500 В).

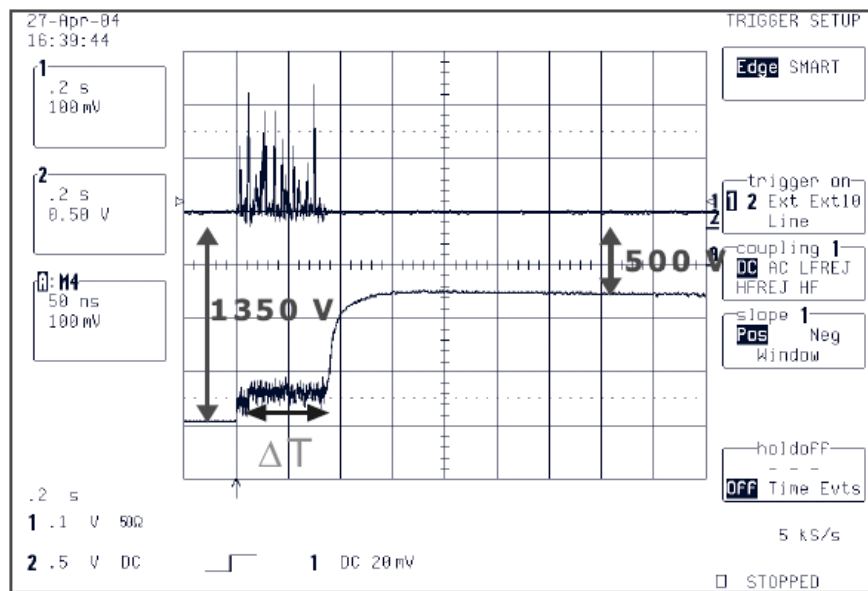


Рис.14 Демонстрация работы системы защиты от пробоев (trip-логики).

Масштаб по горизонтали 0.5 мс/клетка

Полное число выходов высоковольтной системы ATLAS TRT составляет 1984. С учетом запасных ячеек полное число высоковольтных выходов, которые необходимо проверить на предмет соответствия их функциональных параметров технической спецификации, превышает 2400. Для упрощения и ускорения процесса проверки trip-

логики была разработана электрическая схема, имитирующая электрические разряды, возникающие в цепи нагрузки высоковольтного питания. Схема имитатора приведена на рис.15.

Нажатием кнопки К запускается одновибратор, задающий длительность пачки импульсов частотой 1 кГц. Сформированная пачка импульсов (50 импульсов за 50 мс) управляет высоковольтным ключом HTS30.

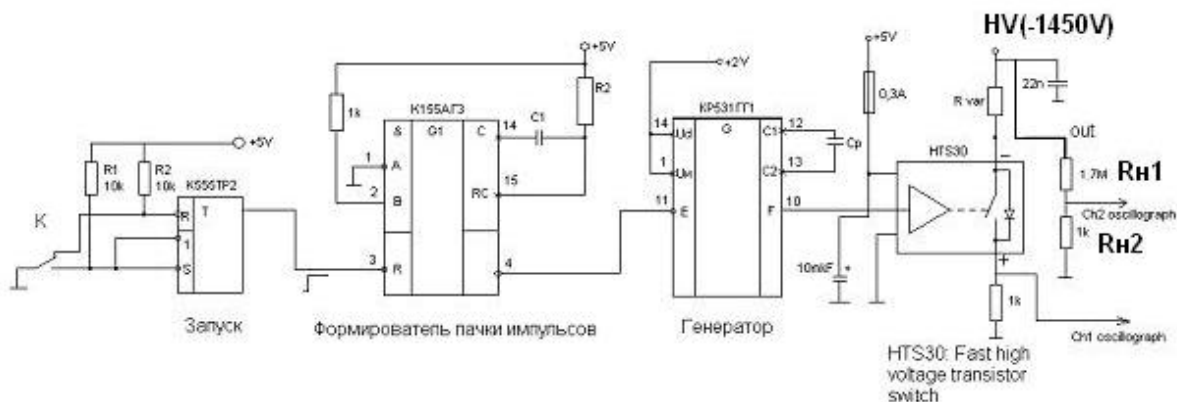


Рис.15 Схема имитатора пробоев

Методика проверки канала высоковольтного источника питания

Проверка системы управления крейтом от ПК через интерфейс USB. Программное обеспечение для согласования крейта с USB интерфейсом предоставлено разработчиком крейта.

1. Проверка работы trip-логики (системы защиты высоковольтного источника питания от пробоев в straw и короткого замыкания анода на катод). Для этого теста выход системы (один канал) подключается к схеме имитатора пробоев (рис.15). Импульсный ток пробоя задается резистором R_{var} в нагрузке высоковольтного ключа, постоянный ток нагрузки, эквивалентный току, обусловленному радиационным фоном в рабочих условиях на ускорителе, задается резисторами R_{n1} и R_{n2} (1050 мкА). Ток отключения высокого напряжения I_{trip} устанавливается 1150 мкА. В схеме задается режим, соответствующий 50 пробоям за 50 мс, превышение тока 100 мкА. Нажатием кнопки К имитируются условия, являющиеся критическими для работы. В системе управления высоким напряжением задается два режима задержки trip-логики: 50 ms и 100 ms. В первом режиме не должно происходить отключение высокого напряжения, во втором – высокое напряжение отключается.
2. В каждом высоковольтном канале измеряются и записываются параметры устанавливаемого напряжения U_{set} , мониторируемого источником напряжения U_{mon} и реального напряжения на выходе U_{real} . Напряжение U_{real} измеряется внешним цифровым вольтметром. На основе полученных результатов определяются поправочные коэффициенты, с помощью которых приводятся к

соответствию параметры U_{set} , U_{mon} и U_{real} . Эти поправочные коэффициенты вводятся в программное обеспечение, управляющее высоковольтной системой.

3. Проверка величины пульсаций на высоковольтном выходе под нагрузкой ($I_n=3$ мА) осуществляется с помощью осциллографа.

После проведенных исследований и проверок, окончательным критерием отключения высоковольтного канала при пробоях было принято наличие 50 пробоев за 40 мс.

Полученные экспериментальным путем поправочные коэффициенты могут быть использованы для коррекции U_{set} , U_{mon} и U_{real} , чтобы привести их к полному соответствию.

Кроме того, измерения U_{real} проведены для каждого канала в приближенных к эксперименту условиях путем подключения его к резистивной нагрузке, обеспечивающей ток в канале ~ 1.5 мА. Измерения проводились при 3 значениях напряжения: 1200 В, 1550 В и 1800 В.

Распределения напряжений U_{real} и U_{mon} по одному крейту при напряжении 1750 В приведены на рис.16.

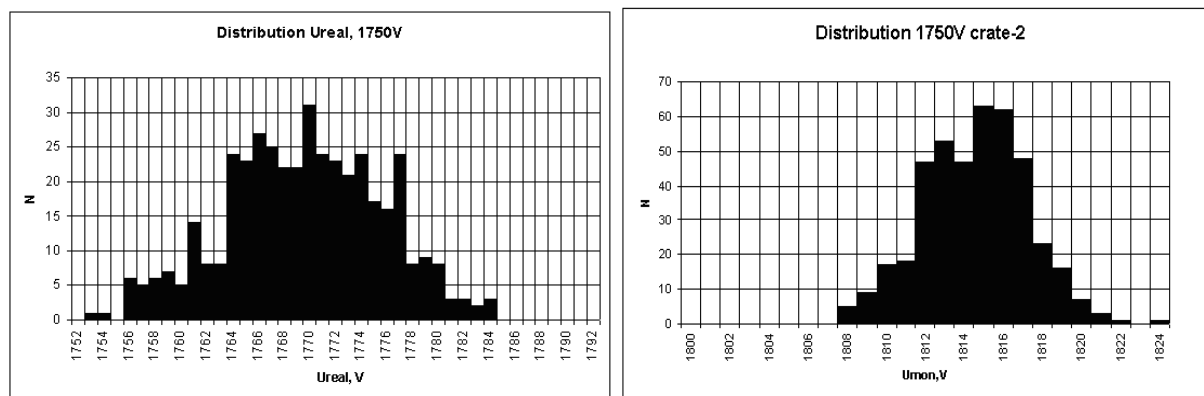


Рис.16 Распределения напряжений U_{real} и U_{mon} по одному крейту при напряжении 1750 В

Как видно из приведенных распределений (рис.16), полный разброс выходного напряжения составляет величину ± 0.8 %, что приводит к разбросу коэффициента газового усиления в пропорциональных камерах на уровне $\pm 20\%$. Чтобы уменьшить этот разброс, была проведена калибровка всех 1984 высоковольтных линий.

В результате проведенной калибровки и после введения поправочных коэффициентов для каждой высоковольтной линии, разброс значений выходных напряжений и мониторируемых величин выходного напряжения (U_{real} и U_{mon}) не превышает 0.1% (см. рис.17).

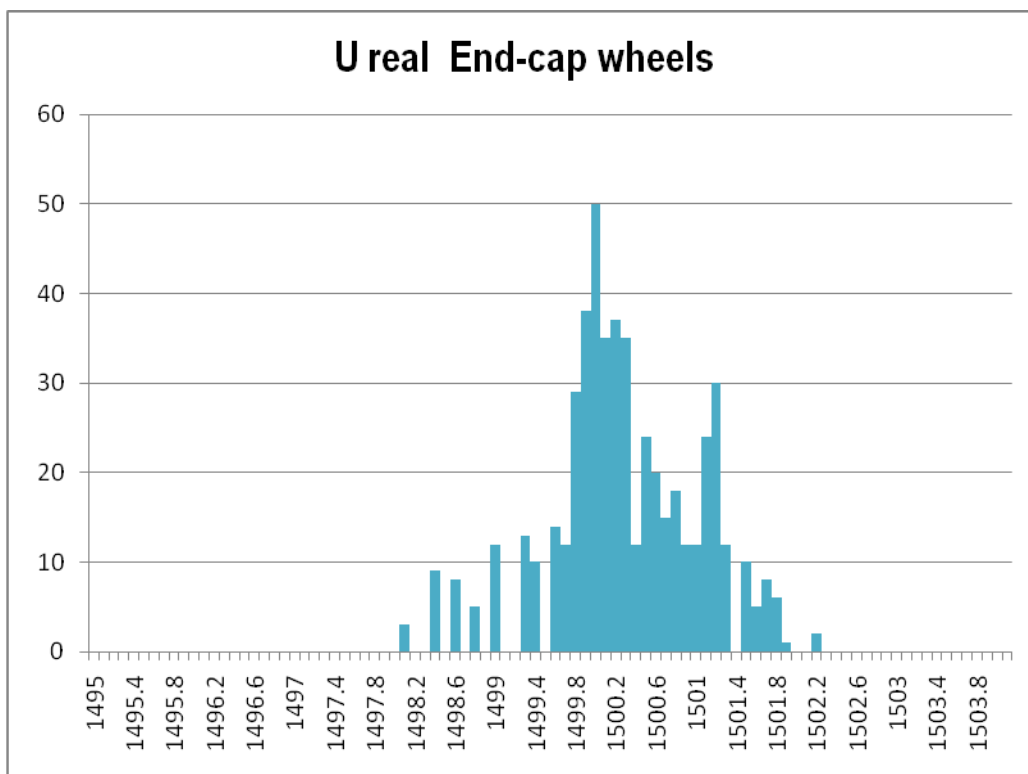


Рис.17 Распределение выходных напряжений Ureal в крейтах торцевых частей детектора после калибровки. Установленное напряжение 1500В

В четвертой главе рассматривается организация тестирования модулей End-cap перед окончательной сборкой TRT-детектора. Всего было разработано и изготовлено четыре стенда, каждый из которых обеспечивал автоматическое или полуавтоматическое тестирование следующих основных параметров модулей:

1. Проверка геометрических точностей изготовления колес детектора.
2. Проверка натяжения проволочек в камерах путем возбуждения колебаний проволочки на звуковой частоте.
3. Проверка прямолинейности трубок straw.
4. Проверка модулей на утечку газа в рабочем объеме.
5. Высоковольтные испытания на напряжении питания 1550 В в течение двух недель.
6. Изготовление приборов по поиску отдельно пробивающейся дрейфовой трубки.

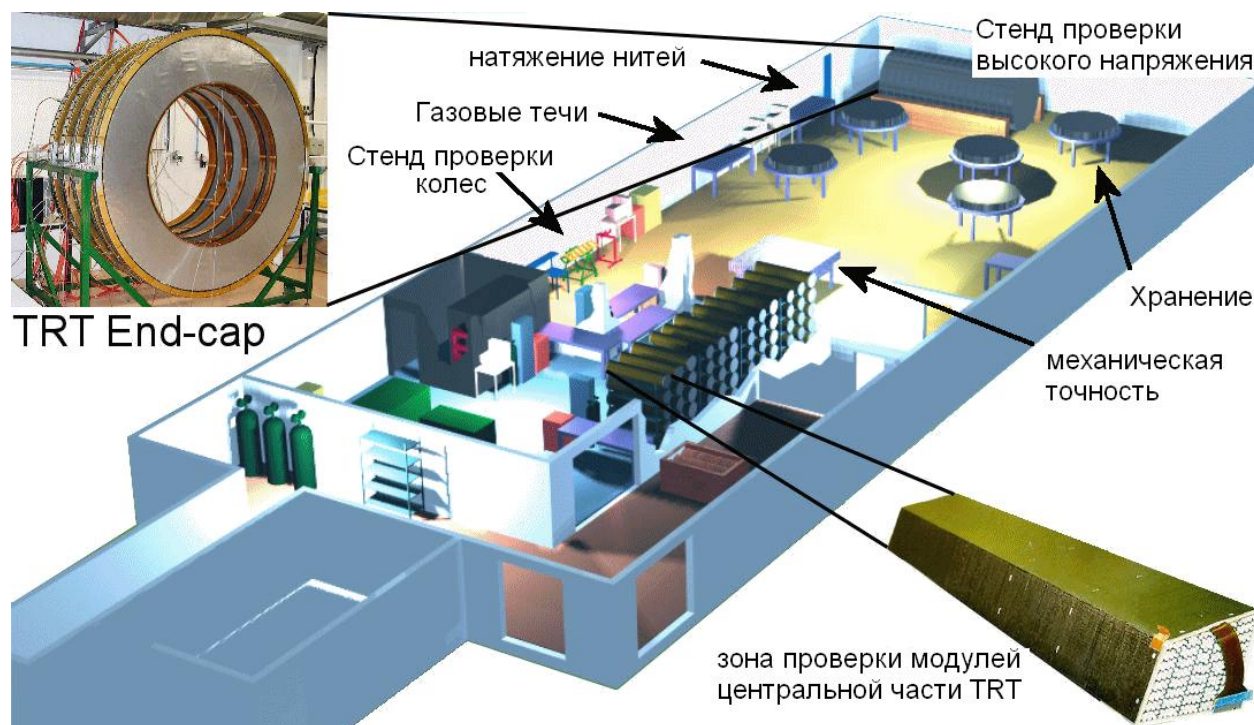


Рис. 18 Схематичное изображения помещения для сборки детектора т.д.п.и. и проведения приемки колес End-cap и модулей Barrel.

Эти проверки были организованы в чистом помещении для сборки детектора т.д.п.и., непосредственно перед ее началом. Схематичный вид помещения показан на рис. 18. Тесты включали в себя проверки на газовую герметичность колес, натяжения нитей и их эксцентриситет внутри трубок straw, их механическая прочность, точность изготовления колес и надежная изоляция по высокому напряжению.

При тестировании в системе управления высоким напряжением возникала проблема поиска отдельно пробивающейся трубки в модуле, содержащем 192 straw. Для быстрого обнаружения места пробоя (конкретной трубки) был разработан специальный тестер, который путем анализа сигналов, возникающих на анодной проволочке при пробое, позволяет локализовать место пробоя с точностью до номера straw. Такой простейший прибор позволил резко сократить время на поиск пробивающейся straw.

Аналогичный прибор был сделан и для поиска пробоев вне трубок в точках подключения высоковольтного питания к группе из 8 straw.

В **приложении** описаны процессы, протекающие в пропорциональных дрейфовых трубках. Изложены принципы движения электронов в газах и ионизация. Отдельным пунктом объясняется механизм газового усиления.

Некоторые физические результаты, полученные при помощи детектора TRT

Эксперимент ATLAS продолжается уже 5 лет. Последние три года он работает на сталкивающихся пучках ускорителя ЛHC. За время работы детектор TRT успешно участвует в работе установки. Она дает значительный вклад в идентификацию треков заряженных частиц. На рис. 19 показано пространственное разрешение трекового детектора. В среднем на каждый трек TRT дает около 30 координат, что вместе с полупроводниковыми детекторами обеспечивает хорошее распознавание треков.

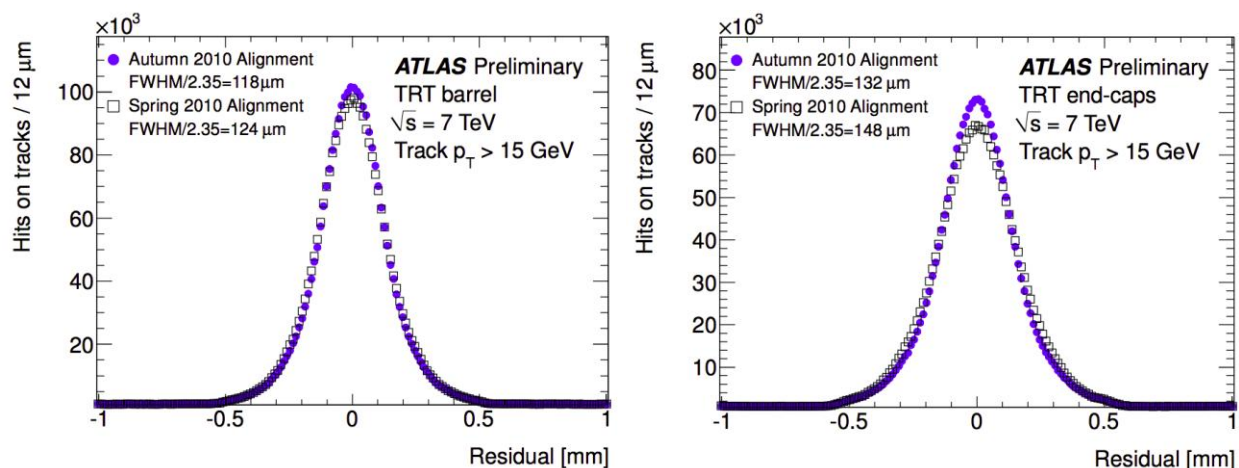


Рис. 19 Пространственное разрешение детектора TRT. Слева – для центральной части, справа- для торцевых частей. Энергия сталкивающихся пучков 3.5 ТэВ.

Как видно из приведенных распределений, координатная точность центральной части детектора составляет около 118 мкм, торцевой части – около 132 мкм.

Также детектор обеспечивает надежную идентификацию электронов. На рис. 20 показана зависимость вероятности возникновения сигналов выше порога в 7 кэВ от величины γ фактора частицы. TRT детектор обеспечивает режекцию пионов 10^{-2} при эффективности регистрации электронов 90%.

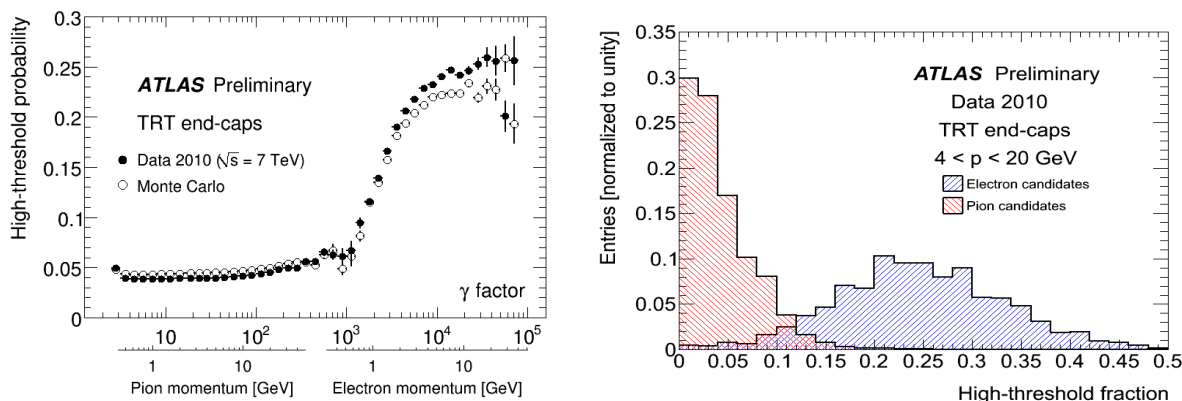


Рис. 20 Режекция электронов в детекторе TRT. Слева показана зависимость вероятности прихода сигнала, больше чем высокий порог электроники. Справа показан спектр с разделенными электронами и пионами.

Благодаря детектору TRT, установка ATLAS имеет триггер событий даже на светимости $3 \cdot 10^{33} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. На рис.21 показаны электроны от J/ψ распада.

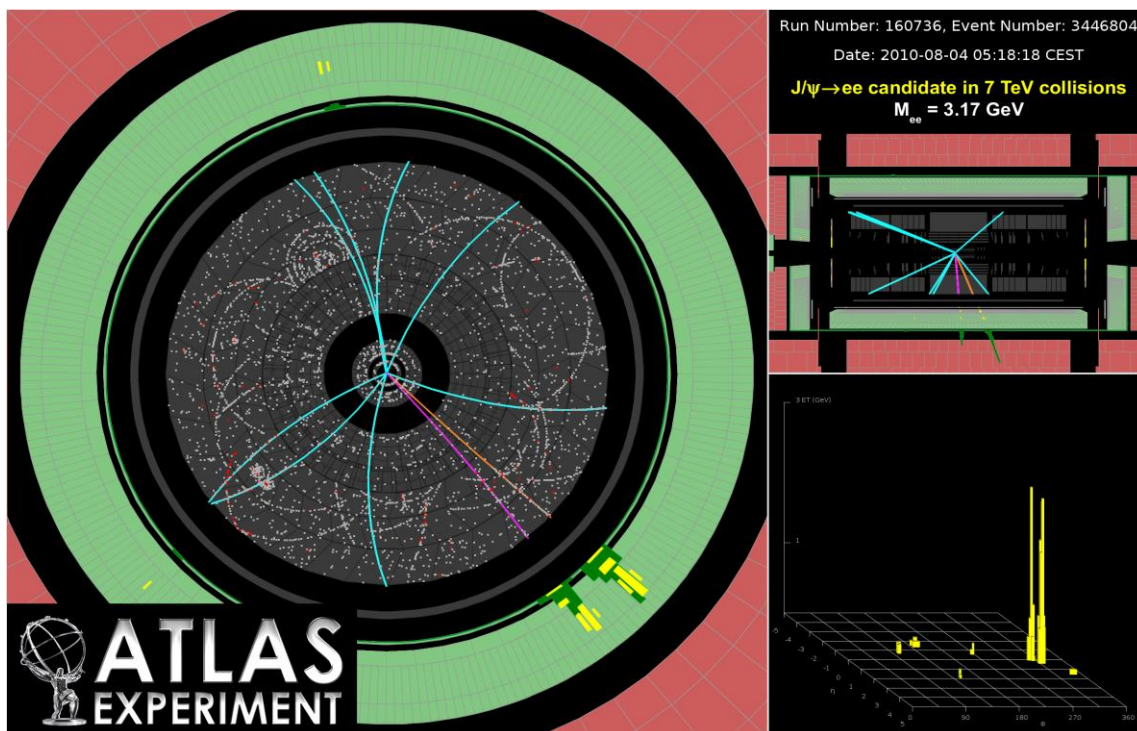


Рис.21 Электроны от J/ψ распада.

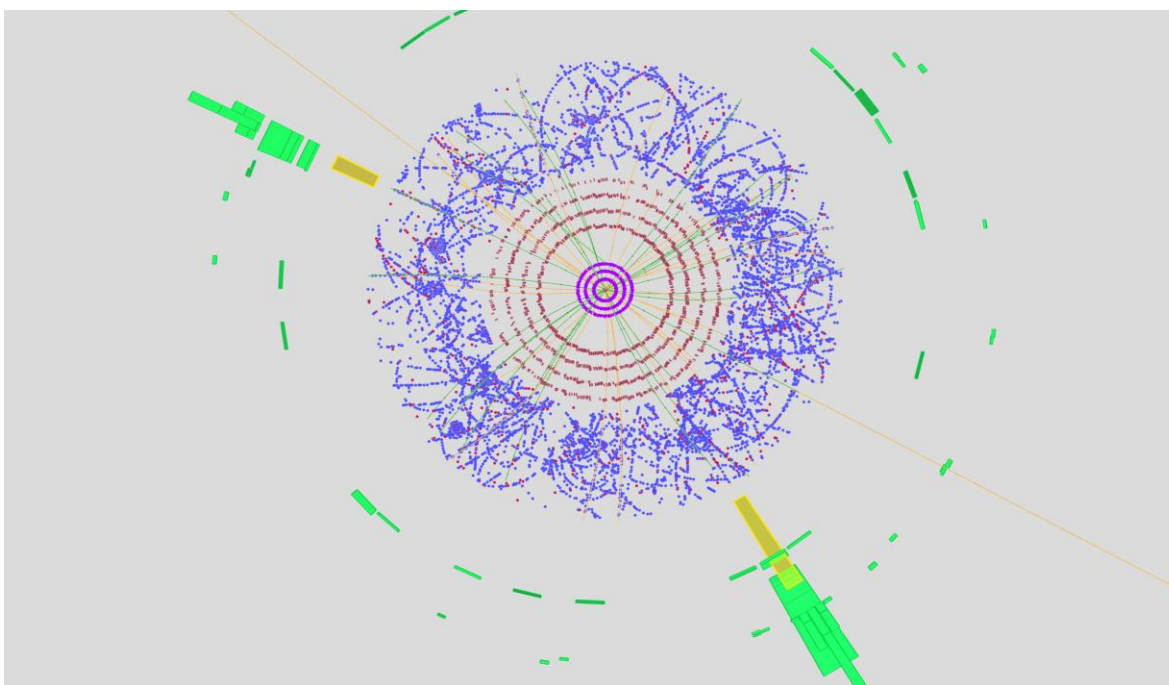


Рис.22 ATLAS позволяет проводить надежную идентификацию треков даже в таких сложных случаях наложения событий.

Основные результаты и выводы

1. Исследованы и определены критические условия работы straw с рабочим напряжением питания 1530 В. Главным критерием аварийной ситуации в работе straw является допустимое количество пробоев: 50 пробоев за 40 мс.
2. На основе выбранного критерия, а также исследования промышленного высоковольтного источника питания фирмы CAEN был определен набор требований к источнику питания и изготовлена новая высоковольтная система питания, удовлетворяющая специфическим требованиям т.д.п.и., обеспечивающая требуемую стабильность коэффициента газового усиления для работы детектора в режиме идентификации электронов.
3. Разработана методика калибровки каждого канала высоковольтной системы питания, обеспечивающая необходимую точность установки и измерения напряжения и тока в каждом канале.
4. Разработана методика тестирования уникальной многоканальной системы высоковольтного питания TRT-детектора.
5. Предложена оригинальная схема подачи высокого напряжения на straw, обеспечивающая компромисс между общим количеством каналов высоковольтного питания и минимальным количеством отключаемых трубок в случае обнаружения дефектной straw.

Практическая ценность работы

1. В результате разработки нового высоковольтного источника питания, методик его тестирования и калибровки получена уникальная высоконадежная и недорогая многоканальная система высоковольтного питания, удовлетворяющая критическим условиям работы трекового детектора переходного излучения.
2. Практически, первые физические результаты установки ATLAS были получены с помощью т.д.п.и. На треках космических мюонов были измерены вероятности образования фотонов переходного излучения для разных значений импульсов мюонов.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Система высоковольтного питания трекового детектора переходного излучения эксперимента ATLAS. К.И.Жуков, [др.]. Приборы и техника эксперимента. -2009.-№5.-с.66-71.-Библиогр.:8.
2. Приборы для обнаружения электрических пробоев в пропорциональных дрейфовых камерах трекового детектора переходного излучения эксперимента ATLAS. К.И.Жуков, [др.]. Приборы и техника эксперимента. 2010. №6 стр. 21-23.
3. Труды научной сессии МИФИ. 2008 год, Москва, секция 3-4, Физика ядра и элементарных частиц.
4. Труды научной сессии МИФИ. 2009 год, Москва, секция 3-4, Физика ядра и элементарных частиц. «Начало работы эксперимента ATLAS на Большом адронном коллайдере в ЦЕРН», К.И.Жуков, [др.].
5. Труды научной сессии МИФИ. 2009 год, Москва, секция 3-4, Физика ядра и элементарных частиц. «Тестер для обнаружения пробоев в отдельных straw-камерах трекового детектора переходного излучения эксперимента ATLAS», К.И.Жуков, [др.].
6. The ATLAS TRT end-cap detectors, 2008 JINST 3 P10003 doi: 10.1088/1748-0221/3/10/P10003 K.Zhukov [et all].
7. The ATLAS TRT electronics, 2008 JINST 3 P06007 doi: 10.1088/1748-0221/3/06/P06007 K.Zhukov [et all].
8. The ATLAS transition radiation tracker (TRT) proportional drift tube design and performance, 2008 JINST 3 P02014 doi: 10.1088/1748-0221/3/02/P02014 K.Zhukov [et all].
9. The ATLAS TRT barrel detector, 2008 JINST 3 P02014 doi: 10.1088/1748-0221/3/02/P02014 K.Zhukov [et all].

Жуков Константин Игоревич

**Многоканальные системы высоковольтного
питания для газовых детекторов переходного
излучения в экспериментах по физике высоких
энергий.**

01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики»

Подписано к печати _____

Объем 1,5 п.л.

Печать офсетная.

Формат 60x84/16

Тираж 80 экз. Заказ № _____

Типография