

Разработка аналоговой электроники считывания многоканальных физических детекторов.

Представление к защите диссертации на соискание ученой
степени кандидата физико-математических наук

Е.А. Усенко.

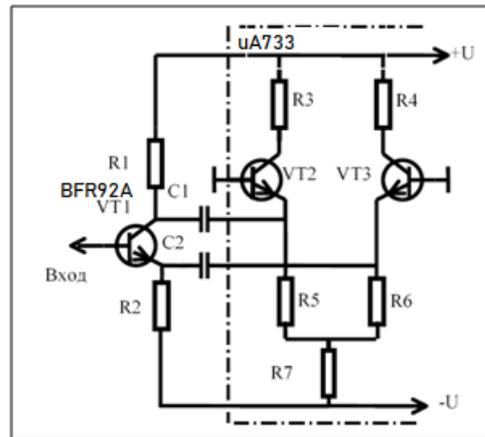
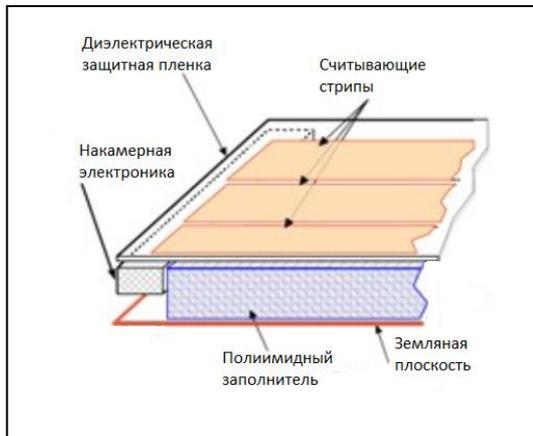
На защиту выносятся следующие результаты:

- 1. Разработка малошумящей аналоговой электроники для методических исследований камер РПС для мюонного детектора эксперимента ATLAS (CERN, Switzerland) и пропорциональных камер эксперимента ИСТРА-ОКА (ИЯИ РАН - ИФВЭ, Протвино).*
- 2. Разработка первой времяпролётной системы считывания камер РПС основанной на принципе суммирования считывающих электродов для эксперимента HARP (CERN, Switzerland).*
- 3. Разработка первой специализированной аналоговой интегральной схемы 8-ми канального усилителя-дискриминатора для времяпролётных применений ASIC NINO.*
- 4. Разработка 160 тыс. канальной времяпролётной аналоговой системы считывания МРПС счётчиков на основе ASIC NINO для эксперимента ALICE (CERN, Switzerland).*
- 5. Разработка системы считывания переднего сцинтилляционного годоскопа эксперимента HADES (GSI, Germany) на основе двухканальной считывающей структуры и TOT метода измерения амплитуд.*
- 6. Модернизация TOT метода преобразования заряда во временной интервал синусным формирователем для снижения погрешности метода и расширения динамического диапазона, использование для времяпролётных и калориметрических детекторов в экспериментах HADES (GSI, Germany) и BM&N (ОИЯИ Дубна).*

1. Разработка малошумящей аналоговой электроники для исследований камер РПС мюонного детектора эксперимента ATLAS (CERN, Switzerland) и мюонных камер эксперимента ИСТРА (ИЯИ РАН-ИФВЭ, Протвино).

Исходные данные:

- волновое сопротивление стрипа 25 Ом согласование с двух сторон,, ширина стрипов 28 мм, длина от 1 до 2 м, считывание с одной стороны,
- длительность импульса 1,5-2 нс,
- Минимальный заряд выделенный в камере около 0,3 нКл, (170 мкВ на стрипе)



Компенсация шумов на 3 дБ (в $\sqrt{2}$ раз) описывается формулой:

$$e_{\text{ш.вх}} = (e_{\text{ш}} + 2e_{\text{ш}}/K_i)/\sqrt{2}$$

где, $e_{\text{ш.вх}}$ – Э.д.с. шума на входе каскада, $e_{\text{ш}}$ – Э.д.с. шума каскада, K_i – коэффициент передачи по току.

Конструкция камеры РПС и входного каскада малошумящего предусилителя для мюонной системы эксперимента ATLAS

Разработана электроника считывания с требуемыми параметрами:

- порог считывания от 100 мкВ, собственный шум 25 мкВ
- временной сдвиг 1-2 нс во всем диапазоне сигналов с камеры,
- коэффициент усиления по напряжению $K=300$.

1. Разработка малошумящей аналоговой электроники для исследований камер РПС мюонного детектора эксперимента ATLAS (CERN, Switzerland) и мюонных камер эксперимента ИСТРА (ИЯИ РАН-ИФВЭ, Протвино).

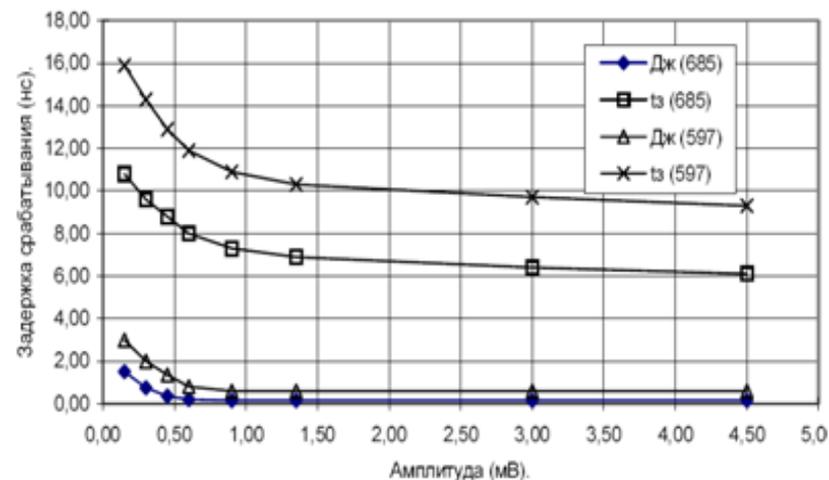
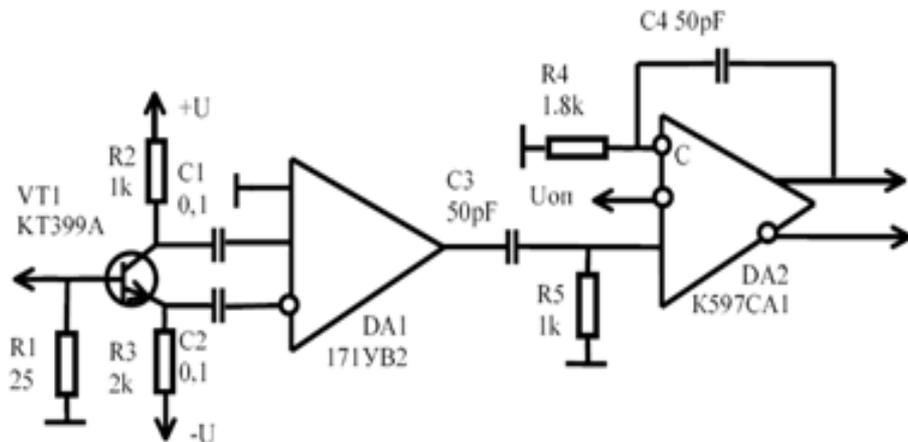
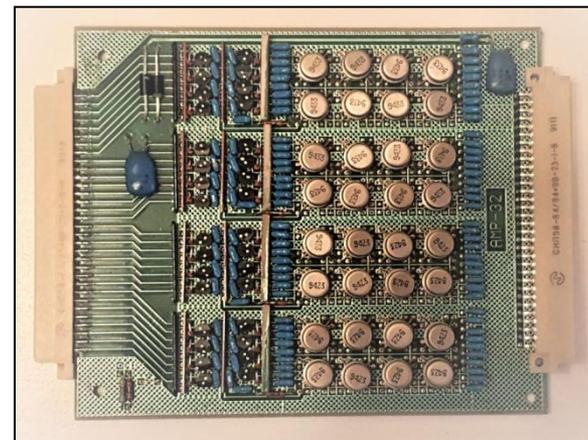


Схема низкого порога дискриминатора (слева) и график зависимости времени задержки срабатывания и джиттера от входного напряжения (справа).

32-канальное накамерное исполнение низкого порога дискриминатора для пропорциональных камер совместного эксперимента ИСТРА-ОКА (ИЯИ РАН и ИФВЭ Протвино), реализующий способ построения системы считывания с распределенным усилением. Приведенный ко входу шумовой заряд 3000-3600 электронов, порог срабатывания системы < 1 мкА.



1. Разработка малошумящей аналоговой электроники для исследований камер РПС мюонного детектора эксперимента ATLAS (CERN, Switzerland) и мюонных камер эксперимента ИСТРА (ИЯИ РАН-ИФВЭ, Протвино).

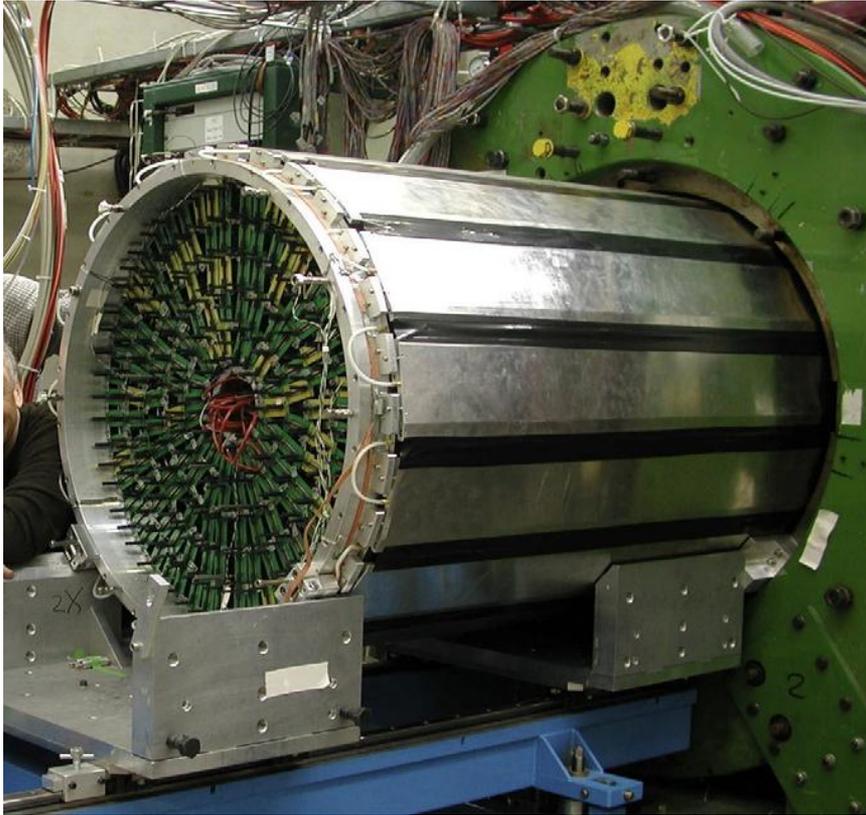
Выводы:

Низкопороговая электроника считывания использовалась для проведения следующих исследований камер РПС эксперимента АТЛАС (ЦЕРН) :

- обеспечены исследования выбора газовой смеси;*
- проведены исследования взаимовлияния стрипов (cross talking) для различных конструкций камер РПС, использованных в мюонной системе эксперимента АТЛАС (ЦЕРН);*
- использована в качестве прототипа интегральной схемы «DIE» для мюонной системы эксперимента АТЛАС (ЦЕРН).*

Дополнительное применение в системе считывания пропорциональных камер, работающих с высокими пучковыми нагрузками в эксперименте ИСТРА – ОКА (ИЯИ РАН-ИФВЭ).

2. Разработка и создание первой в мире времяпролётной системы на основе MGRPC для эксперимента HARP (CERN, Switzerland) и системы считывания на основе 8-ми канального суммирующего предусилителя.



ТОФ система эксперимента HARP PS-214:

- 30 камер в проеме между магнитом и камерами TPC,
- 16 камер передней плоскости перед 1st DrCH.

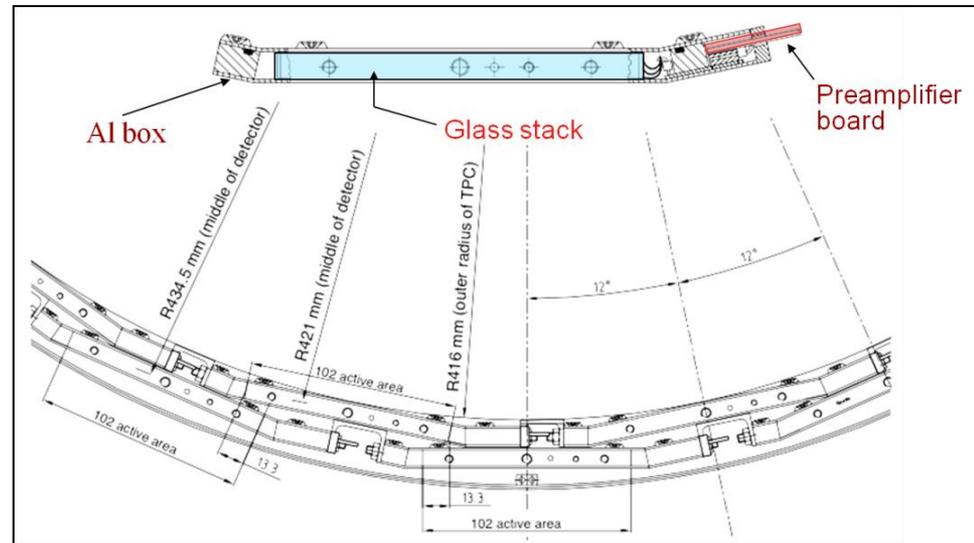
Общее число каналов считывания: 368

Площадь покрытия: 8 m²

Измерение времени пролета на базе 0.4–2m
for e/π of < 300 MeV/c .

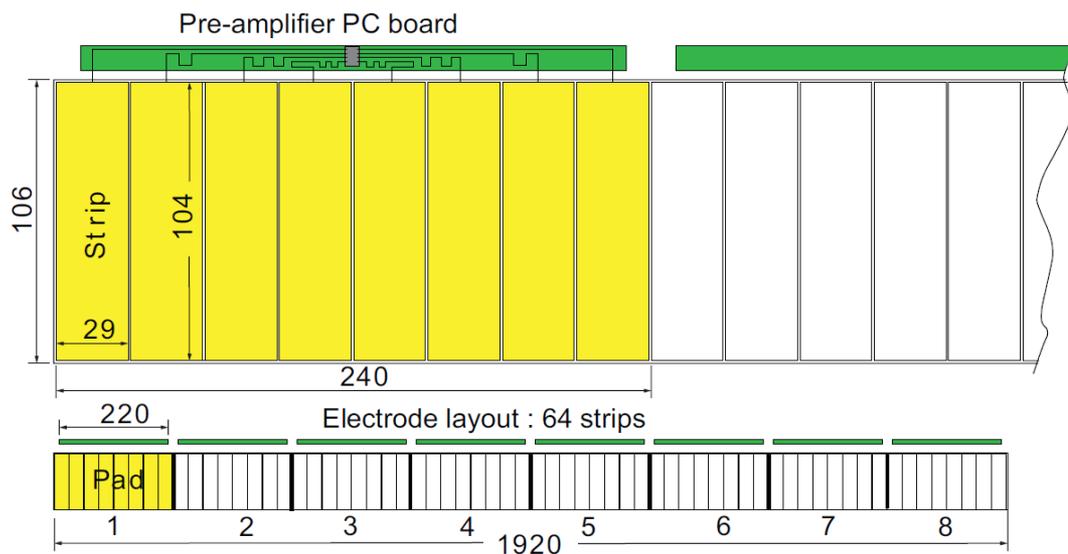
Требуемое временное разрешение: 200 ps,

Получено временное разрешение: 150 ps.

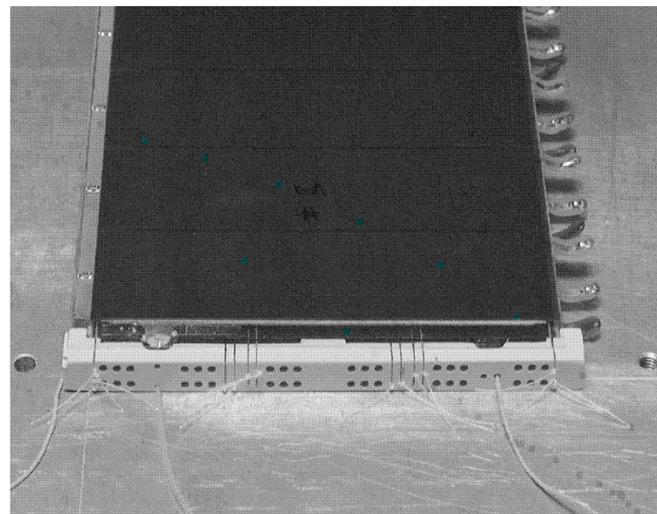


2. Разработка и создание первой в мире времяпролётной системы на основе MGRPC для эксперимента HARP (CERN, Switzerland) и системы считывания на основе 8-ми канального суммирующего предусилителя.

Структура считывания одной камеры РПС при помощи суммирования 8-ми стрипов. Размер области суммирования 240x106x29 мм,



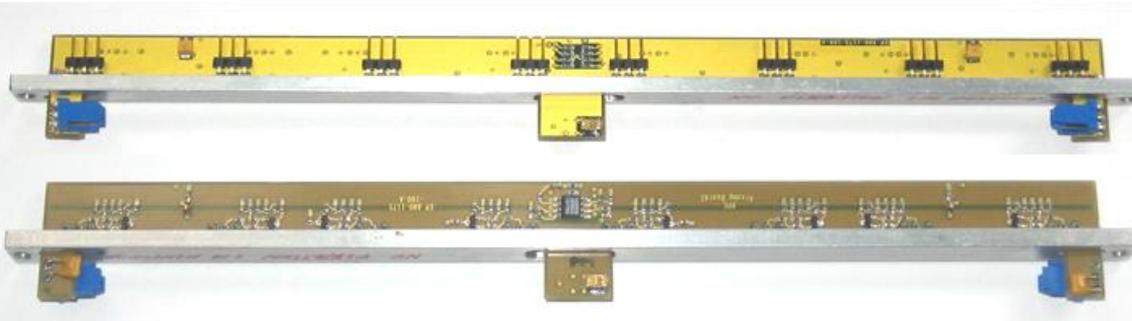
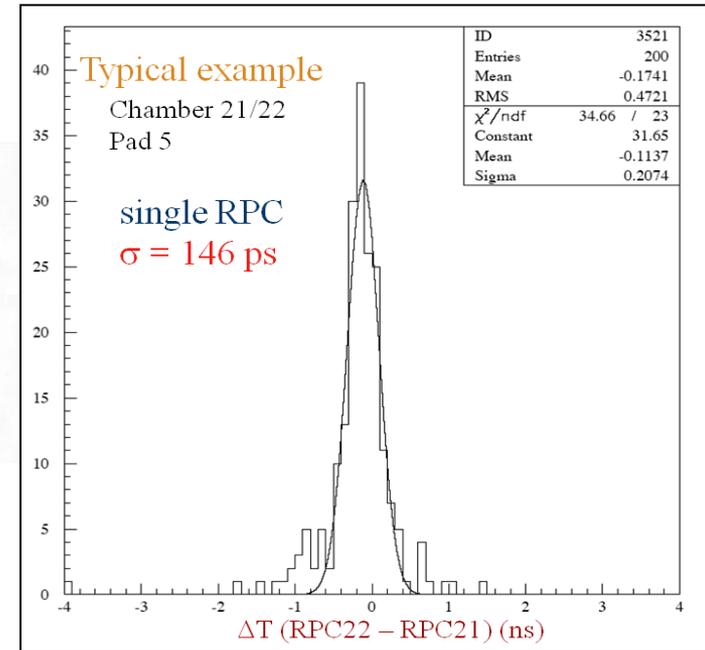
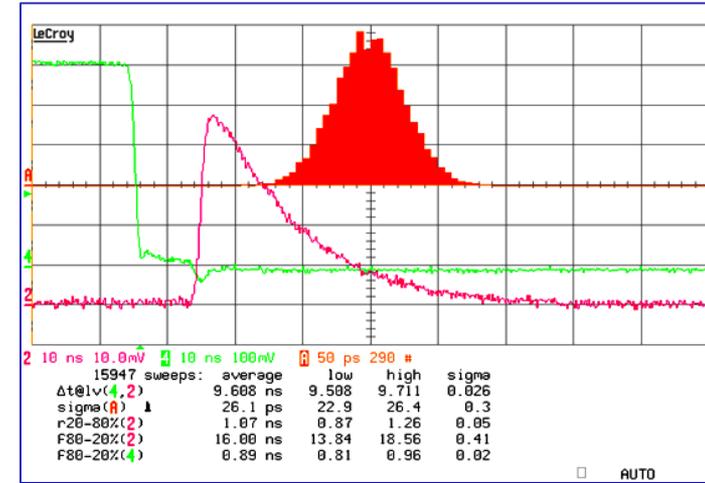
Фотография камеры РПС перед монтажом в бокс. Справа медные лепестки сигнальных электродов для соединения с сумматором.



2. Разработка и создание первой в мире времяпролётной системы на основе MGRPC для эксперимента HARP (CERN, Switzerland) и системы считывания на основе 8-ми канального суммирующего предусилителя.

Разработка суммирующего предусилителя.

Впервые применение суммирующего предусилителя с собственным джиттером 26 пс обеспечило возможность построения времяпролётной системы с временным разрешением 150 пс при снижении количества каналов регистрации в 8 раз.



Накамерный 8-канальный суммирующий предусилитель для времяпролётных камер RPC эксперимента HARP.

2. Разработка и создание первой в мире времяпролётной системы на основе MGRPC для эксперимента HARP (CERN, Switzerland) и системы считывания на основе 8-ми канального суммирующего предусилителя.

Выводы:

- Впервые исследован принцип и показана возможность создания времяпролётного детектора, основанного на суммировании сигналов с 8-ми считывающих электродов,
- На конкурсной основе разработан внутрикамерный суммирующий предусилитель с собственным временным джиттером 26 пс,
- На основе принципа суммирования электродов создана времяпролётная система эксперимента HARP с временным разрешением 150 пс, покрывающая площадь 8 м² и содержащая 2944 считывающих стрипов, 368 накамерных сумматоров и 368 каналов ВЦП и АЦП.

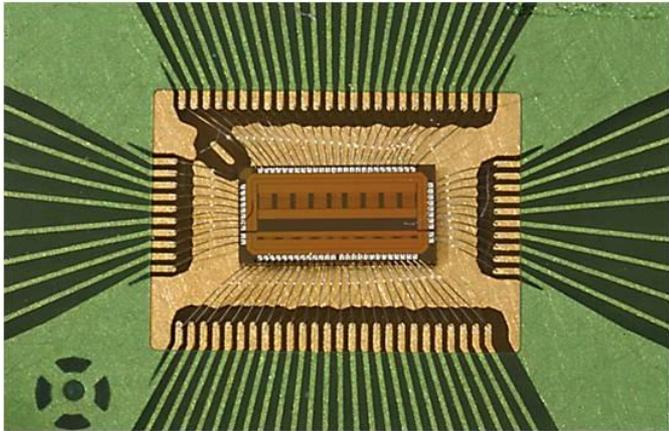
3. Разработка аналоговой специализированной интегральной схемы NINO 8-ми канального усилителя-дискриминатора предназначенного для времяпролётной системы ALICE (CERN, Switzerland).

- цилиндрическая поверхность детектора **MGRPC** расположена внутри магнита, площадь **160 м²**,
- структура детектора разбита на **18 секторов и 5 типов модулей**,
- общее число супермодулей **90 содержат 1674 MGRPC (камер)**,
- каждая камера **MGRPC (strip)** считывает **96 pads**,
- Общее число каналов считывания **160 704 channels!**



3. Разработка аналоговой специализированной интегральной схемы NINO 8-ми канального усилителя-дискриминатора для времяпролётной системы эксперимента ALICE (CERN, Switzerland).

ASIC NINO без корпуса первой версии



ASIC NINO топология, один канал, предусилитель, дискриминатор.



Таблица требуемых параметров ASIC NINO с тремя приоритетами разработки

1.1 Detector & related transmission line

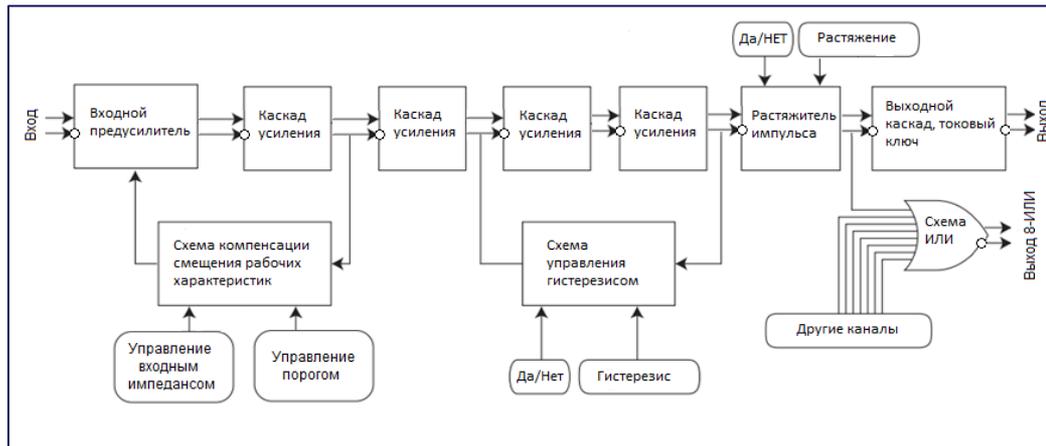
Parameter	Value	Remark
Detector capacitance	10 pF	
Maximum signal	1.5 pC	
Signal rise time	< 200 ps	
Transmission line impedance	55 Ω	Two 110 Ω lines in parallel
Transmission line length	< 20 cm	

1.2 Front-end ASIC specifications

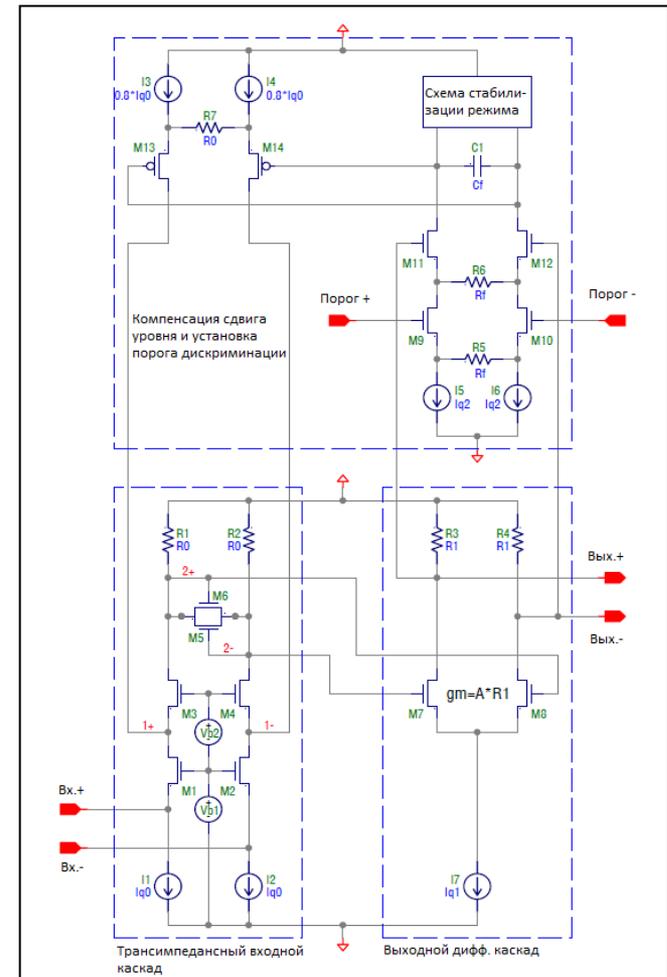
Parameter	Value	Remark
Peaking time	1 ns	1 st priority spec
Linear dynamic range	0 to 100 fC	
Saturation level	> 100 fC	
Maximum signal	1.5 pC	
Noise	< 5'000 e- RMS	2 nd priority spec
Jitter	< 50 ps	
Time walk	< 50 ps	
Power consumption	< 30 mW	3 rd priority spec
Discriminator threshold	5 fC to 50 fC	Externally adjustable
Input impedance (differential)	55 Ω	Matched to the transmission line $Z_0 = 55 \Omega$
Output interface (differential)	LVDS	User-configurable with external components

3. Разработка аналоговой специализированной интегральной схемы NINO 8-ми канального усилителя-дискриминатора для времяпролётной системы эксперимента ALICE (CERN, Switzerland).

Структурная блок схема канала ASIC NINO
Технология CMOS IBM 0,25 μm



CADENCE модель входного каскада ASIC NINO со схемой стабилизации



NINO ASIC чип с новыми свойствами:

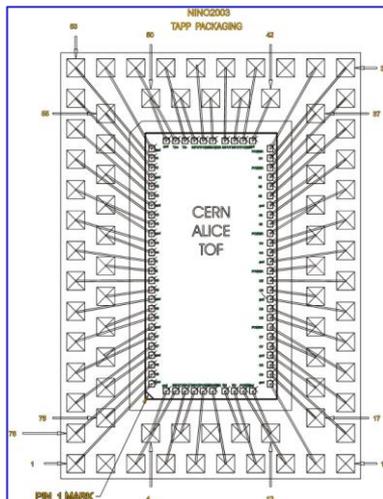
- 5 пс собственный джиттер,
- Схема стабилизации режимов работы,
- TOT функция амплитудного анализа,
- Растяжитель длительности импульса,
- Гистерезис пороговой характеристики,
- Регулировка входного импеданса.

3. Разработка времяпролётной системы считывания МРПС счётчиков на основе ASIC NINO для эксперимента ALICE (CERN, Switzerland).

24-канальная FEE карта ALICE TOF



Последняя версия НИНО чипа в корпусе TAPP76



Система считывания ALICE TOF:

- 160 тыс. каналов времяпролётной системы считывания ALICE на основе NINO чипа,
- TOT функция амплитудного анализа,
- Система точного времени с разрешением 12 пс,
- Система тестирования камер на 160 тыс. каналов,
- Выработка кластерного сигнала 6660-ИЛИ

Центральный модуль ALICE TOF, содержит 20 камер с числом каналов 1920 и покрытием 1.76 м²



3. Разработка аналоговой специализированной интегральной схемы NINO 8-ми канального усилителя-дискриминатора для времяпролётной системы эксперимента ALICE (CERN, Switzerland).

Выводы :

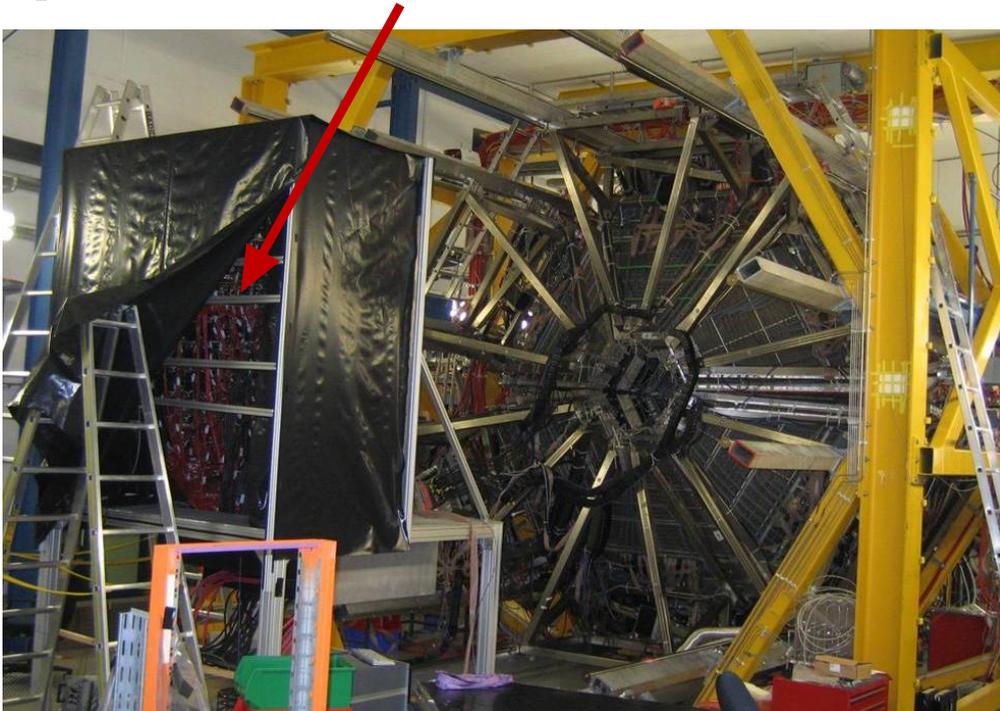
- Разработана первая специализированная интегральная схема ASIC NINO для времяпролётных применений для эксперимента ALICE.
- Применен ТОТ метод преобразования заряда во временной интервал, необходимый для построения больших систем считывания.
- Спроектирована и построена аналоговая система считывания детектора TOF с числом каналов 160 тыс. для эксперимента ALICE (ЦЕРН, Швейцария),
- Регулировка входного импеданса ASIC NINO обеспечила индивидуальную подстройку под различные условия связи с детектором в реальной системе.
- Регулировка гистерезиса придала системе устойчивость к шумам и помехам.
- Разработанная времяпролётная система обеспечила разрешение около 80 пс.

4. Разработка системы считывания переднего сцинтилляционного годоскопа (Forward Wall) эксперимента HADES (GSI, Germany).

Аналоговая система считывания эксперимента HADES построена на основе модуля TOF AddOn, который содержит:

- Двухканальную структуру считывания, с временным разрешением 20 пс,*
- Измерение амплитуды по TOT методу с расширенным диапазоном;*
- Цифровой интерфейс для управления камерной электроникой через модуль TRB2*

Передний сцинтилляционный годоскоп (Forward Wall)



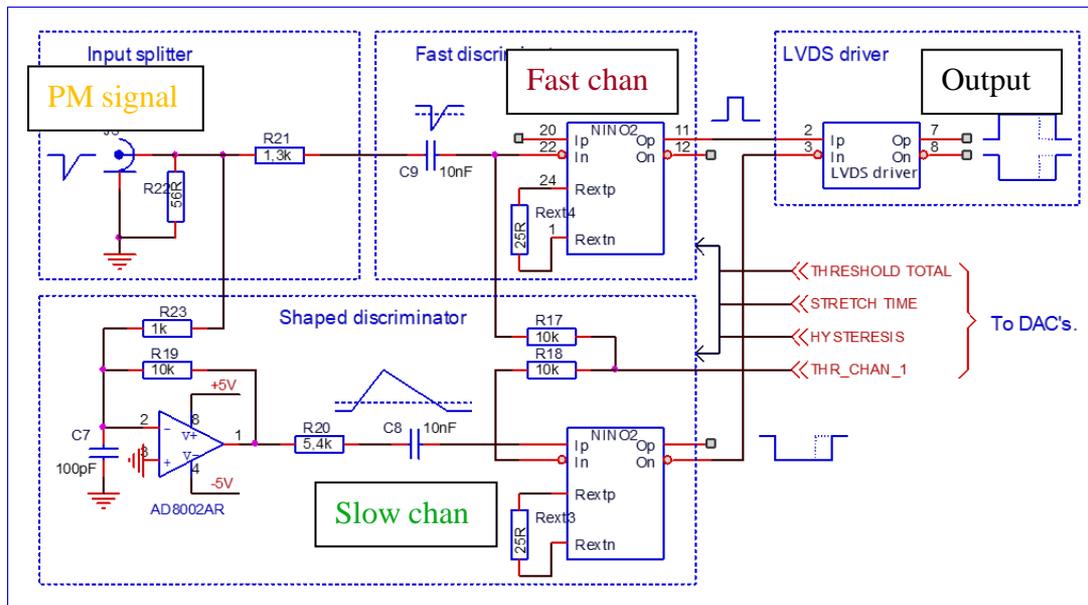
128-канальный камерный модуль TOF AddOn



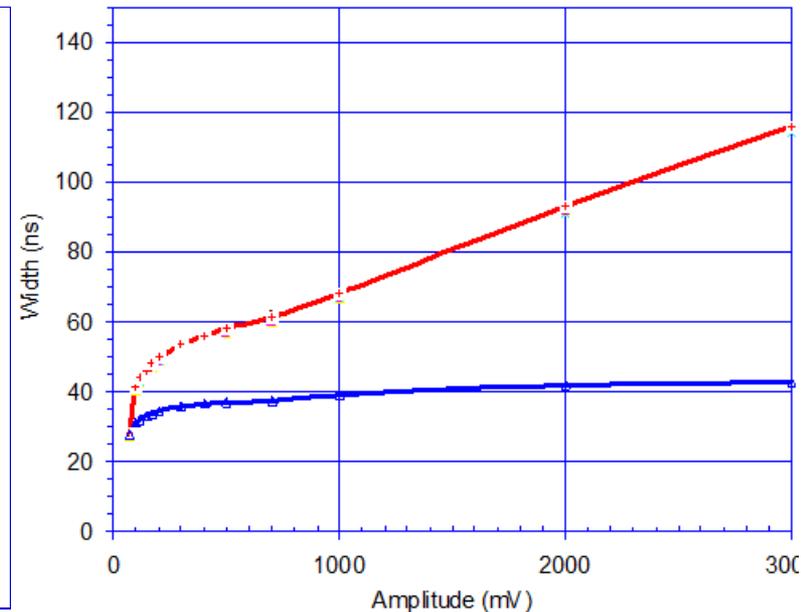
4. Разработка системы считывания переднего сцинтилляционного годоскопа (Forward Wall) эксперимента HADES (GSI, Germany).

- Впервые применена двухканальная структура канала считывания позволяющая одновременно измерять время пролета частицы с точностью **20 нс** и ее заряд с ошибкой около **0,3%**.
- Двухканальная структура канала считывания 128-канального Front-end модуля TOF AddOn, построена на основе ASIC NINO.

Двухканальная схема модуля TOF AddOn состоит из быстрого и медленного каналов и объединителя импульсов..

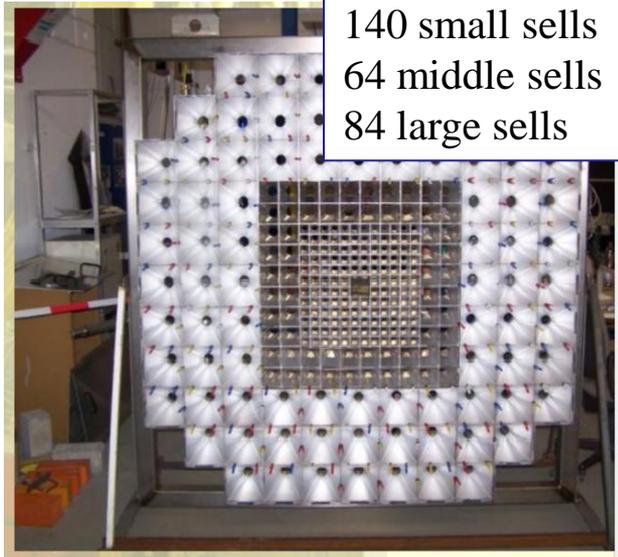


Зависимость ширины (TOT) от амплитуды, быстрого (синий) и медленного TOT (красный) каналов.

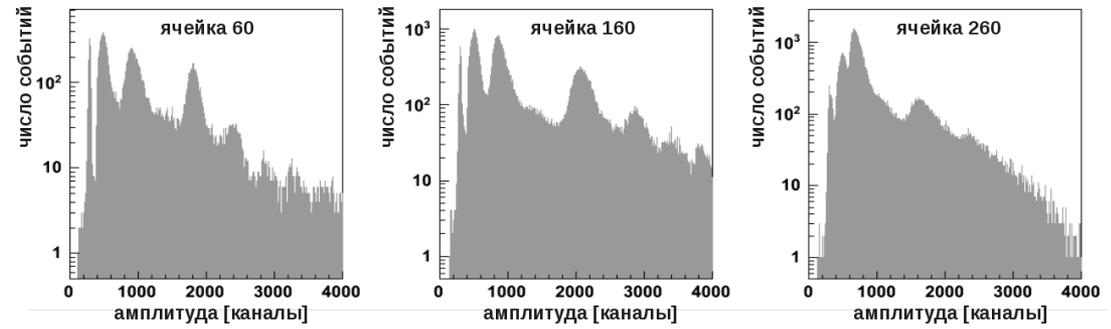


4. Разработка системы считывания переднего сцинтилляционного годоскопа (Forward Wall) эксперимента HADES (GSI, Germany).

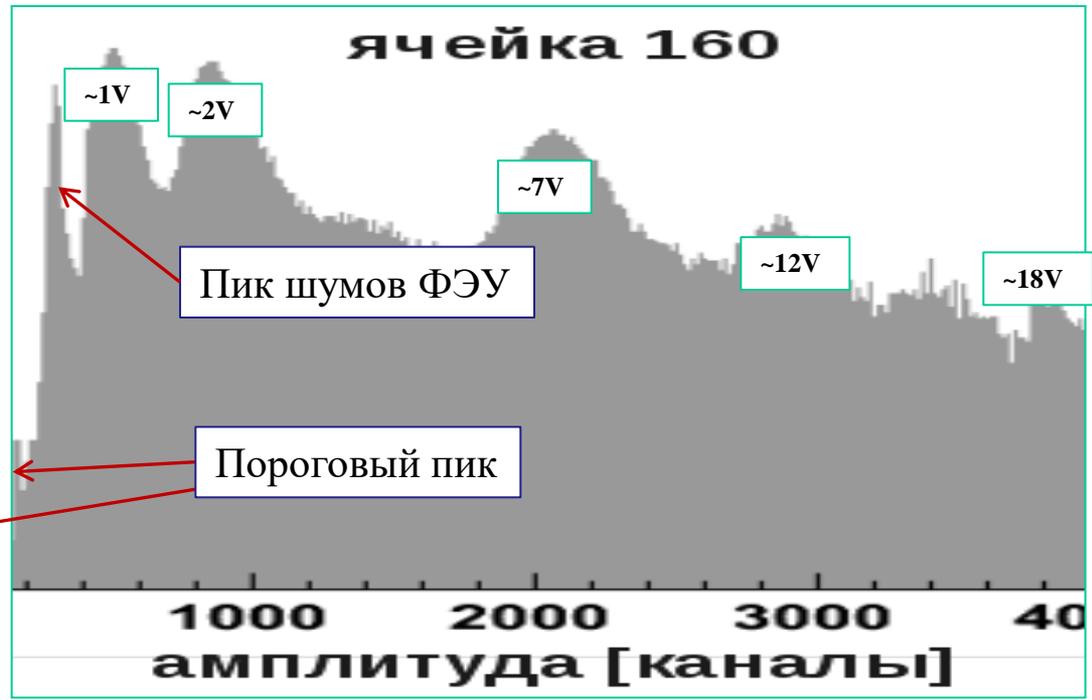
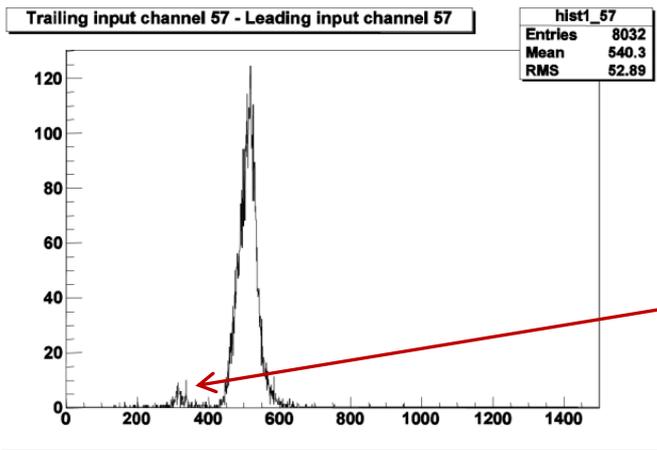
Новая методика работы с электроникой TOT метода, интерпретация результатов.



140 small sells
64 middle sells
84 large sells



Амплитудный TOT спектр ячейки 57



4. Разработка системы считывания переднего сцинтилляционного годоскопа (Forward Wall) эксперимента HADES (GSI, Germany).

Выводы.

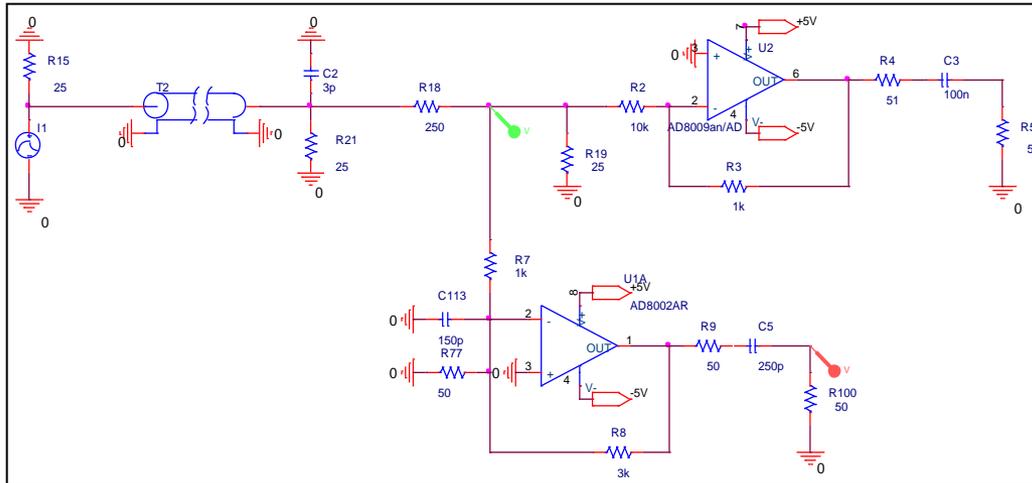
- Произведены исследования камерного модуля TOFAddOn для условий работы с большим динамическим диапазоном переднего сцинтилляционного годоскопа (FW) эксперимента HADES.
- Разработана **288-ми канальная системы считывания**, построенная на основе 128-канального камерного модуля TOFAddOn для эксперимента HADES.
- Впервые в мире использован TOT метод с расширенным диапазоном **модернизированного синусным формирователем**. что позволило расширить амплитудный диапазон и снизить погрешность измерения до 0,3%.
- Получено временное разрешение переднего сцинтилляционного годоскопа (FW) 850 пс, и амплитудный диапазон 20 В.

5. Модернизация преобразователя заряд-временной интервал (TOT-метода) введением синусного формирователя. принципы и характеристики, опыт применения в экспериментах ALICE (CERN), HADES (GSI), BM&N(ОИЯИ).

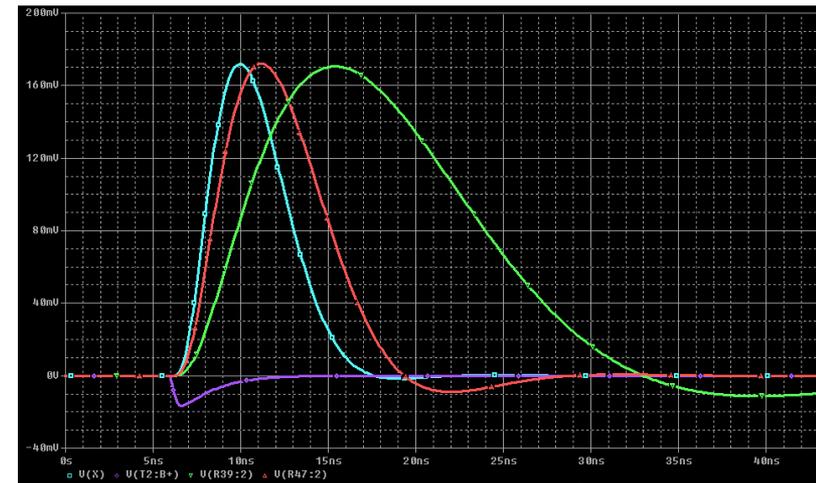
Цели разработки синусного формирователя:

1. Сформировать **абсолютно гладкий аналоговый импульс** форма которого не зависит от исходного сигнала на время интегрирования.
2. **Снижение погрешностей TOT метода**
3. **Сохранение зарядовой пропорциональности** при амплитудном ограничении.

PSPICE модель аналогового генератора импульсов с ударным возбуждением - синусного формирователя.



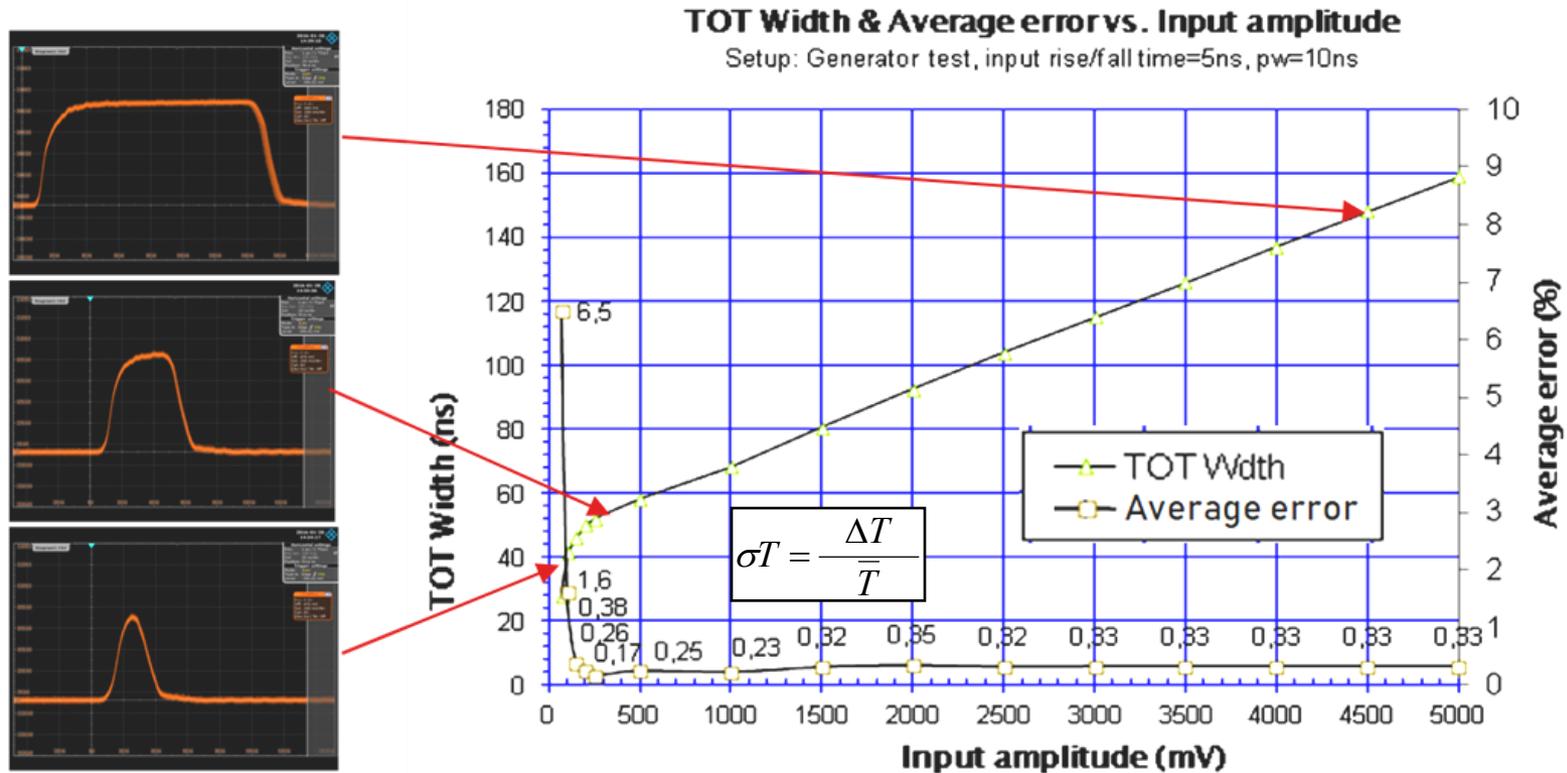
PSPICE симуляции различных времен отклика синусного формирователя.



5. 128-канальный модуль HADES TOF ADDON.

Зависимость ширины импульса и интегральной ошибки TOT метода с синусным формирователем.

На графике показана амплитудная зависимость ширины импульса «TOT width» и ошибки измерения σT , вычисленная как отношение среднеквадратичного отклонения длительности импульса ΔT к его среднему значению \bar{T} в каждой точке.



5. Модернизация преобразователя заряд-временной интервал (ТОТ-метода) введением синусного формирователя. принципы и характеристики, опыт применения в экспериментах ALICE (CERN), NADES (GSI), BM&N(ОИЯИ).

Выводы:

Результаты модернизации ТОТ метода синусным формирователем:

- Преодолен главный недостаток ТОТ метода – неоднозначность зависимости заряд-временной интервал,
- Удалось снизить величину ошибки ТОТ преобразования до 0.3%,
- Преодолено ограничение на максимальный диапазон измеряемых амплитуд, имеет значительный линейный участок,
- Метод легко адаптируется для различных применений.

Заключение.

Диссертационная работа обобщает опыт исследований, разработки и внедрения аналоговой электроники считывания в современные физические эксперименты:

- Разработана низкопороговая аналоговая электроника считывания с минимальным порогом 100 мкВ для применения в триггерных мюонных системах экспериментов ATLAS (CERN) и ОКА (ИФВЭ).
- На основе принципа суммирования создана первая времяпролетная система на основе РПС эксперимента HARP (CERN) с временным разрешением около 150 пс,
- Создана первая в мире СИС NINO и на ее основе времяпролетная система ALICE TOF с числом каналов 160 тыс. и временным разрешением около 100 пс,
- Разработана система считывания переднего годоскопа (FW) эксперимента HADES (GSI). Впервые применена структура канала считывания, позволяющая одновременно измерять время и амплитуду в одном канале ВЦП.
- Введение синусного формирователя в ТОТ метод обеспечило однозначность преобразования заряда во временной интервал, снизило ошибку до 0.3%, расширило диапазон сигналов до 20В в экспериментах HADES (GSI) и BM&N (ОИЯИ).

Список публикаций.

1. Низкопороговый дискриминатор для камер RPC, Е. А. Усенко, Приборы и техника эксперимента. - 2003. - N 1. - С. . 40-43.”,
2. RPCs for the ATLAS Level-1 muon trigger: Test beam results P. Camarri et al.. Apr 17, 1998. 18 pp. ATL-MUON-98-234.
3. Study of the $K \rightarrow \mu\pi$. Ajinenko I.V. et al., Feb 2002, Published in Phys.Atom.Nucl. 66 (2003) 105-109, Yad.Fiz 66(2003) 107-111, IHEP-2002-6.
4. The HARP RPC time-of-flight system, M. Bogomilov, D. Dedovich, R. Dumps, F. Dydak, V. Gapienko, A. Semak, Y. Sviridov, E. Usenko, J. Wotschack, V. Zaets (CERN & Dubna, JINR & Serpukhov, IHEP). 2003. 7 pp. Nucl.Instrum.Meth. A508 (2003) 152-158.
5. NINO: An ultrafast low-power front-end amplifier discriminator for the time-of-flight detector in the ALICE experiment F. Anghinolfi, P. Jarron (CERN), F. Krummenacher (Smart Silicon Systems, Lausanne), E. Usenko (Serpukhov, IHEP), M.C.S. Williams (INFN, Bologna). 2004. 5 pp. Published in IEEE Trans.Nucl.Sci. 51 (2004) 1974-1978.
6. The MRPC detector for the ALICE Time Of Flight system: Final design and performances A. Akindinov et al.. 2006. 6 pp. Published in Nucl.Phys.Proc.Suppl. 158 (2006) 60-65.
7. Study of gas mixtures and ageing of the multigap resistive plate chamber used for the Alice TOF. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. A533, 2004.
8. Operation of the Multigap Resistive Plate Chamber using a gas mixture free of flammable components. Akindinov A.V., A. Alici, F. Anselmo, P. Antonioli, M. Basile, G. Cara Romeo, L. Cifarelli, F. Cindolo, F. Cosenza, I. D' Antone et al. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. A532, 2004.
9. Latest results on the performance of the multigap resistive plate chamber used for the ALICE TOF. Akindinov A.N., A. Alici, P. Antonioli, S. Arcelli, M. Basile, G. Cara Romeo, L. Cifarelli, F. Cindolo, A. De Caro, S. De Pasquale et al. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 533 (2004) 74–78.
10. Design aspects and prototype test of a very precise TDC system implemented for the Multigap RPC of the ALICE-TOF. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A533, 2004. Akindinov A.V. et al.
11. Results from a large sample of MRPC-strip prototypes for the ALICE TOF detector. A.V. Akindinov, A. Alici, F. Anselmo, P. Antonioli, M. Basile, G. Cara Romeo, L. Cifarelli, F. Cindolo, A. De Caro, S. De Pasquale et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. A532, 2004.
12. The new data acquisition system for the HADES experiment. M. Palka, M. Bomer, I. Frohlich, M. Kajetanowicz, J. Michel, P. Salabura, P. Scott, J. Stroth, H. Strobele, A. Tarantola, M. Traxler, R. Trebacz, **E. Usenko**, S. Yurevich. Subm. to IEEE-NSS conference record 2008 Nuclear Science Symposium, Medical Imaging Conference and 16th Room Temperature Semiconductor Detector Workshop.
13. Forward scintillation hodoscope for nuclear fragment detection at the high acceptance dielectron spectrometer (HADES) setup., Andreeva, O.V., Golubeva, M.B., Guber, F.F., (...), Tlusty, P., **Usenko, E.A.** Instruments and Experimental Techniques, 57 (2014) 103-119 .
14. Thin Glass MRPC Rate Capability at Moderate Warming, V.A.Gapienko, A.A.Golovin, Yu.M.Sviridov, A.A.Semak, M.N.Ukhanov (IHEP, Protvino, Russia), O.P.Gavrishchuk, S.YA.Sychkov, E.A.Usenko (JINR, Dubna, Russia) 2013. 6 pp. Instrum.Exp.Tech. 56 (2013) 265-270, Prib.Tekh.Eksp. 2013 (2013) 3, 21-26 .
15. The MRPC detector for the ALICE Time Of Flight system: Final design and performances A. Akindinov et al.. 2006. 6 pp. Published in Nucl..Phys.Proc.Suppl. 158 (2006) 60-65.

Измерения шумов в ЦЕРН на примере ASIC NINO.

4. Noise measurement.

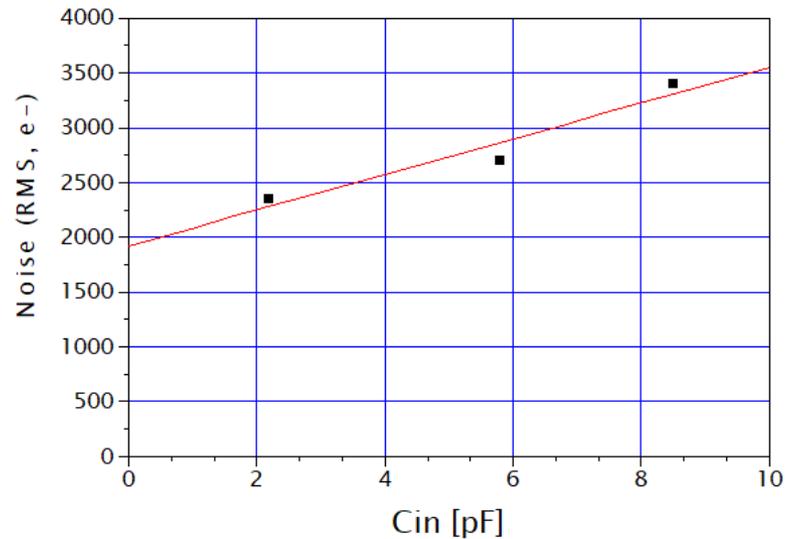
Experimental setup: $U_{dd}=2,5\text{ V}$, $U_{th}=120\text{ mV}$, $R_{ext}=25\text{ Ohm}$.

Notes: Noise measurement can repeat only for ASIC NINO2002 **first edition** (without stretch timer). For one of NINO ASIC's channel provided liner range up to the output stage (amplification factor degraded up to $A\sim 5$, for this case input "BiasN5" was connect to $V_{dd}=2.5\text{V}$ net through 385 Ohm resistor).

Liner regression of equivalent input noise

$\text{Noise} = 1906e- + 164e- / \text{pF}$ (NINO2002, first edition)

Noise vs. C_{in} for liner range

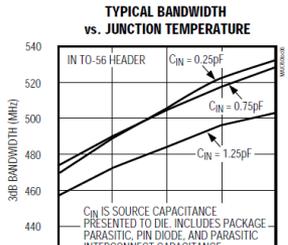
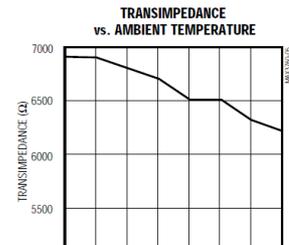
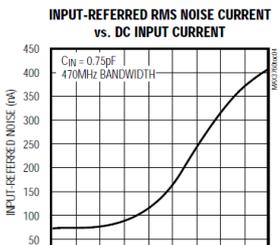
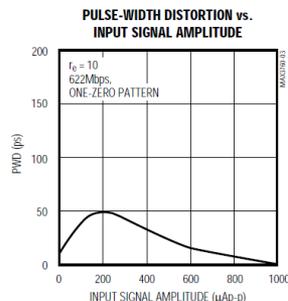
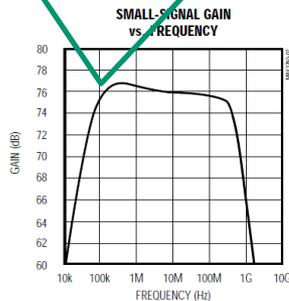
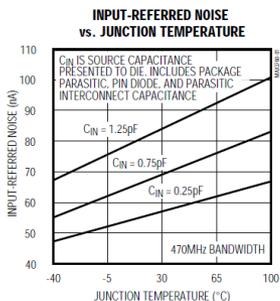


Коэффициент преобразования трансимпедансного усилителя MAX3760

*коэффициент преобразования 76 Дб (6309,57) с
размерностью сопротивления соответствует
паспортному значению 6500 (R)*

Typical Operating Characteristics

(MAX3760 EV kit, $V_{CC} = +5.0V$, COMP = open, $T_A = +25^\circ C$, unless otherwise noted.)



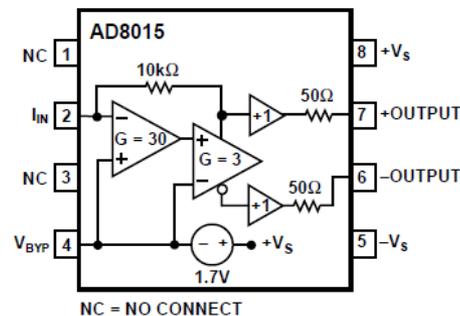
MAX3760

AD8015 gain 10000 (R)

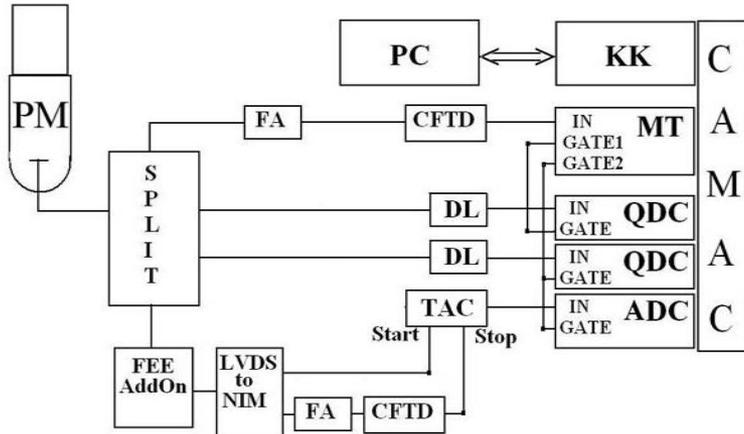
Wideband/Differential Output Transimpedance Amplifier

AD8015

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM

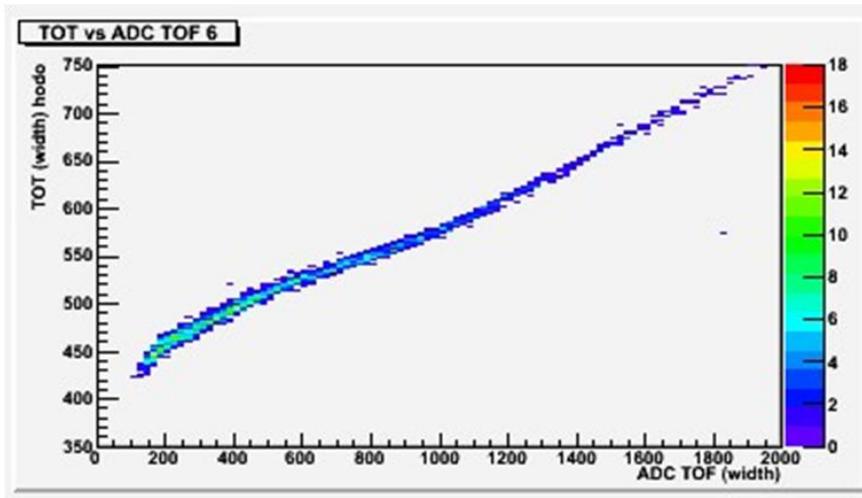


4. Разработка аналоговой системы считывания времяпролетного детектора и переднего сцинтилляционного годоскопа (Forward Wall) эксперимента HADES (GSI, Germany) в 2008 году.

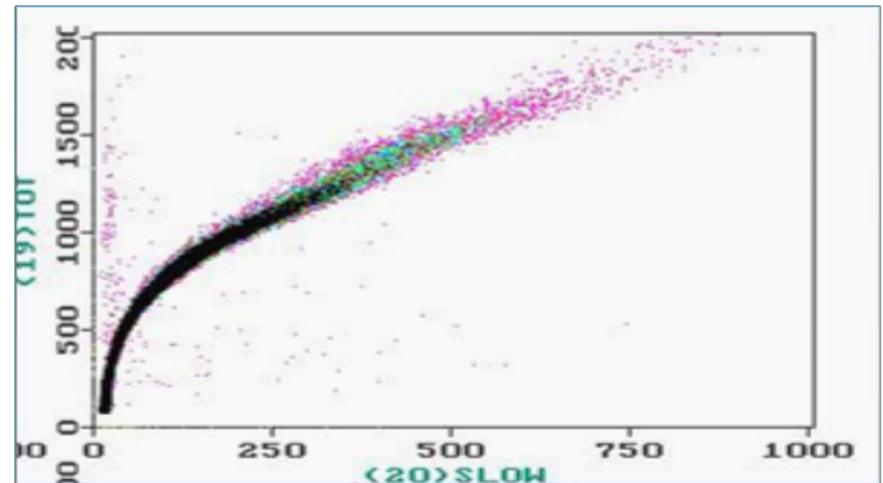


- Исследование модуля TOF AddOn и TOT метода измерения заряда на космическом стенде и на источнике ^{22}Na 40MeV.
- Для исследования TOT метода и построения его двумерных характеристик была применена двухканальная схема измерения TOT vs. ADC.

Двумерный плот измерений модуля HADES TOF + FEE TOF AddOn на космических частицах.

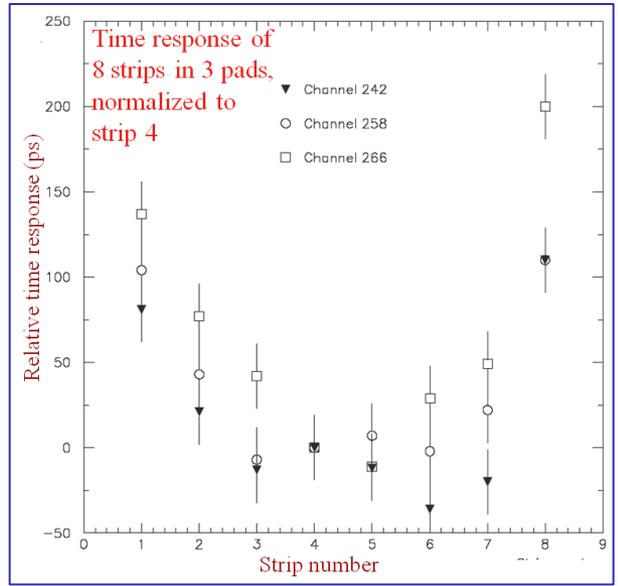
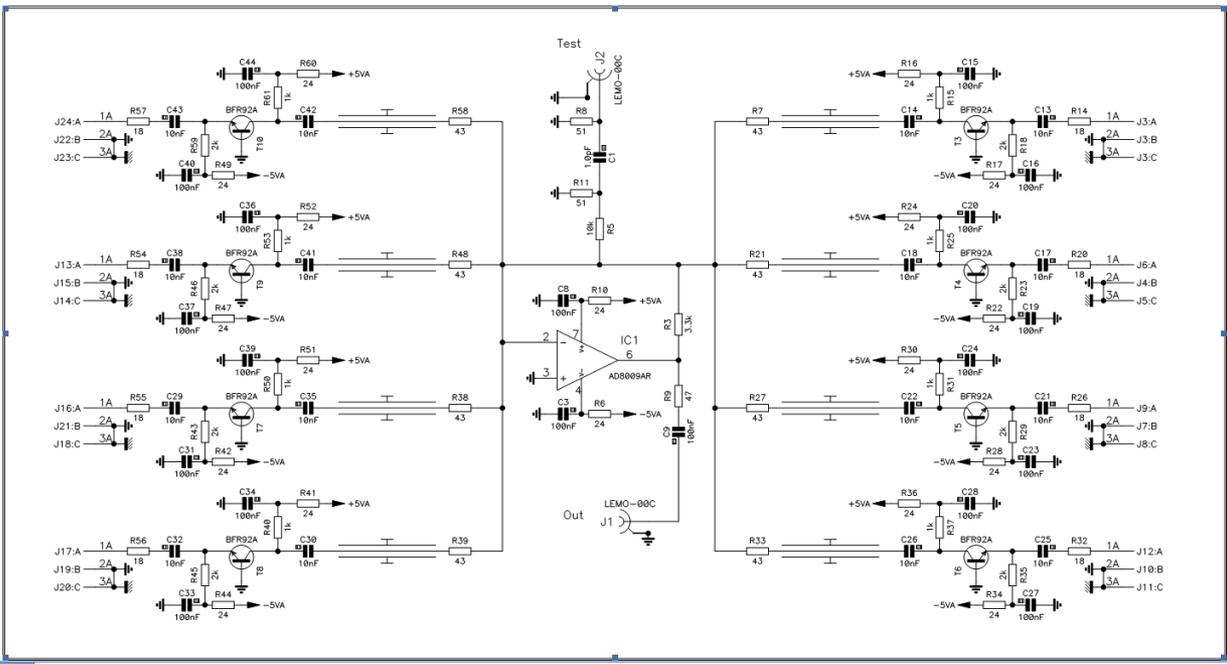


Двумерный плот измерений модуля HADES FW+ FEE TOF AddOn на источнике ^{22}Na 40MeV.



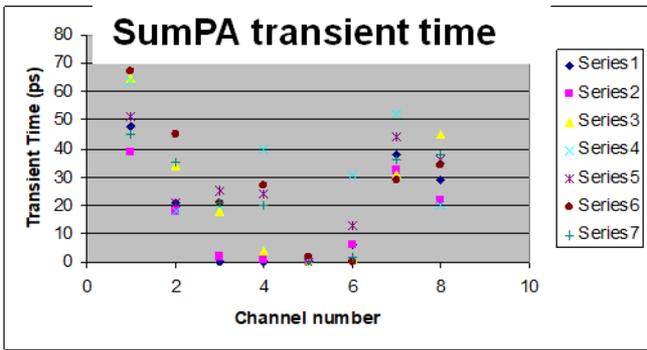
2. Разработка и создание первой в мире времяпролётной системы на основе MGRPC для эксперимента HARP (CERN, Switzerland) и системы считывания на основе 8-ми канального суммирующего предусилителя.

Разработка суммирующего накамерного предусилителя.



Принцип суммирования 8-ми стрипов порождает необходимость в выравнивании времени прихода сигналов в точку суммирования с точностью не хуже 10пс. При этом погрешности и неоднородности в карте суммирующего предусилителя возрастают с увеличением расстояния от стрипа до точки суммирования ввиду флуктуаций значения волнового сопротивления внутри печатной платы на величину около 50пс.

Снижение погрешности ограничено свободным пространством камеры.



3. Разработка аналоговой специализированной интегральной схемы NINO 8-ми канального усилителя-дискриминатора для времяпролётной системы эксперимента ALICE (CERN, Switzerland).

Специализированная интегральная схема (СИС) NINO ASIC – чип нового поколения, интегрирующий опыт различных детекторов. NINO ASIC не стал узкоспециализированным чипом, а благодаря дополнительным функциям широко используется в других детекторах вплоть до калориметрии.

