

Ладыгин Евгений Александрович

**Разработка и создание регистрирующей электроники адронного торцевого калориметра  
установки ATLAS для экспериментальных исследований на LHC**

Специальность:

01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Дубна, 2014

Работа выполнена в Объединенном институте ядерных исследований

- Научный руководитель: **Чеплаков Александр Павлович**, кандидат физико-математических наук.
- Официальные оппоненты: **Михайлов Юрий Викторович**, доктор физико-математических наук, ФГБУ ГНЦ РФ «Институт физики высоких энергий», Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", ведущий научный сотрудник.  
**Григорьев Владислав Анатольевич**, доктор физико-математических наук, профессор, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», профессор.
- Ведущая организация: Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Защита состоится « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ в \_\_\_\_ ч. \_\_\_\_ мин. на заседании диссертационного совета Д 720.001.02 при ЛВФЭ ОИЯИ по адресу :

141980, г.Дубна, Московская область, ул. Жолио-Кюри, д.б.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ или на сайте [www.jinr.ru](http://www.jinr.ru)

Автореферат разослан « 17 » ноября 2014 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
кандидат физико-математических наук

В.А.Арефьев

## Общая характеристика работы

### *Актуальность темы*

Экспериментальная установка ATLAS (A Toroidal Lhc ApparatuS) создана и начала успешно работать на Большом Адронном Коллайдере (Large Hadron Collider, LHC) в Европейском Центре ядерных исследований, ЦЕРН (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, CERN) в Женеве, Швейцария.

Несколько поколений физиков-экспериментаторов пытались обнаружить новую элементарную частицу – бозон Хиггса, необходимую в Стандартной модели для объяснения механизма спонтанного нарушения симметрии. С помощью установок ATLAS и CMS при энергиях протон-протонных взаимодействий 7-8 ТэВ и светимости LHC  $\sim 7 \cdot 10^{33} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$  это стало возможным уже после двух лет работы коллайдера. Физики также намереваются найти экспериментальное подтверждение некоторых теорий, таких как суперсимметрия, квантовая гравитация и других.

Необходимо отметить, что к установке ATLAS на этапе её создания предъявлялись более высокие требования, чем к уже существующим на тот момент установкам:

- установка должна иметь полный набор всех типов детекторов – трековые детекторы, калориметры, мюонные камеры, время-пролетные детекторы;
- детекторы должны сохранять высокую разрешающую способность в широком диапазоне загрузок и энергий в течение длительного времени работы;
- детекторы должны обладать высоким быстродействием для исключения потерь информации за счет «мертвого» времени и наложения событий (в LHC происходит до 40 миллионов столкновений сгустков протонов в секунду).

Для обеспечения этих требований необходимо было создать специальную обслуживающую детекторы электронику. Она должна иметь высокую степень интеграции из-за большого числа каналов считывания (в калориметрах ATLAS – это около 200000 каналов), высокую надежность при работе в сильных магнитных полях и при высокой радиационной нагрузке, и высокую скорость усилительных и обрабатывающих устройств.

### *Цель работы*

В установке ATLAS [A1] используются высокоскоростные жидкоаргоновые калориметры, одним из которых является торцевой адронный калориметр (Hadronic End Cap, HEC). Энергетическое разрешение калориметров в общем случае описывается формулой:

$$\frac{\sigma E}{E} = \frac{a}{\sqrt{E}} \oplus \frac{b}{E} \oplus c ,$$

где  $a$  – фактор выборки,  $b$  – фактор шума,  $c$  – постоянный фактор.

Как показало детальное моделирование, для успешного поиска бозона Хиггса значения коэффициента  $a$  в электромагнитном, адронном и переднем калориметрах должны быть на уровне 10%, 50% и 100% соответственно, при этом постоянный коэффициент, который доминирует на высоких энергиях, не должен превышать 0.7%, 3% и 10% соответственно. Жидкоаргоновые калориметры должны также иметь быстрое время формирования сигналов и минимальное мертвое время, чтобы справляться со скоростями ЛНС, где частота пересечения встречных пучков составляет 40 МГц.

С 1993 года диссертант непосредственно участвовал в создании и испытании калориметра НЕС. Основными задачами, стоящими перед автором данной диссертационной работы, были разработка комплекса высоконадёжных радиационно-стойких узлов регистрирующей электроники для калориметра, методов их моделирования и испытаний. Для успешного достижения этих целей было необходимо:

- провести совместное электронное моделирование НЕС-калориметра и усилительных устройств к нему, разработать соответствующие методы,
- разработать методику моделирования устойчивости усилительных каскадов программой PSPICE,
- разработать и применить методы испытания созданной электроники на надежность,
- создать систему считывания для испытания модулей жидкоаргоновых калориметров при работе с высокой интенсивностью протонных пучков.

### ***Научная новизна и практическая ценность работы***

Эксперименты при сверхвысоких энергиях и высокой интенсивности пучков сталкивающихся частиц требуют от разработчиков новейших решений и подходов к созданию и самих детекторов, и сопутствующей электроники. Большая светимость коллайдеров порождает сильные радиационные поля, которые могут привести к деградации детекторов и электроники. Поэтому остро стоит вопрос о необходимости разработки надежного, радиационно-стойкого детектора и электроники для него.

Очевидно, что зарегистрировать все частицы, образующиеся во всех протон-протонных взаимодействиях на ЛНС, практически невозможно. Необходима хорошая фильтрация событий по заданным параметрам, которая

позволила бы резко уменьшить объем обрабатываемой информации и выбирать только «нужные» для конкретной задачи события (выработка триггера). Для выработки триггера от НЕС понадобились новые, не применяемые ранее решения. Впервые в калориметрии автором был применен метод компенсации полюса нулем, позволивший исключить зависимость скорости нарастания сигналов от эффективной емкости ячеек калориметра.

Созданная с участием автора диссертационной работы высоконадежная аппаратура считывания позволила успешно включить торцевой адронный калориметр НЕС в общую структуру установки ATLAS и обеспечить требуемые точности идентификации и реконструкции адронных струй. Это, в свою очередь, способствовало успеху эксперимента ATLAS, открывшему новую главу в истории физики высоких энергий – обнаружению бозона Хиггса.

Разработанные соискателем методы моделирования калориметра и усилительных устройств, методика испытания их надежности также могут найти широкое практическое применение при создании подобного типа аппаратуры для экспериментальных исследований и в других областях науки и техники.

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

На защиту выносятся следующие положения:

- методы моделирования калориметра и электронных устройств к нему;
- методы проектирования аппаратной части системы регистрации НЕС-калориметра и создание узлов регистрирующей электроники для адронного торцевого калориметра, в том числе:
  - предварительного усилителя,
  - предварительного формирователя,
  - формирователя для тестовых испытаний,
  - главного модуля считывания и оцифровки сигналов (Front End Board, FEB) для НЕС,
  - модуля передачи триггерных сигналов;
- методы испытаний созданной электроники для проверки устойчивости ее работы в радиационных полях и испытания на надежность;
- аппаратура для исследования поведения жидкоаргоновых калориметров установки ATLAS при высокой светимости и некоторые результаты проведенного эксперимента.

#### ***Апробация работы и достоверность результатов***

Достоверность представленных в диссертации результатов подтверждается тем, что:

- Созданная аппаратура позволила успешно включить торцевой адронный калориметр НЕС в общую структуру установки ATLAS.
- Установка ATLAS, включая НЕС-калориметр, успешно и практически безотказно работает на LHC, при этом установкой набрана статистика, соответствующая полной светимости около  $30 \text{ фбн}^{-1}$ . За пять лет работы калориметра не зафиксировано ни одной поломки в каналах регистрации, а за время сборки было потеряно всего 22 канала из 6000.
- Накопленный автором опыт уже востребован в работах по модернизации некоторых узлов установки в связи с переходом коллайдера LHC на повышенную светимость.

Основные результаты работы торцевого жидкоаргонового калориметра и созданной для него электроники неоднократно докладывались на международных конференциях, опубликованы в препринтах ОИЯИ и ЦЕРН, в журналах «Nuclear Instruments and Methods in Physics Research» (NIM) и «Journal of Instrumentation» (JINST). Список основных 23-х публикаций, содержащих полученные автором результаты, представлен в конце автореферата.

### *Структура и объем диссертации*

Диссертация состоит из введения, девяти глав и заключения. В конце приводится список цитируемой литературы, включая авторские работы. В диссертацию включено 78 рисунков, четыре таблицы и одна фотография.

### *Содержание диссертации*

Во введении обосновывается актуальность темы, формулируются цели и задачи, поставленные перед диссертантом, отмечается научная новизна данной работы, приводятся защищаемые положения и практическая ценность полученных результатов.

В **главе 1** подробно описывается устройство торцевого адронного калориметра (НЕС), принципы его работы и процессы, происходящие в жидком аргоне, представлены некоторые параметры и характеристики, необходимые для моделирования калориметра и создания качественной электроники. Представлен теоретический расчет образуемого заряда и тока в жидком аргоне под воздействием пролетающих частиц. Описываются результаты измерений подвижности свободных электронов и ионизационного тока в зависимости от напряженности электрического поля, проведенных во время испытаний НЕС-модулей на пучке ускорителя SPS в ЦЕРН [A2]. Полученные зависимости хорошо согласуются с ранее опубликованными данными (рис.1). В связи с переходом LHC на повышенную светимость сделана количественная оценка

величины собранного заряда от напряженности поля и наличия центров захвата электронов в аргоне.

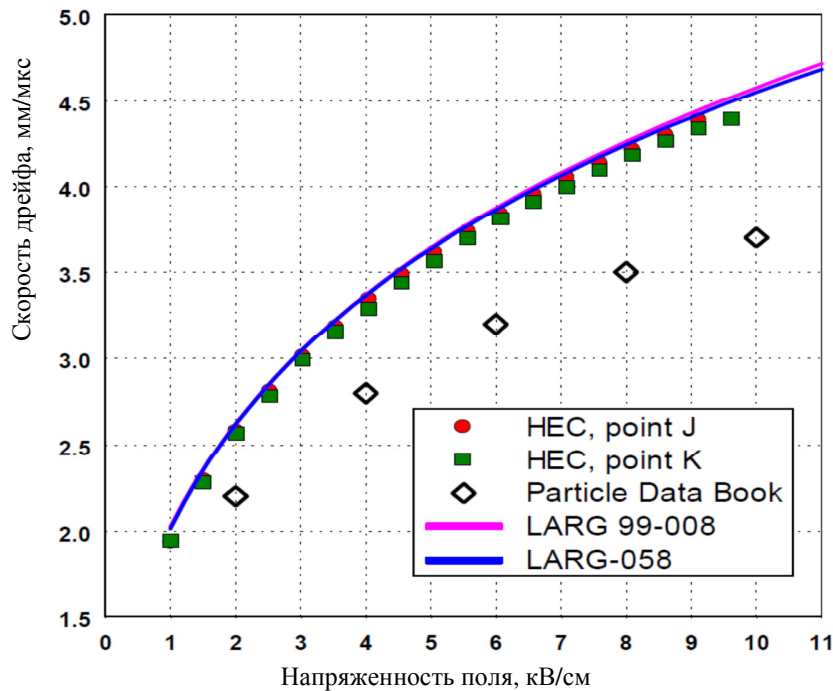


Рис.1. Измеренная скорость дрейфа электронов в жидком аргоне в зависимости от напряженности электрического поля. Для сравнения приведены значения, опубликованные в Particle Data Book и препринтах ЦЕРН.

Далее описывается устройство и принцип работы созданного адронного торцевого калориметра НЕС [А3]. Впервые в полномасштабном торцевом адронном калориметре для уменьшения эффективной емкости считывающих ячеек был применен принцип электростатического трансформатора, что привело к улучшению соотношения сигнал-шум.

Использование высокорезистивных слоев на электродах для создания электрического поля позволило осуществить дополнительную защиту усилителей от возможного электрического пробоя внутри аргонового зазора и сделало электроды полупрозрачными для электромагнитных сигналов. В результате сигналы могли бы быть сняты даже с зазора, где частично отключено высокое напряжение, например, на промежуточном EST электроде.

Приводятся значения конверсионного фактора калориметра (отношение поглощенной энергии к регистрируемой) и коэффициент отношения зарегистрированного тока к поглощенной энергии калориметра. Эти значения были сначала получены из моделирования калориметра с помощью программы

GEANT, а затем подтверждены экспериментально в тестах на пучке ускорителя SPS в ЦЕРН. Полученный для НЕС коэффициент пересчета «видимой» энергии в регистрируемый ток вычисляется по следующей формуле:

$$C_0 = \frac{q}{2 \cdot \tau_{dr} \cdot \varepsilon_i} \cdot \frac{\ln\left(1 + \frac{E_0}{E}\right)}{\frac{E_0}{E}} \cdot F_H = 7.135 \text{ нА/МэВ}, \quad (1)$$

где  $q$  – заряд электрона,  $\tau_{dr}$  – время дрейфа электронов в зазоре,  $\varepsilon_i$  – энергия образования пары электрон-ион ( $\varepsilon_i = 23.2$  эВ/пара),  $F_H$  – коэффициент коррекции на присутствие в зазоре сотовой структуры, необходимой для обеспечения его постоянной ширины,  $E_0$  – константа ( $E_0 = 0.84$  кВ/см),  $E$  – напряженность электрического поля в зазоре.

Используя рассчитанное значение  $C_0$ , получен коэффициент пересчета регистрируемого тока в поглощенную энергию:

$$\alpha_{em} = 23.3 / 7.135 = 3.27 \text{ МэВ/нА}. \quad (2)$$

В **главе 2** рассматриваются принципы построения системы считывания с жидкоаргоновых калориметров установки ATLAS и особенности системы считывания с калориметра НЕС. Особое внимание уделяется описанию интересных нововведений, которые отличают построенную систему считывания [A4] от ранее применяемых структур. Приведена структурная схема главного модуля считывания FEB, на котором располагается основная часть аналоговой электроники и происходит оцифровка сигналов. FEB – это универсальный модуль, который адаптируется для конкретного калориметра с помощью набора дочерних плат. В модуле FEB располагается формирователь  $CR-RC^2$  типа с тремя коэффициентами усиления, который оптимизирует соотношение сигнал-шум и позволяет достичь требуемого динамического диапазона (16 бит) с использованием коммерческого 12-битного АЦП, сохраняя при этом разрешение и линейность на уровне 0.5%.

Во второй главе также приводятся расчетные значения радиационного поля в местах размещения электроники [A5]. Плотность потока частиц в калориметре настолько велика, что к электронике предъявлены строгие требования по радиационной устойчивости, причем электроника должна работать в этих условиях без значительного ухудшения характеристик не менее 10 лет.

В части 2.3 рассматриваются особенности системы регистрации НЕС-калориметра. Необходимость улучшения соотношения сигнал-шум привела к решению о размещении предварительных усилителей внутри криостата. Поясняется необходимость разработки специального предварительного



формирователя [A6], с помощью которого осуществляется модернизация универсального модуля FEB для нужд адронного торцевого калориметра.

В главе 3 описана методика выбора технологии, по которой изготовлен разработанный при непосредственном участии автора предварительный усилитель [A7÷A9], рассматриваются некоторые аспекты схемного решения, приводятся его основные электрические характеристики.

Основная задача предварительных усилителей для НЕС, которые выполнены по технологии GaAs, – снять с чувствительных электродов сигналы, просуммировать их в продольном сегменте калориметра, усилить и передать по кабелю к считывающему модулю FEB. Так как разработанные усилители расположены непосредственно на внешней поверхности (периметре) калориметра внутри криостата, они оптимизированы для работы при температуре жидкого аргона (около 90°K). Одно из достижений в схемном решении заключается в том, что эти усилители могут работать и при комнатной температуре, незначительно ухудшая свои характеристики. Такая способность усилителей позволяет проводить различные тесты с ними при комнатной температуре в обычных лабораторных условиях без использования дорогостоящих криогенных систем.

Об оптимальности выбора схемного решения усилителя говорит и тот факт, что усилители имеют незначительный разброс по входному сопротивлению. Этого удалось достичь за счет хорошей повторяемости внутреннего усиления усилительного каскада от микросхемы к микросхеме. Малый разброс входного сопротивления дает незначительный вклад в разброс времен нарастания сигналов от идентичных по геометрии ячеек, что упрощает расчет временных констант для последующего в цепи считывания предварительного формирователя.

Одной из важных характеристик усилителей является зависимость собственного электронного шума от емкостной нагрузки на входе. За счет применения в разработанном усилителе входного транзистора с «большим» затвором эта зависимость минимизирована. Средний измеренный электронный шум ячейки калориметра с эффективной емкостью 200 пФ составляет не более 100 нА (в единицах эквивалентного шумового тока, ENI).

Расчетные значения радиационного уровня в месте расположения усилителей на НЕС за 10 лет работы на ЛНС при номинальных условиях составляют  $\sim 0.3 \cdot 10^{14}$  н/см<sup>2</sup> и гамма-доза около 20 Мрад. Радиационная стойкость усилителей была изучена на реакторе ИБР-2 в ОИЯИ [A10, A11]. Измерения показали, что характеристики усилителей начинают деградировать при достижении дозы нейтронного облучения величины  $\sim 3 \cdot 10^{14}$  н/см<sup>2</sup>, что значительно превышает уровень прогнозируемой дозы.

На этапе проектирования автором была сделана попытка промоделировать с помощью программы PSPICE поведение характеристик усилителя в зависимости от радиационного воздействия нейтронами [A12]. Основная идея заключалась в том, что под воздействием радиации разрушается в первую очередь индуцированный канал MESFET транзистора, и скорость разрушения зависит от дозы (с учетом экспериментальных наблюдений):

$$w = w_0 \cdot \exp(-k \cdot dose) \quad , \quad (3)$$

где  $w$  – рабочая ширина канала MESFET транзистора,  $w_0$  – начальная ширина канала (внутренний параметр PSPICE модели транзистора),  $k$  – коэффициент.

Используя данные, полученные из радиационного теста предыдущей версии усилителя [A10], был подобран искомый коэффициент  $k$ . Далее было проведено моделирование поведения новой версии усилителя в зависимости от набранной дозы. После проведения радиационных испытаний спрогнозированные данные были сравнены с измерениями. Как видно из рис.2, результаты измерений очень хорошо согласуются с результатами моделирования, что говорит о правильности разработанной модели.

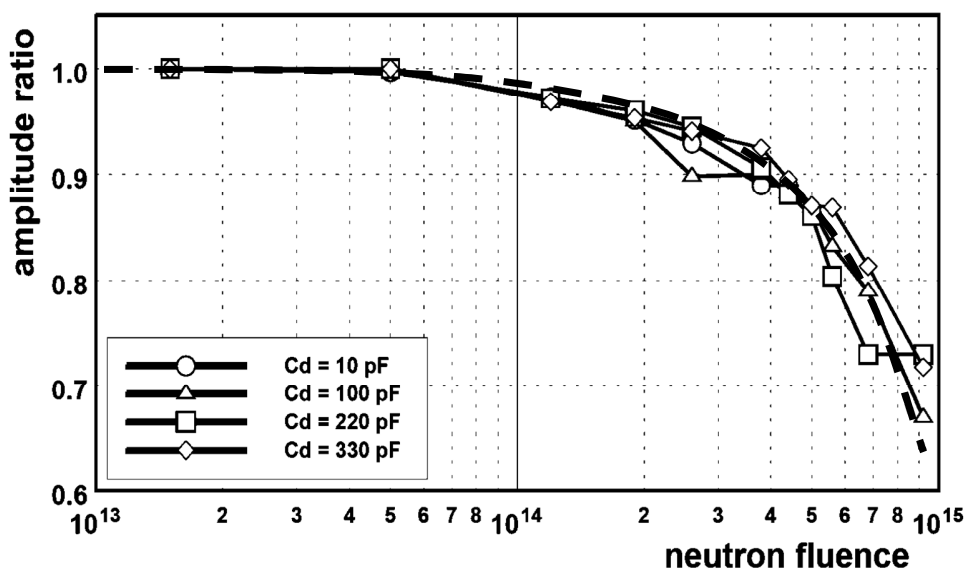


Рис.2. Влияние дозы нейтронного облучения на коэффициент передачи усилителя при различных детекторных емкостях. Прерывистой линией показан результат моделирования коэффициента передачи усилителя программой PSPICE для  $C_d = 200$  пФ.

В главе 4 рассматривается метод компенсации полюса нулём, примененный автором в предварительном формирователе, объясняется

необходимость разработки такого формирователя и приводятся требования, предъявляемые к нему [A12,A13].

Для оптимальной регистрации адронных ливней НЕС-модули разбиты на 88 ячеек, 51 из которых имеет свою определенную эффективную емкость, лежащую в диапазоне 24÷410 пФ. Из-за наличия емкости на входе предварительного усилителя происходит интегрирование сигналов с постоянной времени:

$$T_{pa}=(C_d+C_a)\cdot R_{in} , \quad (4)$$

где  $C_d$  –эффективная емкость ячейки,  $C_a$  – собственная входная емкость усилителя, а  $R_{in}$  – входное сопротивление усилителя.

После усилителей сигналы от ячеек с различной эффективной емкостью имеют разные формы из-за разных скоростей нарастания (разброс может достигать 17 нс), что недопустимо, согласно требованиям триггерной системы.

Используя метод компенсации полюса нулём, в предварительном формирователе достигнуто выравнивание времен нарастания сигналов от разных каналов [A14,A15]. Это позволило автору диссертации получить сигналы одной формы и далее вырабатывать триггерные сигналы простым аналоговым суммированием без ухудшения пропорциональности амплитуды суммарного сигнала поглощенной энергии в ячейках триггерной башни (ячейки с одинаковой величиной псевдобыстроты  $\eta$ , сгруппированные в продольном направлении).

Предварительный формирователь расположен на модуле ФЕВ в зоне большой радиоактивной нагрузки, поэтому к нему также предъявляется требование высокой радиационной стойкости. Объединяя это требование с требованиями высокой скорости и низкого энергопотребления, было решено построить схему на сверхвысокочастотных биполярных транзисторах, которые обладают большой сопротивляемостью радиационному воздействию. Но высокочастотные транзисторные схемы зачастую подвержены самовозбуждению.

Поэтому на этапе проектирования необходимо было провести моделирование, чтобы убедиться в стабильности усилительных каскадов. Используя программу PSPICE и разработанный автором метод разрыва обратной связи с помощью LAPLACE-элемента, были построены диаграммы Найквиста и Боде, которые подтвердили стабильность каскадов.

Важным этапом было изучение характеристик предварительных формирователей и испытание их на надежность и радиационную стойкость. В связи с большим количеством предварительных формирователей автором был разработан специальный стенд для измерения их характеристик. На этом стенде

были изучены все важнейшие параметры, на которые накладывались строгие ограничения. Измерения показали, что разработанная схема обладает высокой устойчивостью, низкими шумами, высоким быстродействием, а разброс основных параметров полностью удовлетворяет предъявляемым требованиям.

Далее, используя метод «отжига» (выдержка в печи при температуре 100°C в течение 168 часов), была осуществлена проверка предварительных формирователей на надежность. Такой метод дал отличный результат, поскольку в течение 5 лет работы на ЛНС отказы предварительных формирователей не зафиксированы.

Предположение о том, что высокочастотные биполярные транзисторы обладают достаточно высокой радиационной стойкостью, подтвердилось в результате радиационных испытаний гибридных формирователей на пучке нейтронов в ОИЯИ в 1999 году на реакторе ИБР-2 на испытательном стенде, который описан в [A10]. Общая аккумулированная доза нейтронов составила  $2.7 \cdot 10^{14}$  н/см<sup>2</sup> и гамма-доза 1200 Гр. Точность измерения доз составляла  $\pm 10\%$ . Испытания показали, что основные характеристики разработанных предварительных формирователей в данном диапазоне доз изменяются в допустимых пределах.

В главе 5 дается теоретическое обоснование применения быстрого формирователя, который является третьим важным элементом в аналоговой цепи регистрации НЕС-калориметра. Требование быстрой формировки (длительность положительной части сигнала  $\sim 120$  нс) следует из того, что пересечение пучков в ЛНС происходит каждые 25 нс, а полная длительность сигнала от калориметра определяется временем дрейфа электронов в аргоновых зазорах и равна в среднем  $\sim 450$  нс.

Формирователь  $CR-RC^2$  типа это также и полосовой фильтр, разработанный французскими коллегами специально для жидкоаргоновых калориметров установки ATLAS. Он используется для оптимизации соотношения сигнал-шум и формирует сигналы, удобные для оцифровки и обработки. С помощью трех разных каналов усиления формирователя достигается общий динамический диапазон измеряемых сигналов до 16-ти бит с использованием 12-битного АЦП, при этом обеспечивается энергетическое разрешение лучше 10% с линейностью 0.2% в диапазоне энергий 0.05÷2000 ГэВ [A4].

Задача разработки формирователя для адронного торцевого калориметра была поставлена еще на этапе проверки опытных образцов модулей калориметра [A12]. Было принято решение разработать и изготовить прототип формирователя в микромодульном исполнении. Автором был разработан такой

формирователь, который впоследствии использовался в тестах модулей калориметра и испытаниях предварительных усилителей.

**В главе 6** описан важный этап в подготовке электроники для полномасштабного торцевого адронного калориметра. Перед диссертантом стояла задача оснастить универсальные модули FEB специальными микромодулями, с помощью которых они адаптировались для калориметра НЕС, разработать методику проверки этих модулей и протестировать их. Микромодулями являются четырехканальные предварительные формирователи и платы LSB. Так как каждый модуль FEB отвечает за конкретный  $\eta$ -регион калориметра, а каждый канал – за конкретную ячейку, различаются три типа FEB. Оснащение конкретного типа модуля разнообразными дочерними платами приводит к тому, что все каналы модуля должны быть проверены на правильность установки и функционирования каждого узла. Поэтому автором был создан специализированный стенд, написано программное обеспечение, и все необходимые для НЕС 54 модуля FEB были протестированы на этом стенде.

**В главе 7** приведен принцип построения триггерной системы НЕС-калориметра и путь прохождения триггерных сигналов. Описывается, каким образом сигналы от триггерных башен в зависимости от  $\eta$ -региона выравниваются (усиливаются) для того, чтобы пересчитать их в поперечную энергию.

Передача триггерных сигналов в систему триггера первого уровня осуществляется с помощью разработанного автором специального модуля, который преобразует сигналы из однополярных в дифференциальные и по длинному кабелю передает их в триггерный приемник [A16, A17]. Такое устройство, по сути, является передатчиком и названо драйвером триггера (Tower Driver Board, TDB).

Разработанный модуль TDB имеет хорошие характеристики, удовлетворяет требованиям триггерной системы и используется для передачи триггерных сигналов с калориметров НЕС и FCAL (Forward CALorimeter). Потребляемая модулем энергия невелика, и тепло, выделяемое им, без труда поглощается охладителями, установленными на соседних модулях в FEC (Front-End Crate), что было подтверждено специальным тестом.

**В главе 8** описываются разработанные автором различные электронные модели, использованные для анализа сигналов с калориметра, моделирования ячейки калориметра, симуляции обнаруженных в ATLAS ложных сигналов. Наиболее сложная пространственная электронная модель ячейки калориметра позволяет моделировать сигналы от частиц, высоковольтный пробой и взаимное влияние ячеек друг на друга в виде кросс-тока. С помощью этой

модели автором диссертации были промоделированы «ложные» сигналы, обнаруженные в ATLAS при работе детектора уже после запуска установки.

С помощью специальных лабораторных тестов автором диссертации была доказана строгая зависимость частоты появления ложных сигналов от остаточной влажности в хоникомбе.

В главе 9 описаны результаты исследования жидкоаргоновых модулей калориметров в связи с планируемым переходом LHC на более высокую интенсивность [A18,A19]. Для испытаний были изготовлены три «мини»-модуля электромагнитного (EMEC), адронного (HEC) и переднего (FCAL) калориметров по той же технологии, что и модули для установки ATLAS. Эксперимент проводился на установке HiLum (High Luminosity) на ускорителе У-70 ФГБУ ГНЦ ИФВЭ. Интенсивность пучка протонов измерялась с помощью черенковского счетчика, камерой вторичной эмиссии и алюминиевой фольгой.

В установке была использована в основном стандартная электроника, разработанная для пучковых испытаний модулей HEC в ЦЕРН, но переработанная автором для данного эксперимента. Вместо «холодных» GaAs усилителей было решено использовать 50-омную версию OT усилителей, что позволило однотипно считывать информацию со всех трех калориметров.

Главной задачей эксперимента было оценить поведение жидкого аргона и материалов, из которых изготовлены модули торцевого калориметра, при наборе дозы, которая будет набрана модулями в ATLAS за 10 лет работы LHC. Второй важной задачей было оценить влияние объемного заряда, возникающего за счет медленно дрейфующих положительных ионов аргона, на деградацию сигналов.

Модули калориметров облучались пучком протонов с энергией 50 ГэВ в диапазоне интенсивностей  $10^7 \div 10^{13}$  протонов за сброс (время сброса ~1.2 сек). Полностью подтвердилось предположение о том, что форма сигнала при повышении интенсивности пучка меняется из-за рекомбинации движущихся электронов на медленных положительных ионах аргона, количество которых с повышением интенсивности растет. При интенсивности пучка более  $10^9$  частиц наблюдается искажение сигнала. Искажения происходят в основном на заднем фронте сигнала, что означает трансформацию сигналов треугольной формы в сигналы с экспоненциальным спадом.

Важным результатом этих исследований было измерение критической интенсивности, когда суммарный заряд ионов аргона в зазоре достигает величины заряда на высоковольтных обкладках и компенсирует электрическое поле. Измеренные величины критических интенсивностей для трех калориметров HEC, EMEC и FCAL превышают расчетные интенсивности, достижимые на HL-LHC.

В **заключении** сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы:

- С участием автора для торцевого адронного жидкоаргонового калориметра установки ATLAS на LHC создана высоконадежная аппаратура регистрации, позволившая успешно включить торцевой адронный калориметр HEC в общую структуру детектора. Высокая разрешающая способность калориметра и его надежная стабильная работа обеспечивается, в основном, за счет применения надежной регистрирующей электроники, которая осуществляет считывание, усиление, формирование и передачу сигналов от калориметра в систему считывания установки. О стабильности работы электроники можно судить по долговременной стабильности коэффициентов усиления и пьедесталов (измеренные в течение года отклонения не превышают 0.25% и 0.3% соответственно). О надежности говорит тот факт, что за пять лет работы калориметра на LHC не зафиксировано ни одной поломки в каналах регистрации HEC-калориметра. Первые результаты, полученные на установке [A20÷A23,1], доказывают, что разработчики, одним из которых является соискатель, действительно создали новейшую установку на высоком техническом уровне.
- С непосредственным участием автора диссертационной работы созданы следующие электронные узлы, входящие в систему регистрации HEC-калориметра:
  - **Предварительные усилители.** Для создания усилителей, способных устойчиво работать при низких температурах, была выбрана полупроводниковая технология на основе арсенида галлия. Разработанный многоканальный усилитель показал очень хорошие характеристики и полностью удовлетворил всем предъявленным к нему требованиям. Он может работать при температуре жидкого аргона и при комнатной температуре. Эти усилители, совместно с примененным в калориметре методом электростатического трансформатора, позволили получить хорошее соотношение сигнал-шум. Средний электронный шум ячейки калориметра с эффективной емкостью 200 пФ составляет всего 100 нА (ENI). В рамках этой работы автором разработана методология моделирования поведения характеристик GaAs-усилителя при воздействии на него радиационного поля. Используя предложенные методы, можно заранее корректировать схемотехнику усилителей, изготавливаемых по данной технологии.
  - **Предварительные формирователи** формируют сигналы одной формы вне зависимости от емкости ячейки калориметра, что значительно упростило получение триггерных сигналов, которые образуются теперь

прямым аналоговым суммированием. Такая методика позволила вырабатывать триггерный сигнал от каждой продольной башни с амплитудой, соответствующей (с точностью не хуже 2.5%) суммарной энергии, поглощенной в ячейках данной триггерной башни.

- **Гибридный прототип основного формирователя.** С помощью этих формирователей были проведены тесты предварительных усилителей и модулей калориметра на тестовом пучке в ЦЕРН.
- **Главный модуль системы считывания – НЕС FEB.** На модуле осуществляется необходимое усиление, суммирование и оцифровка сигналов от калориметра. Результаты измерений, представленные в [A4], показали, что в диапазоне энергий 0.05÷2000 ГэВ модуль FEB может обеспечивать энергетическое разрешение от 10% на малых энергиях до 0.1% при больших энергиях с линейностью ~0.2%.
- **Электронный модуль передачи триггерных сигналов** позволяет передавать аналоговые триггерные сигналы без искажений на расстояние 70 метров. Данный модуль используется в триггерных системах калориметров НЕС и FCAL.
- В процессе создания электроники автором диссертации разработаны электронные модели самого калориметра и отдельных узлов системы считывания с него. С помощью этих моделей можно легко сравнивать результаты измерений с результатами моделирования. Доказано, что моделированием с помощью программы PSPICE можно описать основные характеристики и заранее оценить устойчивость усилительных каскадов к самовозбуждению. Метод представления ячейки калориметра как сложной R-C структуры позволил диссертанту смоделировать ложные сигналы, обнаруженные в калориметре во время работы LHC.
- Автор разработал и применил методику проверки долговременной безотказной работы созданной электроники и ее стойкости к радиационным воздействиям.
- На базе электроники, разработанной для тестов модулей калориметра на пучке в ЦЕРН, соискателем была создана аппаратура для проведения эксперимента HiLum, который позволил изучить поведение калориметров при высокой интенсивности пучка и оценить влияние образующихся в зазорах калориметров ионов аргона на форму считываемых сигналов.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что задачи по созданию адронного торцевого калориметра и регистрирующей электроники для него выполнены на высоком уровне и при непосредственном участии автора диссертации. В связи с предполагаемым переходом коллайдера LHC на повышенную светимость уже начаты работы по модернизации некоторых узлов



установки [2]. В частности, производится замена части электроники, где в полной мере задействован накопленный автором опыт.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

- A1. **Expected Performance of the ATLAS Experiment: Detector, Trigger and Physics** / ATLAS Collaboration // Geneva: CERN, – 2009, – 3v. CERN-OPEN-2008-020
- A2. B. Dowler, **Performance of the ATLAS hadronic end-cap calorimeter in beam tests** / B. Dowler, J.Pinfold, E.Ladygin, et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2002. A 482, Pp.94-124
- A3. D.M.Gingrich, **Construction, assembly and testing of the ATLAS hadronic end-cap calorimeter** / D.M.Gingrich, G. Lachat, E.Ladygin et al. // Journal of Instrumentation. – 2007. – JINST 2 P05005
- A4. N.J. Buchanan, **ATLAS liquid argon calorimeter front end electronics** / N.J. Buchanan, L. Chen, E.Ladygin et al. // Journal of Instrumentation. – 2007. – JINST 3 P09003
- A5. N.J. Buchanan, **Radiation qualification of the front-end electronics for the readout of the ATLAS liquid argon calorimeters** / N.J. Buchanan, L. Chen, E.Ladygin et al. // Journal of Instrumentation. – 2008. – JINST 3 P10005
- A6. H.Brettel, **Timing Adjustment for the HEC signals** / H.Brettel, L. Kurchaninov, E. Ladyguine // Geneva: CERN. ATLAS Internal Note. – 1998. – ATLAS-HEC-Note-073
- A7. J.Ban, **Cold electronics for the liquid argon hadronic end-cap calorimeter of ATLAS** / J. Ban, H. Brettel, E. Ladygin et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2006. – A556. – Pp.158-168
- A8. C. Berger, **Study of a novel electromagnetic liquid argon calorimeter — the TGT** / C. Berger, W. Braunschweig, E. Ladygin et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 1995. – A357. – Pp.333-343
- A9. W Braunschweig et al., **Performance of the TGT liquid argon calorimeter and trigger system** / W. Braunschweig, E. Geulig, E. Ladygin et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 1996. – A378. – Pp.479-494
- A10. A.Cheplakov, **Radiation Hardness of GaAs Preamplifiers for Liquid Argon Calorimetry at LHC** / A.Cheplakov, V.Golikov, E.Ladygin et al. // Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. – 1996. – JINR-E13-96-358, MPI-PHE-96-15, – Pp.13. *Prepared for 6th International Conference on Calorimetry in High-energy Physics (ICCHEP 96), Rome, Italy, 8-14 Jun*

1996. Published in *\*Frascati 1996, Calorimetry in high energy physics\** 893-902

- A11. J.Ban, **Radiation hardness tests of GaAs amplifiers operated in liquid argon in the ATLAS calorimeter** / J.Ban, H.Brettel, E.Ladygin et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2008. – A594. – Pp.389-394
- A12. **ATLAS Liquid Argon Calorimeter Collaboration Meeting on HEC Electronics**. Germany: Munich. – 1997. February 19 – 21. (ATLAS HEC Note-028)
- A13. H.Brettel, **Timing Adjustment for the HEC signals** [Электронный ресурс] / H.Brettel, L.Kurchaninov, E.Ladyguine // Geneva: CERN. – 1998. – ATLAS-HEC-Note-073. – Режим доступа: [https://wwvatlas.mpp.mpg.de/HEC\\_notes/hec073.ps.gz](https://wwvatlas.mpp.mpg.de/HEC_notes/hec073.ps.gz)
- A14. E.Ladygin, **Preshaper for the Hadron End-Cap Calorimeter, Design Review** [Электронный ресурс] / E.Ladygin, W.-D.Cwienk, L.Kurchaninov et al. // Geneva: CERN. ATLAS Internal Note. – 2000. – ATLAS-HEC-Note-094. – Режим доступа: <https://edms.cern.ch/file/342086/1/hec094.pdf>
- A15. E.Ladygin, **Preshaper for the Hadron End-Cap Calorimeter, Production Readiness Review** [Электронный ресурс] / E.Ladygin, W.-D.Cwienk, L.Kurchaninov et al. // Geneva: CERN. ATLAS Internal Note. – 2002. – ATLAS-HEC-Note-124. – Режим доступа: <https://edms.cern.ch/file/341938/1/hec124.pdf>
- A16. E.Ladygin, **Tower Driver Board for the ATLAS Hadronic End-Cap and Forward Calorimeters, Design Review** [Электронный ресурс] / E.Ladygin, L.Kurchaninov // Geneva: CERN. ATLAS Internal Note. – 2002. – ATLAS-HEC-Note-127. – Режим доступа: <https://edms.cern.ch/file/582407/1/hec127.pdf>
- A17. E.Ladygin, **Tower Driver Board for the ATLAS Hadronic End-Cap and Forward Calorimeters, Production Readiness Review** [Электронный ресурс] / E.Ladygin, L.Kurchaninov // Geneva: CERN. ATLAS Internal Note. – 2003. – ATLAS-HEC-Note-153. – Режим доступа: <https://edms.cern.ch/file/582420/1/hec153.pdf>
- A18. A.Glatte, **Liquid argon calorimeter performance at high rates** / A. Glatte a, M.Kobel, E.Ladygin et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2012. – A669. – Pp.47-69
- A19. A. Afonin, **Relative luminosity measurement of the LHC with the ATLAS forward calorimeter** / A. Afonin, A.V. Akimov, E.Ladygin et al. // Journal of Instrumentation. – 2010. – JINST 5 P05005

- A20. C. Cojocaru, **Hadronic calibration of the ATLAS liquid argon end-cap calorimeter in the pseudorapidity region  $1.6 < |\eta| < 1.8$  in beam tests** / C. Cojocaru, J. Pinfold, E.Ladygin et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2004. – A531. – Pp. 481-514
- A21. J. Pinfold, **Evaluation of the local hadronic calibration with combined beam-test data for the endcap and forward calorimeters of ATLAS in the pseudorapidity region  $2.5 < |\eta| < 4.0$**  / J. Pinfold, J.Soukup, E.Ladygin et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2012. – A693.– Pp. 74-97
- A22. H. Abreu, **Performance of the electronic readout of the ATLAS liquid argon calorimeters** / H. Abreu, M.Aharrouche, E.Ladygin et al. // Journal of Instrumentation. – 2010. – JINST 5 P09003
- A23. **The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider** / ATLAS Collaboration // Journal of Instrumentation. – 2008. – JINST 3 P08003

Цитируемая литература:

1. **Jet energy measurement with the ATLAS detector in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV** / ATLAS Collaboration // Geneva: CERN. CERN Note. – 2011. CERN-PH-EP-2011-191
2. M. Aleksa, **ATLAS Liquid Argon Calorimeter Phase-I Upgrade Technical Design Report** / M. Aleksa, W. Cleland, Y. Enary et al. // Geneva: CERN. – 2013. – CERN/LHCC/2013/017. – 178 p.