

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор
МГУ имени М.В.Ломоносова
профессор

А.А.Федянин

« 02 » 02 2015 г.



Отзыв

ведущей организации
**Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования
«Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»**

на диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук

ЛАДЫГИНА Евгения Александровича

на тему «Разработка и создание регистрирующей электроники адронного торцевого калориметра установки ATLAS для экспериментальных исследований на LHC»

по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

Диссертационная работа Ладыгина Е.А. посвящена разработке, созданию и тестированию модулей электронной аппаратуры системы съема сигналов и регистрации данных торцевого адронного калориметра HEC (Hadronic End Cap) крупнейшей экспериментальной установки ATLAS на большом адронном коллайдере LHC в ЦЕРН (Женева). Для своего времени (середина 90-х годов) этот проект являлся очередным прорывом в области методики экспериментов в физике частиц высоких энергий. Стремление к изучению процессов со значительно меньшими сечениями взаимодействия, ставило перед электронной аппаратурой требования, существенно более высокого уровня:

- требования по быстродействию возрастали на порядок – до $7 \cdot 10^{33} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ по интенсивности пучка и со 100÷150 нс до 25 нс по периоду пересечения сгустков частиц;
- требования по количеству каналов регистрации аналоговых сигналов – с десятков до сотен тысяч (в то время, как требования на мощность, выделяемую электроникой в детекторе, оставались прежними);
- доза радиационного облучения достигла критического для полупроводниковой техники уровня $\sim 10^{14} \text{ 1/см}^2$;
- существенно, до 10 лет, возросло требование на время работоспособности аппаратуры.

Предпосылкой для решения стоявших задач являлся бурный прогресс наноэлектронной техники и, в частности, ставшая доступной технология специализированных интегральных схем. Стоявшие задачи и новый уровень элементной базы существенно повышали требования к квалификации разработчика электронной аппаратуры, поскольку

- электроника, в том числе аналоговая, становилась значительно сложнее, и в тоже время

стал невозможен прямой доступ к разрабатываемым электронным узлам в целях наблюдения за их работой и действием взаимных помех.

В силу этого и из-за резко возросших функциональных и физических объемов электроники, это требует значительных усилий

- по компьютерному моделированию работы на всех уровнях иерархии электронной аппаратуры – узлов, секций, модулей и устройств;
- по созданию средств их массовой проверки и отбраковки после изготовления, а также тестированию в процессе эксплуатации.

Особое внимание необходимо уделять радиационной стойкости выбираемых электронных компонентов.

Приведенный перечень и определил основные виды работ, проведенных диссертантом. Их можно разбить на 3 направления:

- разработку узлов и модулей электроники съема и регистрации сигналов адронного калориметра, включая методы ее цифрового моделирования;
- создание методики испытаний больших объемов электронной аппаратуры, включая ее радиационную стойкость;
- проведение предварительных испытаний компонентов, узлов и модулей.

Актуальность работы очевидна, поскольку она является необходимой частью очень крупного международного проекта, в котором уже получены важные физические результаты.

Новизна работы в части разработок самой электронной аппаратуры заключается в следующем:

- автором разработаны методы компьютерного моделирования, позволившие с необходимой точностью описывать специфику поведения разрабатываемых узлов калориметра;
- разработаны новые схемотехнические решения ключевых электронных модулей для съема, регистрации и оцифровки сигналов адронного калориметра, полностью удовлетворяющие требованиям эксперимента;
- впервые в калориметрии применен метод компенсации полюса нулем, позволивший исключить зависимость скорости нарастания сигналов от емкости ячеек калориметра.

Что касается общей методики испытаний, как качества изготовления электронных модулей, так и их радиационной стойкости, то она, в целом, известна (автором даются ссылки). Новизна здесь состоит в учете специфики требований, сигналов и структуры аппаратуры и в создании автоматизированных испытательных стендов для ее проверки.

Практическая ценность созданной аппаратуры также не подлежит сомнению. Она уже достаточно долго используется во время рабочих сеансов по набору физических данных. Показательно то, что за время 8-летней эксплуатации не зафиксировано ни одного отказа в каналах регистрации. Во многом это результат работы по проведению предварительных испытаний компонентов, узлов и модулей. Результат того, что дефекты сборки, дающие в начальном периоде эксплуатации пик отказов, были устранены отбраковкой 22 каналов (их нельзя назвать потерей, по крайней мере, потерей автора).

Личный вклад автора по представленному списку публикаций оценить не так просто (что неизбежно для больших коллабораций), однако, в автореферате он описан достаточно подробно на 1,5 страницах – это пункты, отмеченные выше.

Полученные результаты, определяющие достоинства работы, в целом, состоят в том, что с участием автора создана высоконадежная аппаратура регистрации для торцевого

адронного жидкоаргонового калориметра, это позволило включить торцевой адронный калориметр НЕС в общую структуру детектора. На этой аппаратуре успешно получены новые физические данные. 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).

Для создания предварительных усилителей, способных устойчиво работать при низких температурах, была выбрана полупроводниковая технология на основе арсенида галлия. Средний электронный шум ячейки калориметра с эффективной емкостью 200 пФ составляет всего 100 нА (ЕНИ). 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.

Созданные предварительные формирователи формируют сигналы одной формы вне зависимости от емкости ячейки калориметра, что значительно упростило получение сигналов запуска, которые образуются простым аналоговым суммированием. Предложенная методика позволила вырабатывать сигнал запуска от каждой продольной башни калориметра с погрешностью, меньшей 2.5% от суммарной энергии, поглощенной в ее ячейках.

Главный модуль системы считывания – НЕС FEB осуществляет необходимое усиление, суммирование и оцифровку сигналов от калориметра. В очень широком диапазоне энергий 0,05÷2000 ГэВ он обеспечивает энергетическое разрешение от 10% на малых энергиях до 0.1% при больших энергиях, при линейности ~0.2%.

В процессе создания электроники автором разработаны электронные модели самого калориметра и отдельных узлов системы считывания с него. Метод представления ячейки калориметра как сложной $R-C$ структуры позволил смоделировать ложные сигналы, обнаруженные в калориметре во время работы ускорителя LHC.

Апробация работы. Результаты работы по созданию электроники торцевого жидкоаргонового калориметра докладывались на международных конференциях. Основные результаты отражены в 23 публикациях, опубликованных в препринтах ОИЯИ и ЦЕРН и в журналах «Nuclear Instruments and Methods in Physics Research» (NIM) и «Journal of Instrumentation» (JINST).

Оформление диссертации. В целом, материал диссертации изложен достаточно полно и понятно, хотя в некоторых местах специфика жидкостных ионизационных камер могла быть описана более подробно (например, выполяживание; нет ссылки на формулу 5.2). В первых двух главах самой диссертации (и частично, далее) иногда трудно выделить обзорную и авторскую часть материала. В автореферате это разделение проведено гораздо четче.

Имеются некоторые оговорки. Так на стр.9 написано что “Из теории известно, что большая емкость на входе усилителя означает значительный электронный шум”, это не совсем так, поскольку шум понижается, но сигнал снижается еще быстрее и отношение сигнала к шуму падает. На стр.21 утверждается, что электроды на основе тонкого полиамида практически прозрачны для электромагнитного поля; это может быть правильно для магнитного поля, но если они прозрачны и для электрического поля, то тогда из них не образуется необходимый “электростатический трансформатор”.

Высказанные замечания, конечно, не умаляют ценности проведенной Е.А.Ладыгиным работы. Она современна, большая по объему, выполнена на высоком уровне, безусловно полезна и результативна. Представленная работа, несомненно, удовлетворяет требованиям

ВАК к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук; она действительно является "квалификационной работой, в которой содержится решение задачи, имеющей существенное значение для соответствующей отрасли знаний" и Е.А.Ладыгин безусловно заслуживает присвоения ему ученой степени кандидата технических наук.

Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации.

Результаты диссертационной работы и отзыв обсуждались на семинаре отдела экспериментальной физики высоких энергий НИИЯФ МГУ 26 января 2015 г.

Директор НИИЯФ имени Д.В.Скобелевича
МГУ имени М.В.Ломоносова
доктор физико-математических наук, профессор



М.И.Панасюк

И.О. заведующего отделом ОЭФВЭ НИИЯФ МГУ

Г.Ф.Чернолужский

Отзыв составил:
ведущий научный сотрудник, к.ф.-м.н.

А.Г.Воронин

27.01.2015