

«УТВЕРЖДАЮ»

**Проректор
Московского государственного
университета имени М. В. Ломоносова
профессор А.А. Федянин**

« 26 » апреля 2019 г.

О Т З Ы В

ведущей организации - Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» на диссертацию УСЕНКО Евгения Анатольевича «Разработка аналоговой электроники считывания многоканальных физических детекторов», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики.

Диссертация Е.А. Усенко посвящена разработке многоканальной аналоговой части электроники считывания для детекторов физики высоких энергий с высокой гранулярностью. В работе рассматривается электроника считывания отличающаяся высокими скоростными параметрами и одновременно высоким временным разрешением, что принципиально для времяпролетных систем в современных установках. В диссертации подробно рассмотрены разработки т.н. накамерной электроники обеспечивающей полосу пропускания до 1000 МГц. С одной стороны, детекторная камера с накамерной электроникой неразрывно связаны конечными параметрами детектора в целом, и в общем случае не могут быть успешно применены порознь. А с другой стороны, совокупность специфических требований к считывающей электронике с большим числом каналов приводит к необходимости рассмотрения её как самостоятельной системы и определяет новые принципы ее проектирования.

Актуальность вышеперечисленного и определяет предмет и тематику исследований, проведённых в данной диссертационной работе.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Каждая из глав содержит краткие выводы. Основные выводы диссертации приведены в заключении.

Объём диссертации 155 страниц, содержит 88 рисунков, 7 таблиц. Список литературы содержит 29 наименований.

Во *введении* приедены основные цели диссертационной работы, положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая ценность, личный вклад автора, а так же рассмотрена актуальность проблемы.

В *первой главе*, которое можно рассматривать как краткий обзор, обсуждаются исследования и проблемы в области создания быстродействующей, многоканальной и прецизионной электроники для экспериментов физики высоких энергий, направленные на создание новых крупных установок. 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.

Во *второй главе* описывается разработка специализированной низкопороговой электроники для триггерных мюонных систем экспериментов ATLAS (ЦЕРН, Швейцария) и ИСТРА-М (ИФВЭ и ИЯИ РАН). Низкопороговый усилитель-дискриминатор для резистивных плоских камер (РПК) эксперимента ATLAS был выполнен в виде накамерной 16-канальной карты. При исследовании прототипов РПК 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. Для снижения шумов усилительного в эксперименте ATLAS применены схемотехнические решения, которые позволили разделить задачи построения оптимально согласованного по шумам входного каскада и получение большого коэффициента усиления.

В рамках развития эксперимента ОКА (ИСТРА-М, ИФВЭ и ИЯИ РАН) был применен входной трансимпедансный каскад, обеспечивший работу камер при порогах ниже 1 мкА. В свою очередь работа при низких порогах и высоком усилении требует учета времени восстановления электронного канала, которое было изучено и минимизировано при расчете схемы.

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 *третьей главе* описывается разработка систем считывания времяпролётных (TOF) детекторов экспериментов HARP, ALICE и NADES.

При разработке электроники считывания эксперимента HARP были проведены исследования метода суммирования сигналов с нескольких (до восьми) электродов (стрипов) и доказана возможность построения

времяпролетных детекторных систем с суммированием считывающих электродов и высоким временным разрешением около 150 пс. На основе этих исследований создана времяпролетная детекторная система эксперимента NARP с временным разрешением 146 пс, покрывающая площадь 8 м², содержащая 2944 считывающих стрипов, 368 сумматоров и каналов ВЦП и АЦП.

Далее рассматривается разработка специализированной ИМС NINO для времяпролетной системы эксперимента ALICE. На основе СИМС NINO автором была разработана система считывания на 160 тыс. каналов, обеспечивающая временное разрешение ~ 100 пс для TOF системы эксперимента ALICE, используемая для идентификации пионов и каонов с импульсами до ~ 2,5 ГэВ/с и протонов до ~ 4 ГэВ/с. Здесь же описаны принципы построения и структура системы считывания, а также составляющие ее подсистемы. Показаны способы согласования системы считывания с системами оцифровки данных, точного времени и выработки быстрых триггерных решений эксперимента ALICE.

В эксперименте HADES разработана электроника считывания на основе двухканального дискриминатора TOFAddOn с дополнительной функцией измерения амплитуд по TOT (время над порогом) методу. Применение новой электроники позволило обеспечить во времяпролетной системе HADES временное разрешение 150 пс и амплитудную коррекцию временной ошибки по TOT методу, а в переднем годоскопе эксперимента HADES временное разрешение 850 пс и расширение динамического диапазона.

В *четвертой главе* описываются исследования модифицированного TOT метода с двухканальной структурой и синусным формирователем. Представлена методика разработки метода преобразования заряда во временной интервал (TOT метод) с использованием синусного преобразователя. Показаны причины возникновения ошибок измерений и способы их преодоления.

Для эксперимента HADES разработана 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 временное разрешение 150 пс, а в переднем годоскопе временное разрешение 850 пс и расширенный до 25 В динамический диапазон.

В *заключении* приведены основные результаты и выводы работы.

Все приведенные в заключении положения являются полностью обоснованными и подтвержденными.

Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 15 статьях в ведущих российских и зарубежных журналах, входящих в список ВАК и

международные базы данных Web of Science и Scopus, и доложены на трех международных конференциях.

Диссертант выполнил очень большой объем работы на современном уровне, который характеризует его как физика-экспериментатора высокой квалификации. Достоверность результатов, представленных в диссертации, не вызывает сомнений. Они были опубликованы и доложены на международных конференциях.

Научная новизна и практическая ценность настоящей диссертации состоят в том, что 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).
- использован принцип суммирования зарядов на основе 8-канального суммирующего предусилителя для системы считывания времяпролетной системы эксперимента HARP (ЦЕРН, Швейцария) с временным разрешением 150 пс,
- разработана специализированная ИС для времяпролетных применений ASIC NINO с уникальными характеристиками и новым набором функций.
- разработана многоканальная накамерная электроника на 160 тыс. каналов считывания камер РПС для времяпролетной системы эксперимента ALICE (ЦЕРН, Швейцария):
- разработана двухканальная структура и TOT методом измерения заряда в системе считывания переднего сцинтилляционного годоскопа FW эксперимента NADES (ГСИ, Германия), обеспечившая цифровую обработку временной и амплитудной информации в одном канале ВЦП.
- предложенный автором синусный формирователь для модернизации TOT метода измерения зарядов обеспечил снижение ошибки метода до 0,3% и его расширенное использование.

Значимость полученных автором диссертации результатов определяется актуальностью задачи диссертации и большим интересом к многоканальным системам считывания и обработки сигналов для крупномасштабных экспериментальных установок в физике высоких энергий и релятивистской ядерной физике, таких как, например, ATLAS, CMS, ALICE, LHCb на Большом адронном коллайдере (БАК), ЦЕРН (Швейцария); NADES, CBM, GSI (Германия);

Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

В целом диссертация оставляет впечатление законченного исследования, проведенного на высоком уровне.

Результаты диссертации рассмотрены и одобрены на заседании Семинара отдела экспериментальной физики высоких энергий НИИЯФ МГУ, 01 октября 2018 года.

К недостаткам следует отнести некоторое количество мелких неточностей и выражений, которые являются кальками перевода с английского языка. Например, на стр. 23: «Высоковольтное напряжение», стр. 28: «Достичь столь высоких параметров аналогового тракта в их совокупности весьма затруднительно, а значит, традиционными методами проектирования эта цель недостижима», стр. 70: «разность потенциалов высокого напряжения» и др. Некоторые рисунки (рис.29, 46, 58, 73, 76) не читаемы, или читаемы с большим трудом, хотя в автореферате они представлены в другом масштабе и вполне разборчивы. Автор часто применяет слова: «чип», ASIC, СИС вместо принятого ИМС или СИМС. Для обозначения резистивных плоских камер используется то аббревиатура РПС, то РПК.

На стр. 34 отсутствуют ссылки на работы – «Результаты этих исследований представлены в работах []», при этом в автореферате такой ошибки нет.

На стр. 29 приведено, как мне кажется, спорное утверждение: «Улучшить шумовые свойства интегральных схем 171УВ2 (российский аналог популярной ИС усилителя mA733) и достичь предельных значений приведенных к входу шумов возможно, изменив стандартную схему включения его входного дифференциального каскада и образовав каскодную схему с внешним малошумящим транзистором». Включение дополнительного малошумящего транзистора ни коим образом не влияет на «шумовые свойства» самой ИМС, а скорее это схемотехническое решение, которое улучшает шумовые параметры аналогового тракта.

В целом диссертация оформлена не аккуратно, разметка текста практически отсутствует, главы не выделены, а на стр. 21-22 подзаголовки раздела начинаются на стр. 21 и заканчиваются на стр.22.

Часто используются либо не общепринятые термины, либо термины понятные только узким специалистам, что несколько затрудняет восприятие работы.

Указанные выше замечания не сказываются на значимости и ценности диссертационной работы.

Таким образом, диссертация Е.А. Усенко «Разработка аналоговой электроники считывания многоканальных физических детекторов» соответствует всем критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, установленным в «Положении о порядке присуждения ученых степеней», утверждённом постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842 с дополнениями и изменениями от 30.07.2014 № 723, от 21.04.2016 № 335, от 02.08.2016 № 748, от 29.05.2017 № 650, от 28.08.2017 № 1024, от 01.10.2018 № 1168, а сам

УСЕНКО Евгений Анатольевич, безусловно, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 — приборы и методы экспериментальной физики.

Отзыв составил

Заведующий лабораторией, отдела экспериментальной физики высоких энергий НИИЯФ МГУ,
доктор физ.-мат. наук

Меркин М.М.

Заведующий отделом экспериментальной физики высоких энергий НИИЯФ МГУ,
профессор

Боос Э.Э.

Директор НИИЯФ МГУ
профессор

Панасюк М.И.

СВЕДЕНИЯ О ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Название: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына (сокращенное название: НИИЯФ МГУ)

Структурное подразделение: Отдел экспериментальной физики высоких энергий

Тел. +7(495)939-18-18; e-mail: info@sinp.msu.ru

Почтовый адрес: 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 2.

Список избранных публикаций сотрудников организации за 2014–2018 годы (не более 15 публикаций):

1. First results of the cosmic ray NUCLEON experiment

Atkin E., Bulatov V., Dorokhov V., Gorbunov N., Filippov S., Grebenyuk V., Karmanov D., Kovalev I., Kudryashov I., Kurganov A., Merkin M., Panov A., Podorozhny D., Polkov D., Porokhovoy S., Shumikhin V., Sveshnikova L., Tkachenko A., Tkachev L., Turundaevskiy A., Vasiliev O., Voronin A. Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, издательство Institute of Physics (United Kingdom), том 2017, № 7, с. 20

2. Performance of the LHCb Vertex Locator

Bogdanova G., Korolev M., Leflat A., Merkin M., Nikitin N., Volkov V.Yu, Zverev E., et.al Journal of Instrumentation, издательство Institute of Physics (United Kingdom), том 9, с. 09007

3. Complex function block of processing and transferring asynchronous data for the IC of reading out the signals of multichannel detectors

Shumkin O.V., Normanov D.D., Ivanov P.Ya, Atkin E.V., Voronin A.G.

Journal of Physics: Conference Series, издательство Institute of Physics (United Kingdom), том 798, № 1, 012195, с. C16-10-10.2 DOI

4. Construction and Response of a Highly Granular Scintillator-based Electromagnetic Calorimeter Baranova N., Boos E., Gladilin L., Karmanov D., Korolev M., Merkin M., Voronin A., et.al. arXiv:1707.07126

5. ASIC for calorimetric measurements in the astrophysical experiment NUCLEON

Atkin E., Voronin A., Karmanov D., Kudryashov I., Kovalev I., Shumikhin V.

Journal of Physics: Conference Series, издательство Institute of Physics (United Kingdom), том 675, с. 042036

6. Development and experimental study of the readout ASIC for muon chambers of the CBM experiment Atkin E., Ivanov V., Ivanov P., Khanzadeev A., Malankin E., Normanov D., Roshchin E., Samsonov V., Shumikhin V., Voronin A. *Journal of Instrumentation*, издательство Institute of Physics (United Kingdom), том 11, № 1, с. C01084
7. Multichannel readout ASIC design flow for high energy physics and cosmic rays experiments Voronin A., Malankin E. *Journal of Physics: Conference Series*, издательство Institute of Physics (United Kingdom), том 675, с. 042034
8. Testing the prototype detectors for the muon tracking system of the CBM experiment at the CERN PS accelerator Atkin E.V., Voronin A.G., Ivanov V.V., Komkov B.G., Kudin L.G., Malankin E.Z., Nikulin V.N., Roshchin E.V., Samsonov V.M., Shumikhin V.V., Khanzadeev A.V. *Instruments and Experimental Techniques*, издательство Maik Nauka/Interperiodica Publishing (Russian Federation), № 1, с. 53-59
9. Investigation of neutral-kaon production in pC, pSi and pPb Collisions at 70 GeV/c
Ardashev E.N., Basiladze S.G., Bogdanova G.A., Vishnevskaya A.M., Volkov V.Yu, Voronin A.G., Grishkevich Ja V., Zverev E.G., Karmanov D.E., Leflat A.K., Merkin M.M., et al. *Physics of Atomic Nuclei*, издательство Maik Nauka/Interperiodica Publishing (Russian Federation), том 77, № 5, с. 605-612
10. Detection of Charged Charmed D^\pm Mesons in Proton–Nucleus Interactions at 70 GeV with the SVD-2 Setup Ardashev E.N., Basiladze S.G., Bogdanova G.A., Visnevskaya A.M., Volkov V.Yu, Voronin A.G., Grishkevich Ja V., Zverev E.G., Karmanov D.E., Leflat A.K., Merkin M.M., et al. *Physics of Atomic Nuclei*, издательство Maik Nauka/Interperiodica Publishing (Russian Federation), том 77, № 6, с. 716-724