

*На правах рукописи*

Усенко  
Евгений Анатольевич

Разработка  
аналоговой электроники считывания  
многоканальных физических детекторов

01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва — 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук (г. Москва).

**Научный руководитель:**

*Решетин Андрей Игоревич*, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук, старший научный сотрудник.

**Официальные оппоненты:**

*Харлов Юрий Витальевич*, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт физики высоких энергий» им. А.А.Логонова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», ведущий научный сотрудник

*Завертяев Михаил Васильевич*, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН), ведущий научный сотрудник.

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова.

Защита состоится 16 мая 2019 года в 11.30 часов на заседании диссертационного совета Д 002.119.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН), расположенном по адресу: 117312, Москва, проспект 60-летия Октября, д. 7а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯИ РАН, а также на сайте <http://www.inr.ru/rus/referat/dis-zasch.html>.

Автореферат разослан \_\_\_\_\_

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 002.119.01,

д. ф.-м. н., чл.-корр. РАН

Троицкий С.В.

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы исследования.** Современное развитие исследований в области физики высоких энергий идет по пути создания новых крупномасштабных установок с прецизионными параметрами. Таковы, например, эксперименты ATLAS, CMS, ALICE, LHCb на Большом адронном коллайдере (БАК), ЦЕРН (Швейцария).

Принципиальной составляющей таких проектов является создание новых типов детекторов с высокой гранулярностью (с большим числом каналов) и высоким временным разрешением, позволяющих создавать с их помощью системы триггера первого уровня и системы идентификации частиц по времени пролёта. Любой современный детектор частиц состоит из собственно физической камеры и специально разработанной считывающей электроники. Такие масштабные детекторные системы обладают следующими возможностями:

- перекрытие больших площадей (до  $100 \text{ м}^2$ );
- работа при больших нагрузках (до  $10^3\text{--}10^4 \text{ Гц/см}^2$ );
- временное разрешение для триггерных целей  $\leq 1\text{--}2 \text{ нс}$ ;
- временное разрешение для измерения времени пролёта  $\leq 100 \text{ пс}$ ;
- хорошее ( $< 1 \text{ см}$ ) координатное разрешение;
- низкое рассеяние мощности в окружающее пространство;
- малые габариты и стоимость.

Крупные проекты требуют пересмотра традиционных подходов к проектированию не только самих детекторов частиц, но также и систем считывающей электроники, число каналов которой достигает сотен тысяч.

Высокие временные характеристики детекторов потребовали соответствующего роста полосы пропускания накамерной электроники, достигающей  $500\text{--}1000 \text{ МГц}$ . С этого момента детекторная камера с накамерной электроникой стали неразрывно связаны конечными параметрами детектора в целом, и в общем случае не могут быть успешно применены порознь. Совокупность требований к системе считывающей электроники с большим числом каналов приводит к необходимости рассмотрения ее как самостоятельной системы и определяет новые принципы ее проектирования.

Актуальность вышеперечисленных аргументов определила предмет и тематику исследований, проведённых в данной диссертационной работе.

**Цель и задачи диссертационной работы.** Целью диссертационной работы является разработка аналоговых систем считывания многоканальных физических детекторов. Для достижения цели были сформулированы и решены следующие задачи:

- обобщен опыт построения предшествовавших экспериментов;
- проведен анализ требований к конкретному детектору для вычленения параметров электронного тракта;
- осуществлен синтез новых подходов к построению систем считывания на основе исследований конкретного детектора;
- на основе результатов моделирования спектральной плотности шумов достигнуты высокие характеристики аналоговых каналов считывания;
- выбор оптимального варианта решения из альтернативных версий;
- проведены собственные поисковые методические разработки, как в области усилительной техники, так и в области новых методик измерений.

В результате проведенных исследований были разработаны:

- низкопороговая электроника считывания, обеспечившая полный объем исследований для тестирования камер РПС (Резистивный Плоский Счетчик) эксперимента ATLAS (ЦЕРН, Швейцария);
- малошумящая накамерная электроника на основе принципа суммирования считывающих электродов для времяпролетной системы эксперимента HARP (ЦЕРН, Швейцария);
- специализированная аналоговая интегральная схема ASIC NINO 8-ми канального усилителя-дискриминатора,
- система считывания на основе ASIC NINO с числом каналов 160 тыс. времяпролетного детектора эксперимента ALICE (ЦЕРН, Швейцария);
- система считывания переднего сцинтилляционного годоскопа Forward Wall (FW) эксперимента HADES (ГСИ, Германия) с использованием двухканальной структуры электроники с TOT мето-

дом для измерения заряда, которая обеспечила цифровую обработку временной и амплитудной информации в одном канале ВЦП;

- модернизированный при помощи синусного формирователя ТОТ метод измерения зарядов позволил снизить ошибки метода и обеспечил его использование в различных применениях для экспериментов HADES (ГСИ, Германия), BM&N (ОИЯИ, Дубна).

### **Научная новизна и практическая значимость**

1. Впервые разработана низкопороговая накамерная электроника для тестирования камер РПС (Резистивный Плоский Счетчик), обеспечившая полный объем исследований и ставшая прототипом канала считывания для конечной конфигурации мюонной системы эксперимента ATLAS (ЦЕРН, Швейцария).
2. Впервые использован принцип суммирования зарядов на основе 8-канального суммирующего предусилителя для системы считывания времяпролетной системы эксперимента HARP (ЦЕРН, Швейцария) с временным разрешением 150 пс,
3. Разработана первая в мире специализированная ИС для времяпролетных применений ASIC NINO с уникальными характеристиками и новым набором функций.
4. Впервые разработана многоканальная накамерная электроника на 160 тыс. каналов считывания камер РПС для времяпролетной системы эксперимента ALICE (ЦЕРН, Швейцария):
5. Впервые разработана двухканальная структура и ТОТ методом измерения заряда в системе считывания переднего сцинтилляционного годоскопа FW эксперимента HADES (ГСИ, Германия), обеспечившая цифровую обработку временной и амплитудной информации в одном канале ВЦП.
6. Впервые предложенный автором синусный формирователь для модернизации ТОТ метода измерения зарядов обеспечил снижение ошибки метода до 0,3% и его расширенное использование.

### **Основные положения, выносимые автором на защиту:**

1. Постановка задачи, исследование и разработка малошумящей считывающей электроники для тестирования камер РПС эксперимента ATLAS (ЦЕРН, Швейцария). Предложенный автором способ снижения шумов электроники обеспечил проведение исследований многоканальных камер РПС благодаря низкому порогу срабатывания и малой величине временной ошибки. Для эксперимента ОКА (ИЯИ-ИФВЭ) проведен перерасчет схемы малошумящей электроники считывания для снижения порога срабатывания пропорциональных камер при увеличенных нагрузках.
2. Впервые реализован принцип суммирования нескольких считывающих электродов для снижения временной ошибки при одновременном уменьшении числа каналов и достижения высокого разрешения времяпролетного детектора эксперимента HARP (ЦЕРН, Швейцария).
3. Разработка первой в мире специализированной интегральной схемы для времяпролетных применений ASIC NINO, на основе которой соискателем была построена система считывания времяпролетных камер РПС на 160 тыс. каналов для эксперимента ALICE (ЦЕРН, Швейцария).
4. Разработка двухканальной структуры дискриминатора, впервые реализованной в системе считывания времяпролетного детектора TOF и переднего сцинтилляционного годоскопа FW эксперимента HADES (ГСИ, Германия), позволившей объединить измерения времени и амплитуды по TOT методу в одном канале ВЦП.
5. Модернизация метода преобразования заряда в длительность (TOT метод) введением синусного формирователя, обеспечившим снижение ошибки и возможность расширенного использования TOT метода.

**Личный вклад автора** во всех защищаемых работах состоял в непосредственном вкладе в экспериментальные физические исследования, постановку задачи и разработку систем электроники считывания многоканальных физических детекторов.

## **Апробация работы и использование результатов**

Результаты работы докладывались на 5-ой и 6-ой международной конференции по «Resistive Plate Chambers and Related Detectors» в Бари, Италия, 28–29 октября 1999 г. и в Коимбра, Португалия, 26–27 ноября 2001 г., а также на VIII международной конференции по «Instrumentation for Colliding Beam Physics», Новосибирск, Россия, 28 февраля – 6 марта 2002 г.

Диссертация основана на работах, которые были опубликованы в период с 2003 по 2014 годы. Основные результаты диссертации опубликованы в журналах: «Приборы и техника эксперимента», «Ядерная Физика», «Nuclear Instruments and Methods in Physics Research», IEEE Transactions on Nuclear Science, «Nuclear Physics B Proceedings Supplements», «Physics of Atomic Nuclei», препринтах ИЯИ РАН, ИФВЭ и ОИЯИ.

**Публикации.** Основные результаты диссертации опубликованы в 15 работах, в том числе 15 в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК.

## **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Каждая из глав содержит краткое резюме её содержания. Основные выводы диссертации приведены в заключении. Объем диссертации 155 страниц, содержит 88 рисунков, 7 таблиц и 29 наименований цитируемой литературы.

Представленная работа была выполнена в лаборатории нейтринных взаимодействий отдела нейтринной физики Института физики высоких энергий (ИФВЭ), лабораториях мезоядерных взаимодействий и релятивистской ядерной физики отдела экспериментальной физики Института ядерных исследований РАН, а также в CERN (Швейцария) и GSI (Дармштадт, Германия).

## **Содержание работы**

Во **Введении** обсуждаются проблемы исследований в области физики высоких энергий, определяемые созданием новых крупных

установок с прецизионными параметрами. Таковы эксперименты, проводимые на установках ATLAS, CMS, ALICE, LHCb в ЦЕРНе (Швейцария) на Большом адронном коллайдере (БАК).

Принципиальной особенностью таких экспериментов является применение новых типов детекторов, в том числе с высоким временным разрешением, позволяющих создавать с их помощью системы триггера первого уровня и системы идентификации частиц по времени пролёта.

Масштабные проекты требуют пересмотра традиционных подходов к проектированию не только самих детекторов частиц, но также и систем считывающей электроники, число каналов которой достигает сотен тысяч. При разработке многоканальных детекторов основное внимание уделяется минимизации стоимости детектора в целом при заданных параметрах накамерной считывающей электроники.

В первой главе проведен обзор систем считывающей электроники времяпролетных детекторов, построенных на основе наиболее распространенных в настоящее время камер РПС экспериментов STAR (БНЛ, США), FOPI и HADES (ГСИ, Германия). Представлены сравнительные характеристики различных решений аналоговых трактов и обсуждается их влияние на результирующие параметры времяпролетных систем в целом.

Как следует из таблицы 1, временное разрешение камер зависит от спектральных характеристик аналогового тракта считывающей электроники.

Таблица 1. Таблица выборочных параметров времяпролетных систем и их аналоговых трактов считывания

Параметр	<i>STAR</i>	<i>FOPI</i>	<i>HADES</i>
Количество газовых зазоров	6	8	4
Величина зазора (мм)	0,3	0,22	0,3
Размер считывающего электрода (см/см)	6,3/3,1	90/0,34	60/2
Площадь детектора (м <sup>2</sup> )	60	5	8

Эффективность (%)	95-97	98	>95
Плато рабочего напряжения (В)	500	600	200
Загрузка детектора (Гц/см <sup>2</sup> )	10	30	700
Шумы детектора (Гц/см <sup>2</sup> )	0,3	0,1	2-3
Временное разрешение (пс)	60	73	70
Взаимовлияние каналов (%)	10	0,5	0,5
Число каналов считывания	30 000	4480	2244
Полоса частот аналогового канала (МГц)	560	1500	2000
Собственный джиттер электроники (пс)	24	20	20
Потребляемая мощность на канал (Вт)	1	1,3	1,1

Так, например, в экспериментах FOPI и HADES в аналоговом тракте используются усилители соответственно MAR-6 (Mini-Circuit) и BGM1013 (Phillips) с полосой пропускания 1,5 и 2 ГГц соответственно, а в эксперименте STAR усилитель MAX3760 (MAXIM) с полосой 560 МГц (Рис.1). Собственный джиттер электронных трактов составляет около 20 пс (таб.1) и не вносит в результирующее временное разрешение детектора существенного вклада.

Собственный джиттер электронного тракта описывается приближенной формулой 1. Оценка соотношения амплитуды сигнала к шуму показывает величину 20пс, если принять в качестве амплитудного значения величину порога срабатывания 1 мВ и уровень шумов 50 мкВ. При времени нарастания 0,5 нс собственный джиттер, рассчитанный по формуле 1, составит 25 пс, что вполне соотносится с данными таб. 1 с учетом ошибки измерения и допущений расчета.

$$\sigma_t = (N/A) \times t_r, \quad (1)$$

где  $\sigma_t$  — временной джиттер (с),  $N$  — амплитудное значение шума (В),  $A$  — амплитуда импульса (В),  $t_r$  — время нарастания переходной характеристики (с).

Сделан вывод, что методика вычленения вклада электронного тракта из общего разрешения важна и позволяет делать осознанный выбор параметров электроники, от которых зависят многие важные свойства системы в целом.

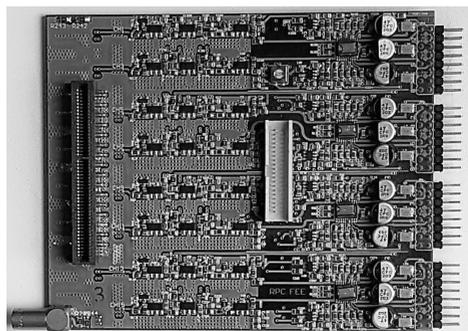
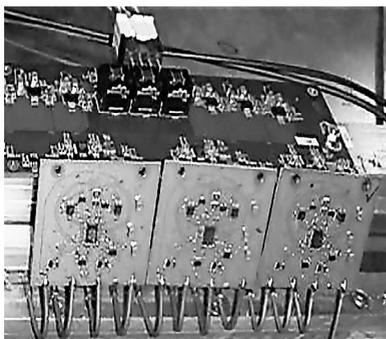


Рисунок 1. 6-канальная карта STAR (вверху), 32-канальная карта HADES (внизу слева), и 16-канальная карта эксперимента FOPi (внизу справа), для времяпролетных систем считывания на основе камер РПС

Для выполнения процедуры время-амплитудной коррекции тракты электроники экспериментов STAR и FOPi используют наряду с временными каналами измерений параллельные каналы измерения амплитуд в АЦП что значительно усложняет и удорожает систему в целом.

Современные системы считывания все чаще применяют метод преобразования заряда в длительность импульса, называемый TOT (Time Over Threshold) методом в его различных вариациях. На начальном этапе развития TOT метода точность его первых реализаций была ограничена, как например, в эксперименте HADES [1], где был применен метод преобразования Вилкинсона. Ошибка метода составляла около 5% при значительном до 50% разбросе параметров от кана-

ла к каналу. Но главной проблемой ТОТ метода с применением принципа Вилкинсона являлся ограниченный динамический диапазон.

### **Выводы к главе 1**

1. В процессе построения предшествовавших экспериментов сформировался опыт разработки многоканальных детекторов и систем считывающей аналоговой электроники. В результате появился тренд в сторону значительного усложнения функциональности, применения новых методик, потребовались каналы считывания с новым набором параметров, с низкими шумами и высоким коэффициентом преобразования.
2. Требования многоканальности камер привели к необходимости накамерного исполнения считывающей электроники, введения дополнительных функций, таких как ТОТ преобразование для выполнения амплитудного канала.
3. В полной мере накамерной реализации считывающей электроники удовлетворяет только исполнение с использованием специализированных интегральных схем (СИС), специально разработанных для времяпролетных применений.

**В главе 2** описывается разработка специализированной низкопороговой электроники для триггерных мюонных систем экспериментов ATLAS (ЦЕРН, Швейцария) и ИСТРА-М (ИФВЭ и ИЯИ РАН).

**В разделе 1 главы 2** описывается разработка специальной считывающей электроники для исследования камер РПС в рамках создания мюонной системы эксперимента ATLAS (ЦЕРН, Швейцария) [1].

Одним из основных детекторов на коллайдере БАК является ATLAS. Он относится к детекторам общего назначения, основной целью которых является поиск бозона Хиггса и суперсимметричных частиц.

На Рис.2 приведена структура камер РПС для мюонного триггера в эксперименте ATLAS. Чтение стрипов осуществляется с одного конца, а с другой стороны стрип нагружен на его импедансное сопротивление величиной около 15-25 Ом. Токовый импульс, образованный лавинным разрядом в газовом промежутке, преобразуется в напря-

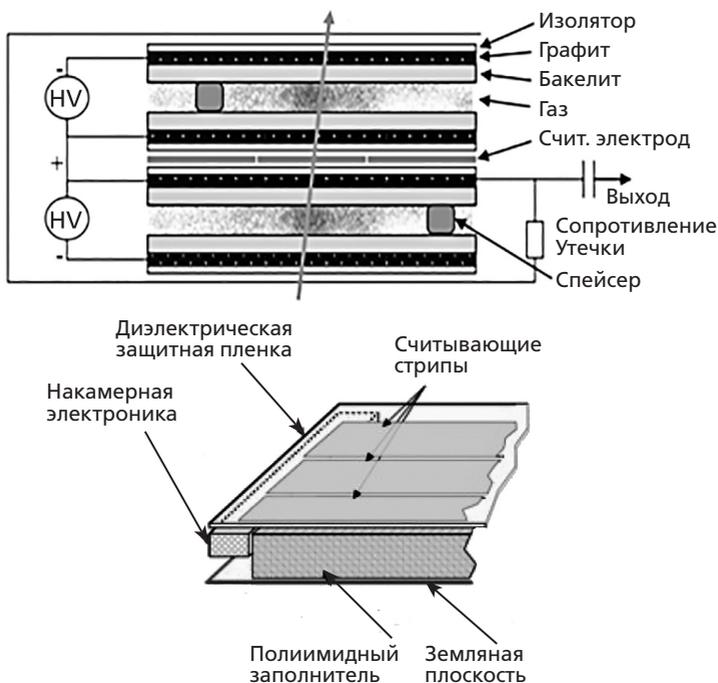


Рисунок 2. Структура камеры РПС (вверху) и расположение накамерной аналоговой электроники считывания в мюонной системе эксперимента ATLAS (внизу)

жение на стрипе со значительными потерями в амплитуде как при согласовании с двух сторон, так и при преобразовании тока в напряжение на низком импедансе стрипа.

Минимальный заряд, выделенный в камере [1], составляет около 0,3 пК, что соответствует уровню напряжения 170 мкВ на стрипе, согласованном с двух сторон импедансными сопротивлениями 25 Ом. Электроника считывания должна удовлетворять минимальному порогу считывания 100 мкВ при собственном шуме около 25 мкВ.

Снижение шумов, приведенных к входу усилительного каскада, достигнуто схемотехническими методами, как это показано на Рис.3 слева. Схема позволяет решать отдельно задачи построения оптимально согласованного по шумам входного каскада и получение большого коэффициента усиления на универсальной ИС 171УВ2 [1].

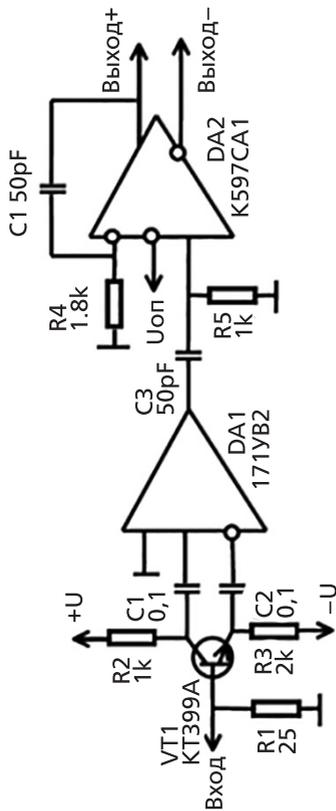
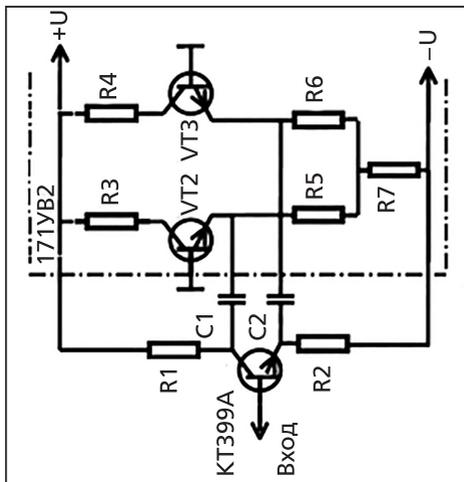


Рисунок 3. Упрощенная схема малозумящего входного гибридного каскада (слева), и схема одного канала низкочастотного усилителя-дискриминатора для камер РПС (справа)

Низкопороговый усилитель-дискриминатор для камер РПС был выполнен в виде накамерной 16-канальной карты, один канал которой описывается упрощенной принципиальной схемой на Рис. 3 справа.

При исследовании прототипов камер РПС для мюонного триггера эксперимента ATLAS при помощи низкопорогового дискриминатора были изучены характеристики камер при различных величинах газовых промежутков, зарядовые и временные характеристики камер при подборе оптимальной газовой смеси, влияние конструктивных особенностей камер на множественность срабатывания и перекрестные помехи в стриповых панелях. Результаты этих исследований представлены в работах [1,4,12].

**В разделе 2 главы 2** описывается разработка низкопороговой электроники считывания в рамках развития эксперимента ОКА (ИСТРА-М, ИФВЭ и ИЯИ РАН), предназначенного для исследования редких распадов К-мезонов на пучке адронов с энергией  $\sim 25$  ГэВ ускорителя У-70 в ИФВЭ (г. Протвино).

Требования развития эксперимента привели к необходимости повысить загрузочную способность пропорциональных проволочных камер для условий пучковых загрузок  $\sim 3 \cdot 10^6$  на сброс пучка 1.9 с, что достигается снижением напряженности электрического поля в газовом зазоре камер [2].

Требование увеличения загрузочной способности камер привело к снижению порогов считывающей электроники до величин порядка 1 мкА и ниже, что при типичном характеристическом импедансе проволочки примерно 200 Ом соответствует напряжению на ней около 200 мкВ. Для достижения требуемых характеристик электронного тракта был применен входной трансимпедансный каскад, обеспечивший работу камер при порогах ниже 1 мкА (Рис. 4 слева). В свою очередь работа при низких порогах и высоком усилении требует учета времени восстановления электронного канала (Рис. 4 справа), которое было изучено и минимизировано при расчете схемы.

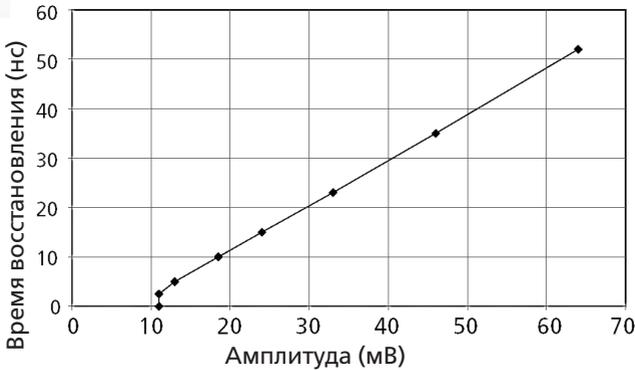
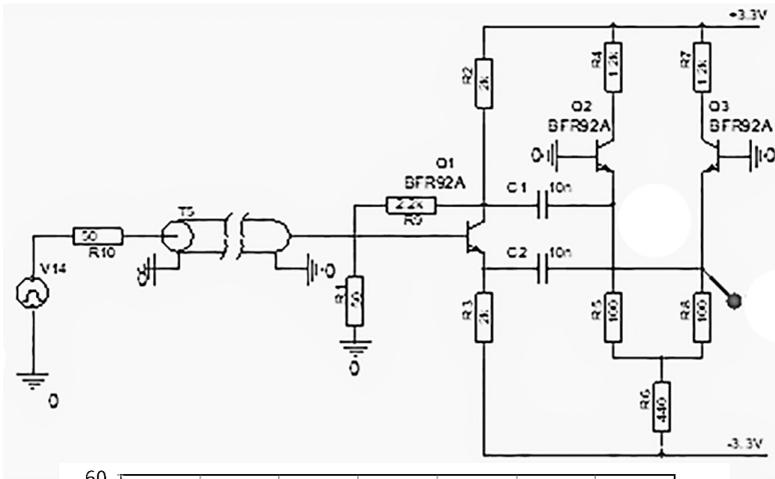


Рисунок 4. PSPICE модель входного каскада усилителя для пропорциональных камер эксперимента ОКА-ИСТРА-М (вверху) и зависимость его времени восстановления от амплитуды входного сигнала длительностью 10 нс (внизу)

## Выводы к главе 2

1. Разработана аналоговая считывающая электроника, обеспечившая полный объем исследований камер РПС для эксперимента ATLAS: подбор новой газовой смеси, выбор режимов работы камеры, способы согласования считывающих электродов и их взаимовлияние.
2. В эксперименте ОКА (ИСТРА-М) применение низкопороговой аналоговой электроники считывания позволило достичь величины  $\approx 70\%$  эффективности регистрации для событий распада  $K \rightarrow \mu\nu$ .

**В главе 3** описывается разработка систем считывания времяпролётных детекторов экспериментов HARP, ALICE и NADES.

**В разделе 1 главы 3** представлена разработка суммирующей аналоговой электроники эксперимента HARP (PS214), который проводился на ускорителе PS в ЦЕРН. Задачей эксперимента являлось измерение выхода вторичных адронов в полном телесном угле 4π. Для разделения низкоэнергетических (с энергиями в несколько сотен МэВ) электронов и π-мезонов использовалась времяпролётная система на основе камер РПС, временное разрешение которой составило около 150 пс [13].

Структура считывания камер при помощи суммирования 8-ми стрипов камеры показана на Рис. 5 слева. Один суммирующий усилитель покрывает площадь считывания камеры шириной 24 см и глубиной 10,6 см. Все полоски (стрипы), подключенные к входам одного сумматора, считываются с минимальным временным разбросом около 20 пс. Каждая камера РПС длиной 1920 мм содержала 64 суммированных по времени и амплитуде считывающих стрипов, 8 суммирующих предусилителей. Вся система считывания состояла из 2944 считывающих стрипов, 368 сумматоров и каналов ВЦП и АЦП.

Для сокращения временных погрешностей был выбран способ размещения суммирующего предусилителя (Рис. 6) внутри камеры. Принципиальная электрическая схема 8-канального суммирующего предусилителя представлена на Рис. 7 слева. Предусилитель состоит из восьми буферных каскадов на малошумящих транзисторах (Philips BFR92A, 5GHz), построенных по схеме с общей базой, и сумматора на ИС AD8009A.

Входные транзисторные каскады (Рис. 7 слева) рассчитаны в системе моделирования PSPICE. Назначение этих каскадов состоит в преобразовании низкого импеданса стрипов 20-25 Ом в расчетный импеданс точки суммирования (Рис. 7 справа) по критерию минимального (формула 1) собственного джиттера. Таким образом, сумматор рассчитан по критерию наилучшего временного разрешения в ущерб ошибке суммирования, которая не превышает 1% для 8-кратной суммы и значительно ниже для 2-кратной суммы. Собственный

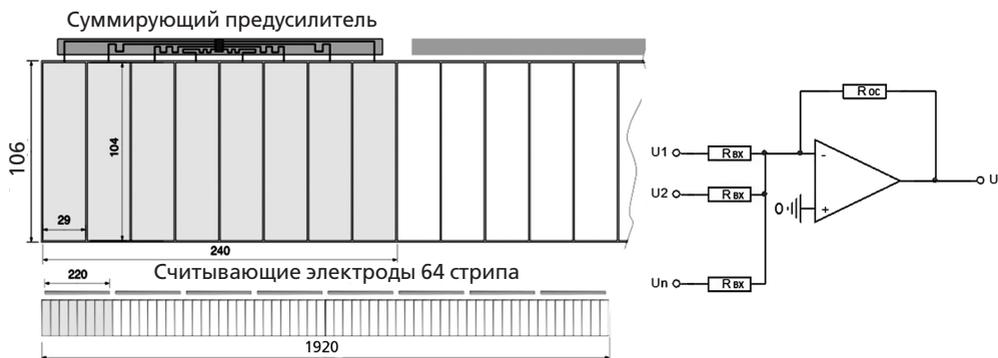


Рисунок 5. Структура считывания камер РПС посредством суммирования 8-ми стрипов (слева) и принцип работы аналогового сумматора (справа)

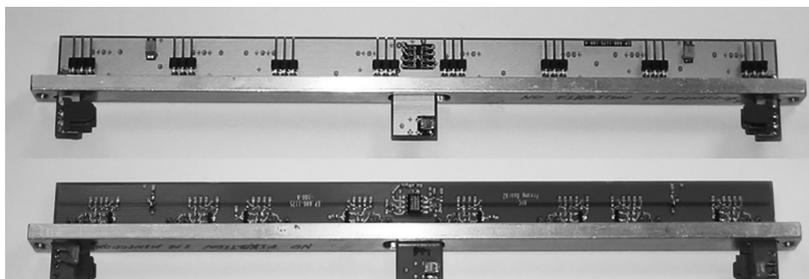


Рисунок 6. Накамерный 8-канальный суммирующий предусилитель для времяпролетной системы на основе камер РПС эксперимента HARP

временной джиттер сумматора составил 26 пс (Рис.7 справа) при величине заряда 480 пКл [13].

16-канальный CAMAC модуль SSD16 сплиттер-усилитель-дискриминатор был специально разработан для предварительного усиления, аналоговой обработки и разделения сигнала, приходящего от суммирующих предусилителей на временной и амплитудный каналы.

### Выводы к разделу 1 главы 3:

1. Впервые проведены исследования принципа суммирования электродов (стрипов) и доказана возможность построения времяпролетных детекторных систем с суммированием считывающих электродов и высоким временным разрешением около 150 пс.

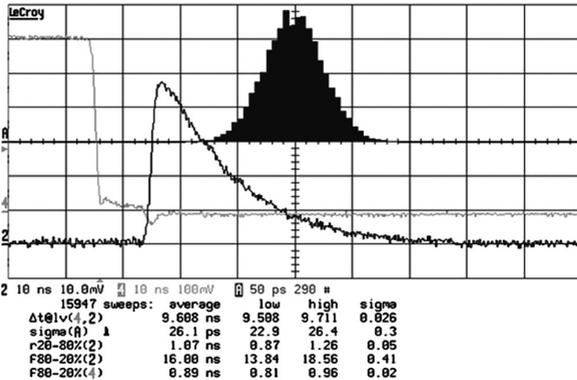
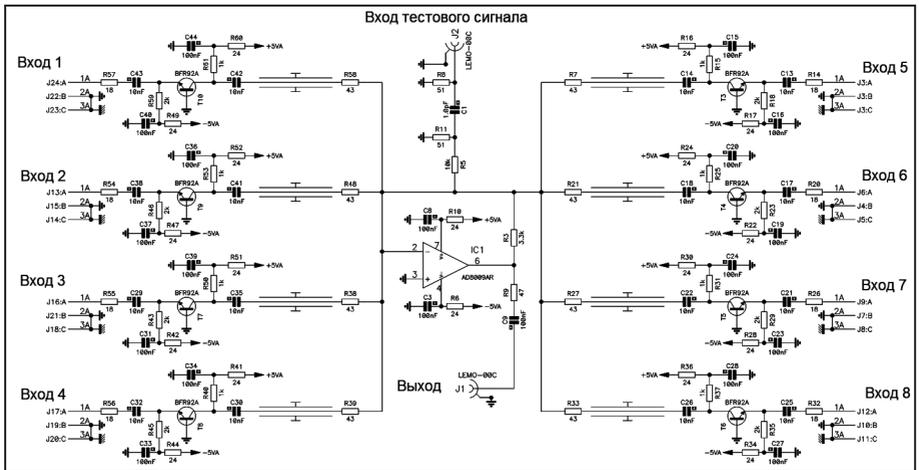


Рисунок 7. Принципиальная электрическая схема суммирующего предусилителя для времяпролетной системы эксперимента HARP (вверху) и результаты измерения его джиттера (внизу)

2. На основе принципа суммирования электродов впервые в мире создана времяпролетная детекторная система эксперимента HARP с временным разрешением 146 пс, покрывающая площадь  $8 \text{ м}^2$ , содержащая 2944 считывающих стрипов, 368 сумматоров и каналов ВЦП и АЦП.

**В разделе 2 главы 3** описывается разработка специализированного NINO чипа [6,7] для времяпролетной системы считывания ALICE TOF с числом каналов 160 тыс. [10]. В соответствии с техни-

численным заданием первым приоритетом был обозначен параметр времени нарастания переходной характеристики 1 нс, что соответствует спектру в диапазоне частот 350-500 МГц. Вторым приоритетом был обозначен уровень приведенного к входу эквивалентного шумового заряда величиной 5000 электронов. Третьим приоритетом был уровень рассеиваемой мощности 30 мВт на канал.

Основные измеренные параметры NINO чипа приведены в таблице 2.

На Рис.8 показан NINO чип первой версии, разваренный на печатную плату (вверху) и структурная блок-схема канала и общего управления (внизу).

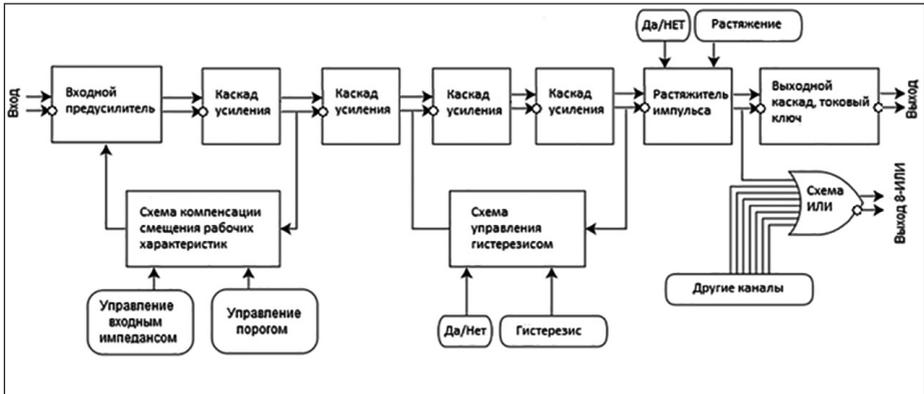
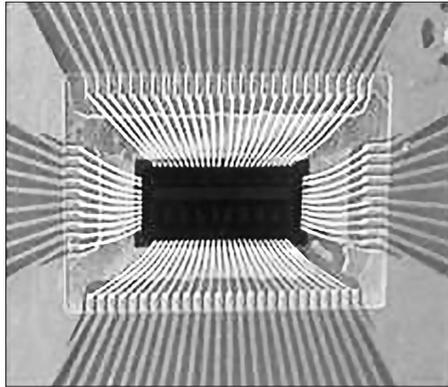


Рисунок 8. Фотография первой версии NINO чипа разваренного на печатную плату (вверху) и структурная блок-схема одного канала (внизу)

Таблица 2. Сводная таблица параметров NINO чипа

Параметр	Условия	Мин Тип Макс	Ед. Изм.
<b>ВХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ:</b> Входное напряжение смещения Дифф. напряжение смещения Диапазон порогов Входная емкость Входное дифф. сопротивление Уровень ограничения	$R_{вх}=20, 25, 37 \text{ W}$ $R_{вх}=20, 25, 37 \text{ }\Omega$	0.4 0.85 1.2 <2 10 -500 1 35 50 74 >200	В мВ фКл пФ W фКл
<b>Усилительные параметры:</b> Преобразование заряд в напряжение Преобразование заряд к порогу Эквивалентный шумовой заряд Коэффициент преобразования разброс	$C_{дет}=0 \text{ пФ}$ $C_{дет}=0 \text{ пФ}$ $U_{раст} = 0 \text{ В,}$ $U_{гист} = 0 \text{ В}$	1080 4 1900 / 0.25 10	мВ/ фКл мВ/ фКл е / фКл %
<b>Выходные параметры:</b> Диапазон выходных токов Диапазон растяжения импульса Типовая длительность импульса Разброс длительности импульса Тип выхода Тип выхода ИЛИ	$U_{раст} = (2.5-0.7) \text{ В}$ $U_{раст} = 1.3 \text{ В}$ $U_{раст} = 1.3 \text{ В}$ Токовый мостовой ключ Токовый мостовой ключ	1 - 6 0 - 100 15 10 LVDS совме- стимый LVDS совме- стимый	мА нс нс %  
<b>ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА:</b> Мало-сигнальный спектр Время нарастания импульса Мин. длительность вх. имп. Диапазон длит. Вых имп.. Джиттер переднего фронта Гистерезис, диапазон	-3дБ $U_{раст} = 2.5$ $V_{Qвх} > 200 \text{ фКл}$ $U_{гист} = (0 - 1,5)$ В	500 600 0,6 1 - 6 12 0 - 12	МГц пс нс пс пс %
<b>ПИТАНИЕ:</b> Диапазон напряжения питания, Ток потребления на один канал Ток потребления на чип Потребляемая мощность на чип Рассеиваемая мощность, один канал Взаимовлияние по питанию		2,2 2,5 5,5 11,9 14,4 38,1 95 115 305 289 36 -50	В мА мА мВт мВт дБ  

Реализация проекта осуществлялась по трем направлениям. Первым направлением было построение чипа по блочному принципу (Рис. 8) как полностью дифференциальной структуры от входа до выхода.

Второе направление — развитие структурного построения чипа, наполнение его дополнительными функциями, исследование промежуточных прототипов и коррекция на этой основе требуемых параметров разработки.

Третье направление – собственно разработка, расчет и моделирование схемы по частям и полной принципиальной схемы канала.

Усилительные свойства каскадов NINO чипа описываются технологической постоянной  $A$ , которая связывает коэффициент усиления каскада  $A=g_m R$  с другими параметрами технологии, где  $g_m$  - крутизна одиночного транзисторного каскада, а  $R$  — комплексная нагрузка. Компаратор напряжения реализован в виде усилителя-ограничителя на четырех каскадах с полосой частот 500 МГц и коэффициентом усиления  $A=5-6$  каждый и общим усилением около  $A=500$ . Усиление предусилителя составляет  $A=30$  при импедансе 55 Ом.

В ходе разработки NINO чипа в его структуру были введены новые функции: регулировки входного импеданса, гистерезис пороговой характеристики и растяжитель импульса, необходимые для обеспечения устойчивости в работе с различными сигналами и расширения области его применения [6].

PSPICE модель канала NINO чипа, содержащая модель детектора, высокочастотной передающей линии связи и выходной нагрузки, показана на Рис. 9.

Некоторые результаты моделирования представлены на Рис.10. Эпюры напряжения показаны при выключенном гистерезисе для входных сигналов в диапазоне 100 – 2100 фКл и пороге 50 фКл.

На основе NINO чипа автором была разработана система считывания на 160 тыс. каналов, обеспечивающая временное разрешение  $\sim 100$  пс для системы времени пролета ALICE, использованная для идентификации пионов и каонов с импульсами до  $\sim 2,5$  ГэВ/с и протонв до  $\sim 4$  ГэВ/с [10,11]. Описаны принципы построения и структура системы считывания, а также составляющие ее подсистемы. Показа-

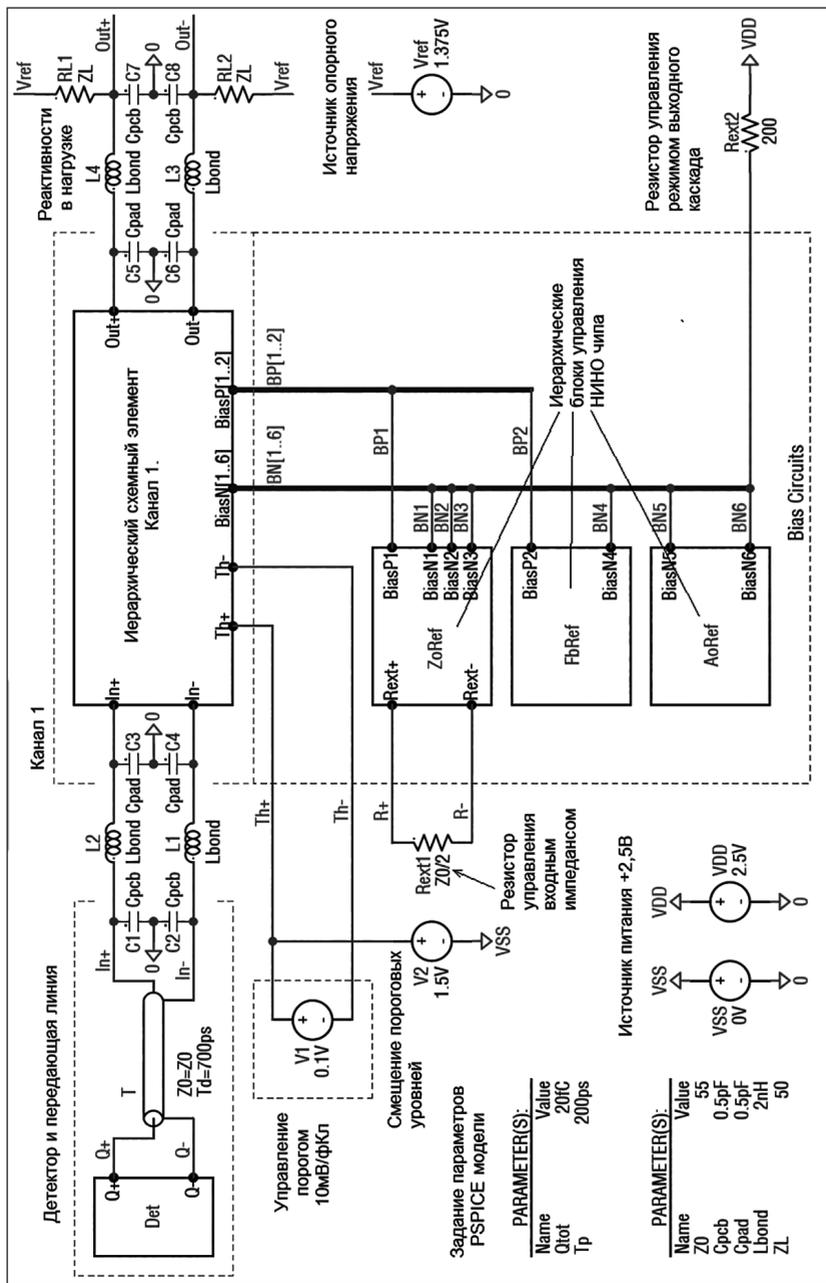


Рисунок 9. Полная PSPICE модель НИНО чипа, включающая модель детектора, линии связи с детектором, выходной нагрузки

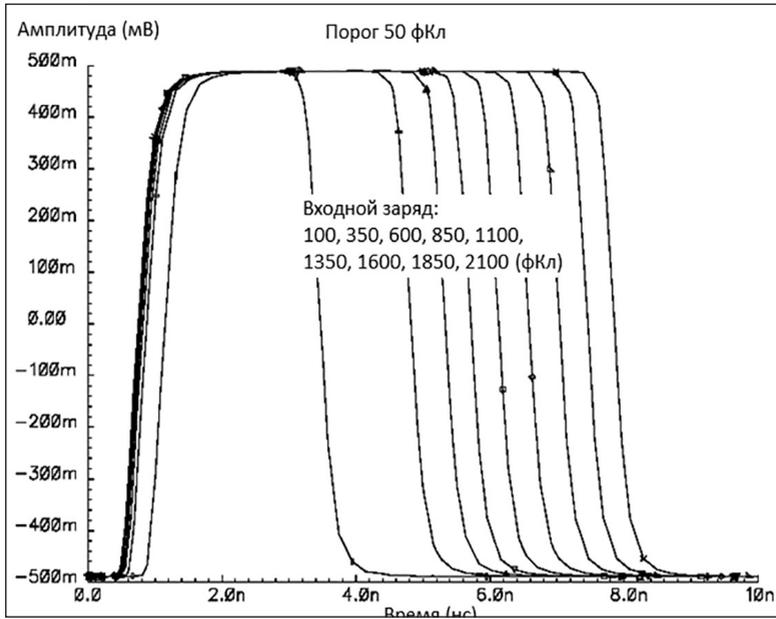
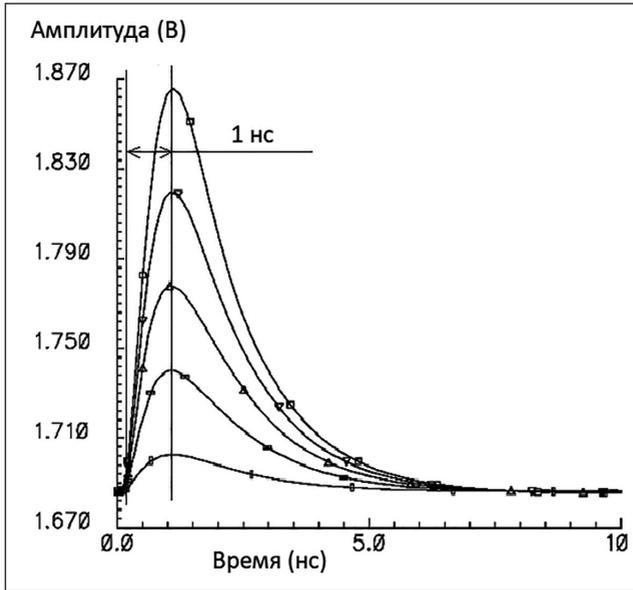


Рисунок 10. Результаты PSPICE моделирования NINO чипа: сверху – эпюры на-  
пряжения предусилителя, внизу — эпюры напряжений выходного каскада

ны способы согласования системы считывания с системами оцифровки данных, точного времени и выработки быстрых триггерных решений эксперимента ALICE [5].

### **Выводы к разделу 2 главы 3:**

1. Разработана первая в мире специализированная интегральная схема NINO для многоканальных времяпролетных приложений.
2. Введение дополнительных функций NINO чипа обеспечило возможность амплитудных измерений с использованием TOT метода.
3. На основе NINO чипа автором была построена времяпролетная система считывания эксперимента ALICE с числом каналов 160 тыс.

**В разделе 3 главы 3** описывается разработка системы считывающей электроники времяпролетного детектора и переднего годоскопа Forward Wall предназначенного для измерения энергий фрагментов ядер в области энергий 1,24 ГэВ/нуклон в эксперименте HADES (ГСИ, Германия) [15].

С целью замены устаревшей электроники проведены исследования и разработка 2304-канальной времяпролетной системы считывания сцинтилляционных детекторов эксперимента HADES. Эта же электроника считывания после соответствующей адаптации была использована для вновь созданной 288-канальной системы считывания сцинтилляционного годоскопа FW эксперимента HADES. Система считывания построена на основе NINO чипа и состоит из 128-канального накамерного модуля TOFAddOn и модуля оцифровки и передачи данных TRB2, образующих вместе 128-канальную единицу системы сбора данных. Временное разрешение времяпролетной системы и переднего годоскопа FW составило  $\approx 150$  пс и  $\approx 850$  пс, соответственно. [15].

На Рис.11 изображены 128-канальный модуль считывания TOFAddOn и двумерные спектры в качестве результатов тестирования сцинтилляционных элементов времяпролетной системы HADES на космических частицах (верхняя гистограмма), где выделяется линейный участок TOT характеристики от 1000 мВ и больше, и тест на радиоактивном источнике  $\text{Na}^{22}$  (нижняя гистограмма), где сиг-

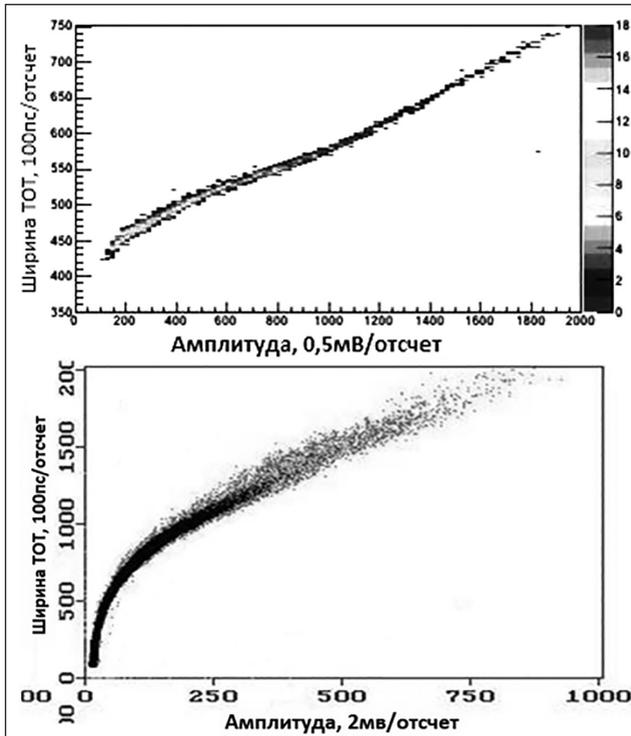
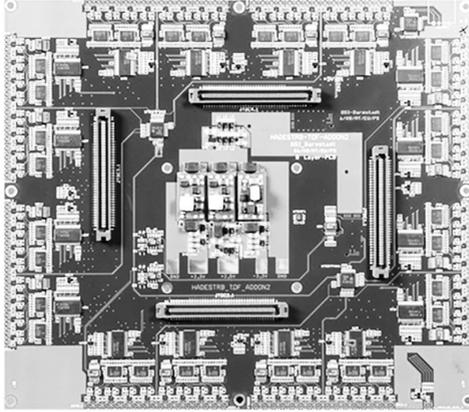


Рисунок 11. 128-канальный модуль считывания TOFAddOn (вверху) для FW годоскопа HADES с TOT функцией измерения амплитуд и двумерные спектры (TOT/ЦАП) измерений на космических частицах (в центре) и на радиоактивном источнике  $\text{Na}^{22}$  (внизу)

219	218	217	216	215	214	213	212	211	210	209		
230	229	228	227	226	225	224	223	222	221	220		
241	240	239	238	237	236	235	234	233	232	231		
247	246	245	154	153	152	151	150	149	148	147	146	145
			164	163	162	161	160	159	158	157	156	155
			174	173	172	171	170	169	168	167	166	165
253	252	251	176	175	174	173	172	171	170	169	168	167
			186	185	184	183	182	181	180	179	178	177
259	258	257	188	187	186	185	184	183	182	181	180	179
			198	197	196	195	194	193	192	191	190	189
			208	207	206	205	204	203	202	201	200	199
265	264	263	209	208	207	206	205	204	203	202	201	200
			219	218	217	216	215	214	213	212	211	210
271	270	269	229	228	227	226	225	224	223	222	221	220
			239	238	237	236	235	234	233	232	231	230
282	281	280	249	248	247	246	245	244	243	242	241	240
			259	258	257	256	255	254	253	252	251	250
293	292	291	269	268	267	266	265	264	263	262	261	260
			279	278	277	276	275	274	273	272	271	270
304	303	302	289	288	287	286	285	284	283	282	281	280
			299	298	297	296	295	294	293	292	291	290

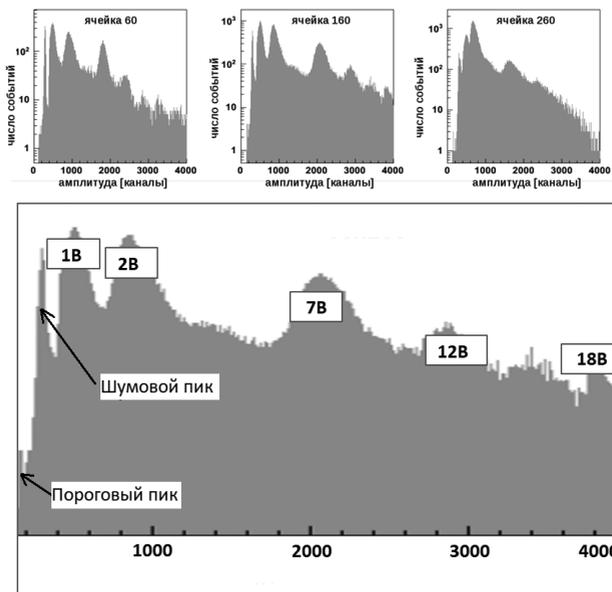


Рисунок 12. Структура годоскопа (вверху) и ТОГ спектры ячеек FW годоскопа и пересчет каналов ВЦП в амплитуды пиков при регистрации ядерных фрагментов ячейки 160, логарифмический масштаб оси Y, (внизу)

налы с детектора начинаются от порога срабатывания. Тесты подтвердили однозначность и непрерывность зависимости (TOT-зависимость) и обеспечили согласование диапазона сигналов с параметрами электронного тракта.

Экспериментальные данные, полученные в ходе физического сеанса Au+Au при энергии 1,24 ГэВ/нуклон с различных ячеек годоскопа, показаны на Рис.12. На гистограмме центральной ячейки типоразмера 160 каждому зарядовому пику поставлены в соответствие амплитуды ФЭУ, достигающие 20 В при пороге регистрации 35 мВ.

### **Выводы к разделу 3 главы 3:**

1. Впервые разработана и используется в эксперименте HADES электроника считывания на основе двухканального дискриминатора TOFAddOn с дополнительной функцией измерения амплитуд по TOT методу.
2. Применение новой электроники обеспечило времяпролетной системе HADES временное разрешение 150 пс и амплитудную коррекцию временного выбега по TOT методу, а переднему FW годоскопу HADES временное разрешение 850 пс и расширенный амплитудный диапазон.
3. Унификация считывающей электроники с другими детекторами эксперимента HADES обеспечили простоту адаптации и последующей работы за счет базового программного обеспечения.

**В главе 4** описываются исследования модифицированного TOT метода с двухканальной структурой и синусным формирователем.

Для снижения ошибки TOT метода необходимо, чтобы форма импульса аналогового формирователя была инвариантна к входному воздействию. Специально разработанный синусный формирователь, форма импульса которого 180 градусов от синусной функции (Рис.13 внизу), удовлетворил этим требованиям. На Рис.13 слева показана схема двухканального дискриминатора TOFAddOn [15], где быстрый канал обеспечивает точную временную привязку с собственным джиттером не хуже 15 пс, а медленный амплитудный канал с синусным формирователем реализует модифицированный TOT метод, обе-

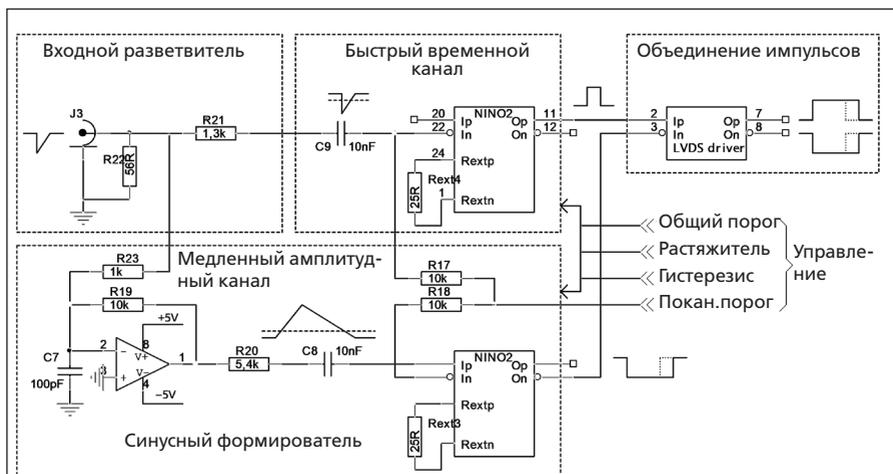


Рисунок 13. Упрощенная схема одного канала модуля TOFAddOn, реализующего модифицированный двухканальный TOT метод (вверху) и форма импульса синусного формирователя (внизу) при наложении входных импульсов

спечивающий однозначную зарядовую зависимость, низкую ошибку измерения и широкий динамически диапазон, необходимый при измерениях зарядов тяжелых ядерных фрагментов.

Как показано на Рис.14, модифицированный TOT метод с синусным формирователем имеет нелинейный участок в области порога

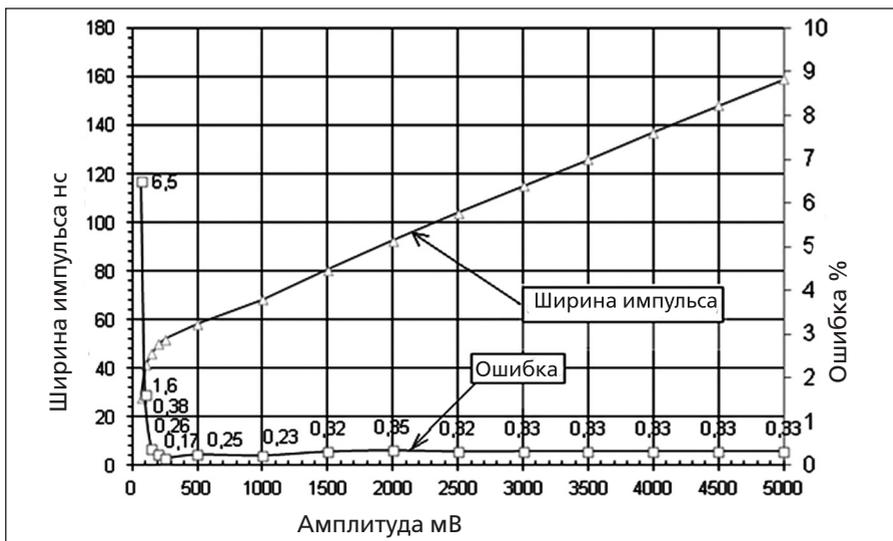


Рисунок 14. График TOT зависимости ширины импульса и ошибки измерения от амплитуды для модуля TOFAddOn

и не имеющий ограничения по амплитуде линейный участок. Измеренные величины линейности TOT характеристики показывают диапазон амплитуд до 25 В при постоянной ошибке около 0,3%. Ошибка на начальном нелинейном участке заметно больше по причине снижения скорости нарастания сигнала вблизи порога (формула 1), но эта область статистически мало значима и не определяет точность измерения в целом.

#### Выводы к главе 4

1. Впервые представлена методика разработки метода преобразования заряда во временной интервал (TOT метода) с использованием синусного преобразователя. Показаны причины возникновения ошибок измерений и способы их преодоления.
2. Разработана и используется в эксперименте HADES аналоговая электроника считывания с измерением амплитуд по TOT методу с расширенным диапазоном измеряемых амплитуд и точностью преобразования заряда во временной интервал около 0,3%, обеспечивающая во времяпролетной системе эксперимента HADES вре-

менное разрешение 150 пс, а в переднем FW годоскопе временное разрешение 850 пс и расширенный амплитудный спектр до 25 В.

**В Заключение** кратко сформулированы основные выводы диссертационной работы:

1. Разработана низкопороговая электроника считывания для тестирования камер РПС мюонного триггера эксперимента ATLAS, обеспечившая:

- достижение 100% эффективности многоканальных камер при минимальных величинах порога около 150 мкВ,
- детальное изучение влияния добавки SF<sub>6</sub> к рабочей газовой смеси на характеристики РПС,
- получение количественной картины распределения межэлектродных наводок в зависимости от конфигурации системы съёма сигналов.

2. Впервые разработана малошумящая электроника на основе принципа суммирования считывающих электродов, обеспечившая построение первой в мире времяпролетной системы на камерах РПС эксперимента HARP с разрешением 150 пс.

3. Разработана первая специализированная ИС ASIC NINO для времяпролетных применений с уникальными характеристиками и новым набором функций, и система считывания на 160 тыс. каналов на основе ASIC NINO, обеспечившая построение времяпролетной системы эксперимента ALICE с временным разрешением 95–100 пс.

4. Разработана система считывания переднего сцинтилляционного годоскопа FW эксперимента HADES с применением двухканальной структуры для оцифровки времени и амплитуды одним каналом ВЦП. Модернизированный TOT метод измерения амплитуд обеспечил однозначную зарядовую зависимость, низкую ошибку измерения и широкий динамический диапазон для измерений зарядов тяжелых ядерных фрагментов.

5. Впервые предложенный автором синусный формирователь для модернизации TOT метода позволил преодолеть основные проблемы метода, снизив ошибку до 0,3% и расширив диапазон измеряемых амплитуд.

## Список публикаций

1. **Усенко Е.А.** Низкопороговый дискриминатор для камер RPC // Приборы и техника эксперимента. — 2003. № 1. С.40–43.
2. Ajinenko I.V.,... **Usenko E.**, et al. Study of the  $K^- \rightarrow \mu^- \nu \pi^0$  decay. Feb 2002. 10 pp. Published in Phys.Atom.Nucl. 66 (2003) 105–109, Yad.Fiz. 66 (2003) 107-111 IHEP-2002-6.
3. Akindinov A.N.,... **Usenko E.** et al. Study of gas mixtures and ageing of the multigap resistive plate chamber used for the Alice TOF 2004. 5 pp.// Published in Nucl. Instrum. Meth. A533 (2004) 93–97.
4. Ammosov V.,... **Usenko E.**, Gapienko V., Ivanilov A., Sefkow F., Semak A., Sviridov Yu., Zaets V. Small pad RPCs as detector for high granularity digital hadron calorimetry. 2004. 9 pp.// Nucl. Instrum. Meth. A533 (2004) 130–138.
5. Akindinov A.N.,... **Usenko E.**, et al. Design aspects and prototype test of a very precise TDC system implemented for the multigap RPC of the ALICE-TOF. 2004. 5 pp. // Nucl. Instrum. Meth. A533 (2004) 178–182.
6. Anghinolfi F., **E. Usenko**, Jarron P., Martemyanov A.N., Wenninger H., Williams M.C.S., Zichichi A. NINO: An ultra-fast and low-power front-end amplifier/discriminator ASIC designed for the multigap resistive plate chamber. 2004. 5 pp. // Nucl. Instrum. Meth. A533 (2004) 183–187.
7. Anghinolfi F., **Usenko E.**, Jarron P. (CERN), Krummenacher F. (Smart Silicon Systems, Lausanne), Williams M.C.S. (INFN, Bologna). NINO: An ultrafast low-power front-end amplifier discriminator for the time-of-flight detector in the ALICE experiment. 2004. 5 pp. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 51 (2004) 1974-1978.
8. Akindinov A.N., Usenko E., et al. Operation of the multigap resistive plate chamber using a gas mixture free of flammable components. 2004. 5 pp. // Nucl. Instrum. Meth. A532 (2004) 562–565.
9. Akindinov A.V., ... **Usenko E.** et al. Results from a large sample of MRPC-strip prototypes for the ALICE TOF detector. 2004. 11 pp. // Nucl. Instrum. Meth. A532 (2004) 611–621.
10. Akindinov A.,... **Usenko E.**, et al. The MRPC detector for the ALICE Time Of Flight system: Final design and performances. 2006. 6 pp. // Nucl. Phys. Proc. Suppl. 158 (2006) 60–65.

11. Akindinov A., ... **Usenko E.**, et al. Quality assurance procedures for the construction of ALICE TOF detector». 2006. 5 pp. // Nucl. Phys. Proc. Suppl. 158 (2006) 78–82
12. Ammosov V., **Usenko E.**, Gapienko V., Ivanilov A., Semak A., Sviridov Yu., Zaets V. Study of RPCs with 1x1 cm<sup>2</sup> Read-Out Pads Operated in the Saturated Avalanche Mode 2007. 15 pp. // IHEP-2007—22. // Eur. Phys. J. C64 (2009) 181–241.
13. Ammosov V., ... **Usenko E.**, et al. The HARP resistive plate chambers: Characteristics and physics performance», . 2009. 5 pp. Published in Nucl. Instrum.Meth. A602 (2009) 639-643.
14. Ammosov V.V., **Usenko E.A.** Gavrishchuk O.P., Gapienko V.A., Zaets V.G., Kuzmin N.A., Sviridov Yu.M., Semak A.A., Sychkov S.Ya., Yukaev A.I. Time resolution of a 6-gap resistive plate chamber with strip readout. 2010. 5 pp. // Instrum .Exp. Tech. 53 (2010) 175–179; Prib. Tekh. Eksp. 2010 (2010) no.2, 20–24.
15. Andreeva O.V.,... **Usenko E.**, et al. Forward scintillation hodoscope for nuclear fragment detection at the high acceptance dielectron spectrometer (HADES) setup. 2014. 17 pp. // Instrum. Exp. Tech. 57 (2014) 103–119.

Усенко  
Евгений Анатольевич  
Разработка  
аналоговой электроники считывания  
многоканальных физических детекторов

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук на тему

Ф-т 60x84/16 Уч.-изд.л. 1,1 Зак. № 22439 Тираж 80 экз. Бесплатно

Печать цифровая

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт ядерных исследований Российской академии наук

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