МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»
(НИЯУ МИФИ)
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ
КАФЕДРА №40 «ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОРОДНОСТИ КАНАЛОВ МНОГОКАНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ СЧИТЫВАНИЯ FERS-5200 ДЛЯ УСТАНОВКИ SPD BBC

Научный руководитель _____ П.Е. Тетерин
доц., к.ф.-м.н.

Консультант _____ Ф.А. Дубинин
старший преподаватель

Студент _____ Д.Р. Шафикова

Москва 2025

СОДЕРЖАНИЕ

Введение 3

1.1 Эксперимент SPD 3

1.2 Детектор спиновой физики SPD 4

1.3 Счетчик пучков BBC 5

1.4 Цели и задачи 6

2. FERS-5200 6

2.1 Citiroc-1A 7

2.2 Усиление сигнала 7

2.3 Измерение заряда 8

2.4 Дискриминаторы 9

3. Представление результатов 10

3.1 Калибровка сигналом с внутреннего генератора 10

3.2 Калибровка сигналом с внешнего генератора 14

3.2.1 Схема установки и методика измерений 14

3.2.2 Калибровка по трем точкам 15

3.2.3 Точная калибровка одного канала 17

3.2.4 Калибровка при различном времени формирования 18

Список литературы 22

Введение

Ускорительный комплекс NICA (Nuclotron-based Ion facility), строящийся на базе Объединенного института ядерных исследований (Дубна, Россия), предназначен для изучения свойств плотной барионной материи. Детектор спиновой физики SPD (Spin Physics Detector) будет расположен в одной из двух точек взаимодействия пучков заряженных частиц.

1.1 Эксперимент SPD

Детектор коллаборации SPD предназначен для проведения экспериментов, исследующих спиновую физику протона в столкновениях поляризованных пучков протонов и дейтронов.

Энергия столкновений в SPD будет находится на уровне до 27 ГэВ со светимостью до 10^{32} $см^{-2}$ $с^{-1}$, что позволит покрыть промежуток кинематического диапазона между низкоэнергетическими экспериментами до 10 ГэВ (SATURNE, SPASCHARM, ANKE) и высокоэнергетическими экспериментами с энергией p-p столкновения до 13 ТэВ (AFTER, LHCspin, PHENIX, STAR).

Проект SPD разделен на два основных этапа. Первый этап предполагает изучение поляризованных процессов в упругом p-p и d-d рассеянии, а также исследование спиновых эффектов в рождении гиперонов и резонансов.

Второй этап эксперимента предполагает проведение исследования поляризованных глюонов в протоне и дейтроне.

Ожидается, что на первом этапе столкновения будут происходить с энергиями до $\sqrt{s}$ = 9.4 ГэВ для протонов, $\sqrt{s}$ = 4.5 ГэВ/нуклон для дейтронов и светимостями 10^{31} и 10^{30} $см^{-2}$ $с^{-1}$ соответственно. Для второго этапа планируется повышение энергии столкновений для протонов до 27 ГэВ и для дейтронов до 13.5 ГэВ/нуклон со светимостями до 10^{32} и 10^{31} $см^{-2}$ $с^{-}1$ соответственно. [1].

1.2 Детектор спиновой физики SPD

Экспериментальная установка SPD проектируется как детектор с углом охвата 4π [2].

Основные детекторные системы изображены на рисунке 1. К ним относятся:

- кремниевый вершинный детектор;
- трековый детектор на основе straw-трубок;
- времяпролетная система;
- аэрогелевый черенковский детектор;
- мюонная система;
- магнитная система;
- электромагнитный калориметр;
- калориметр нулевого угла;
- счетчик столкновений пучков BBC.

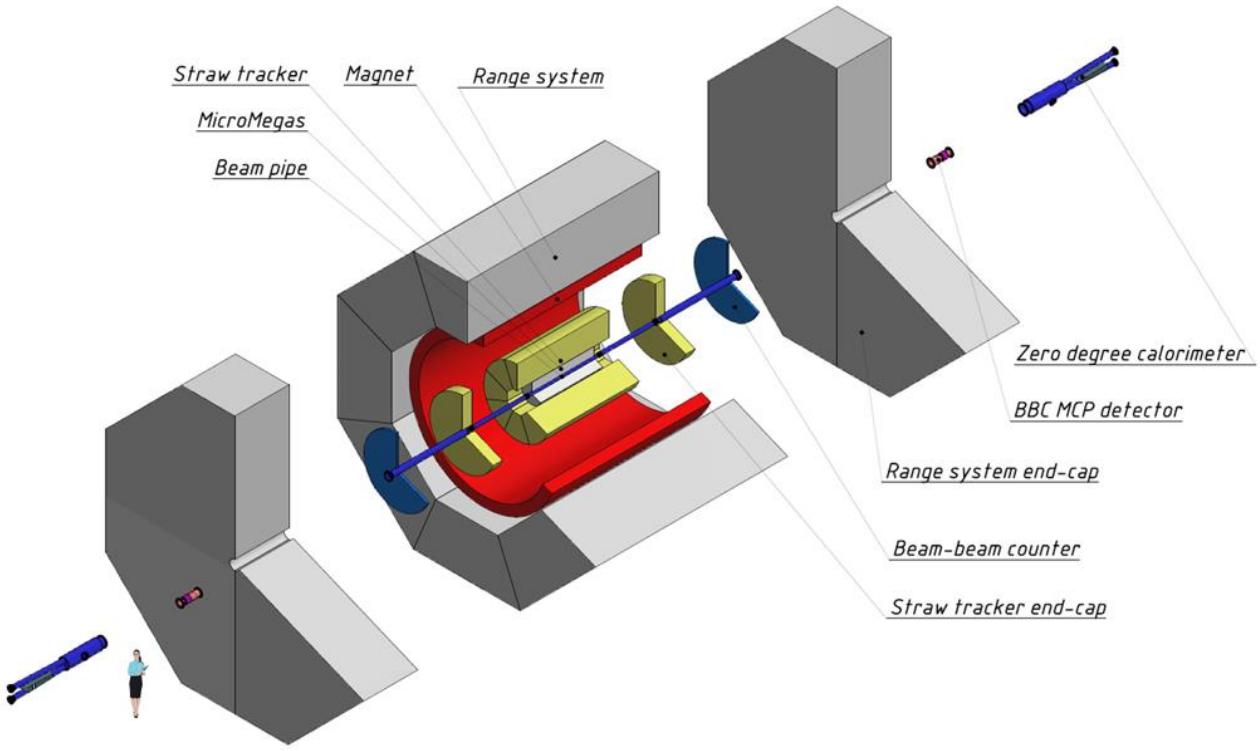


Рисунок 1 – Строение детектора SPD

1.3 Счетчик пучков BBC

BBC (Beam-Beam Counters) — это один из ключевых компонентов SPD, предназначенный для решения задач локальной поляриметрии и измерения светимости в точке взаимодействия коллайдера.

Сцинтилляционный детектор BBC состоит из 16 секторов, каждый из которых состоит из 26 тайлов (сцинтилляционных пластин). Вместе 16 секторов образуют кольцо. Сбор сигнала происходит через кремниевые фотоумножители (SiPM), которые соединяются с тайлами при помощи оптосмещающего волокна (WLS) [3]. Сигнал с SiPM считывается системой предварительной обработки данных Caen FERS-5200.

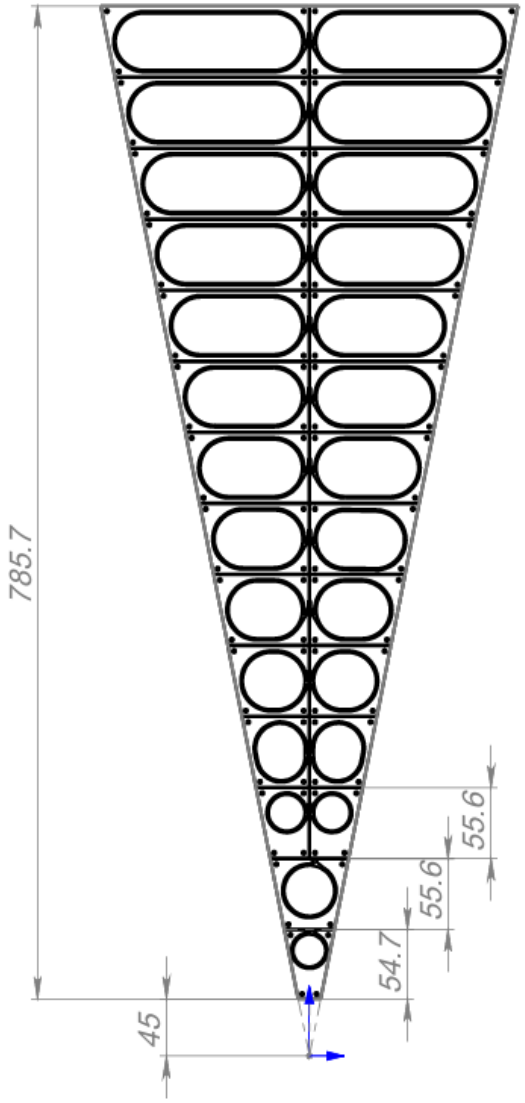


Рисунок 2 – Геометрия сектора

1.4 Цели и задачи

Корректное фиксирование и разделение событий в детекторе является одной из главных методологических задач любого экскремента. Считыванием сигнала занимается фронт-энд электроника, которая отвечает за оцифровку, усиление, программируемый анализ, фильтрацию сигнала, а также его представление для пользователя.

В данной работе проводится калибровка многоканальной системы FERS-5200, которая будет использоваться в обработке сигнала с детектора BBC [4]. Калибровка необходима для выявления возможных расхождений в считывание сигнала между разными каналами и обнаружения прочих особенностей работы электроники, которые могут влиять на полученные результаты.

2. FERS-5200

Модуль системы FERS-5200 [5] включает в себя два чипа Citiroc-1A, каждый из которых является 32-канальной интегральной схемой (ASIC), предназначенной для считывания сигналов с SiPM.

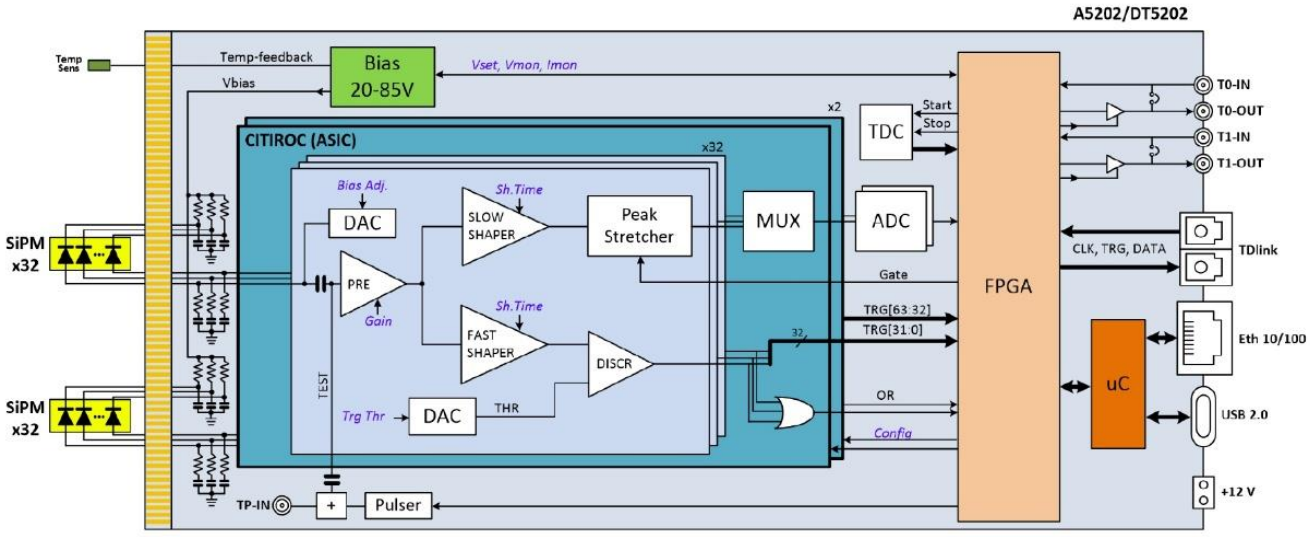


Рисунок 3 – Упрощенная схема одного канала FERS-5200

2.1 Citiroc-1A

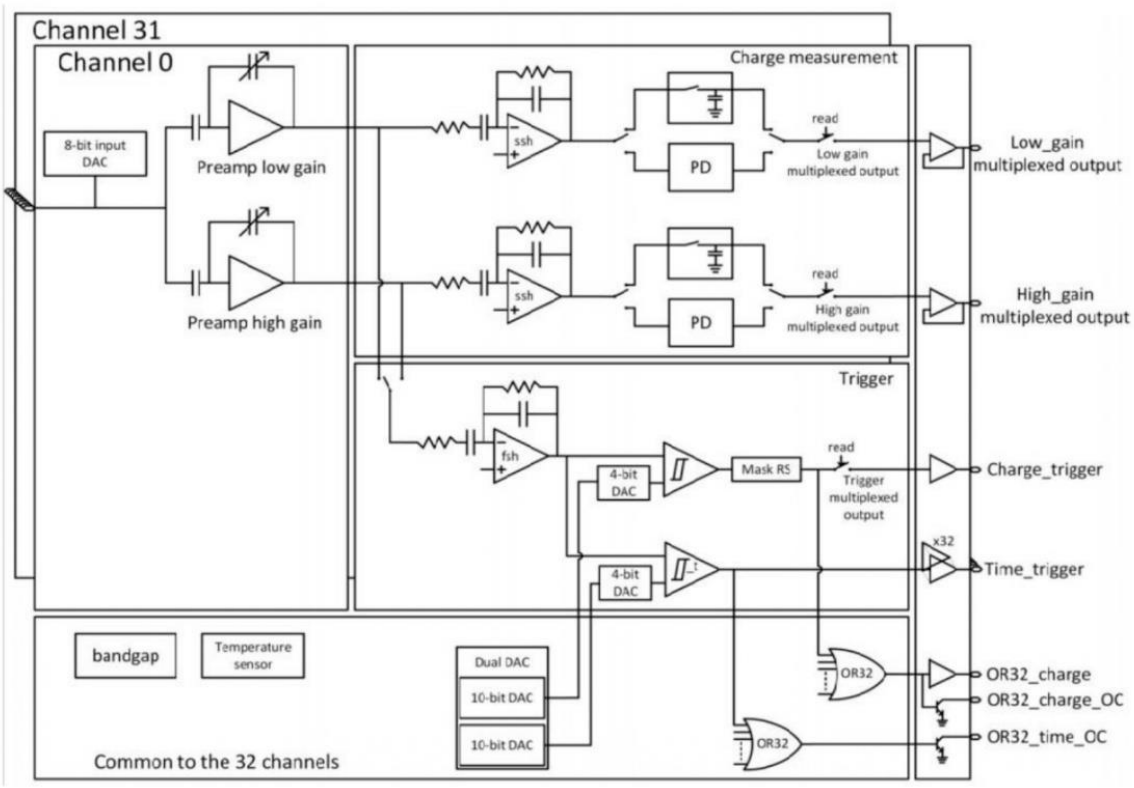


Рисунок 4 – Схема чипа Citiroc-1A

Каждый из 32 каналов чипа включает цепь обработки сигнала, состоящую из:

- предусилителей (Low Gain, High Gain);
- быстрого и медленного формирователей (Slow Shaper, Fast Shaper);
- пикового детектора;
- дискриминаторов.

2.2 Усиление сигнала

Предусилители могут работать в двух режимах: Low Gain (LG) – для мощных сигналов и High Gain (HG) – для слабых сигналов (при использовании этого режима порог может быть выставлен на уровне 1/3 фотоэлектрона). Коэффициент усиления настраивается путём выбора значения обратной связи (C_f) с шагом 25 фФ.

Значение коэффициента усиления в канале может задаваться индивидуально через интерфейс Janus (от 1 до 63).

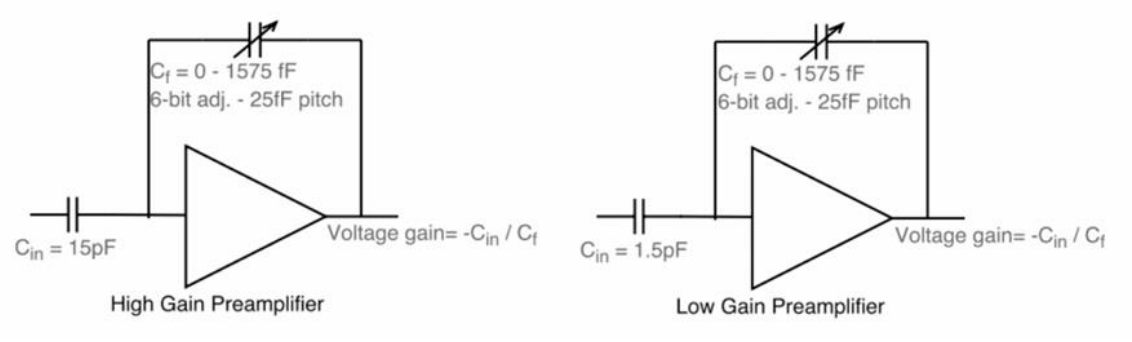


Рисунок 5 – Предусилители HG и LG

2.3 Измерение заряда

Цепь усиления включает два CR-RC² медленных формирователя, подключенных к выходам предусилителей.

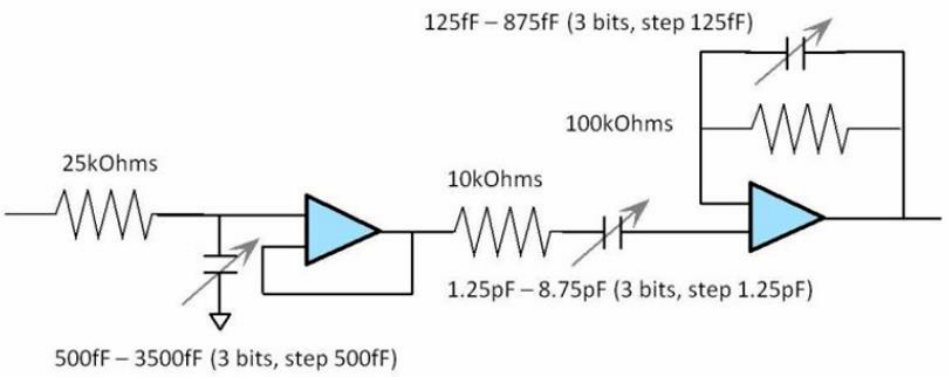


Рисунок 6 – Медленный формирователь (Slow Shaper)

Амплитуда сигнала с выхода Slow Shaper измеряется с помощью системы пикового детектирования, которая автоматически запоминает максимальное значение сигнала после срабатывания триггера.

Работа пикового детектора состоит из трех фаз:

1. **Фаза OFF**: до поступления триггера пиковый детектор выключен. После срабатывания триггера начинается фаза пикового детектирования.

2. **Фаза пикового детектирования**: детектор запоминает максимальное значение входного сигнала. Режим сохраняется до появления сигнала Hold, после чего начинается фаза удержания. Время между триггером и сигналом Hold определяется параметром Hold Delay.

3. **Фаза удержания (Hold)**: сигнал Hold отключает вход пикового детектора от медленного формирователя, а максимальное значение амплитуды удерживается до тех пор, пока не произойдет считывание и преобразование сигнала в цифровую форму АЦП.

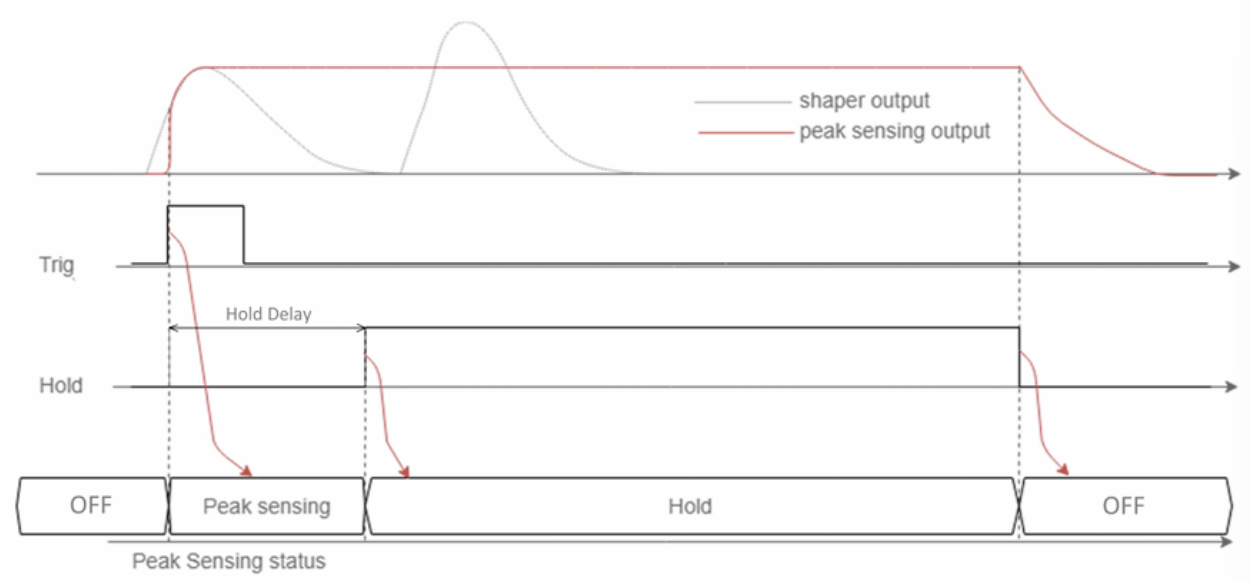


Рисунок 7 – Фазы работы пикового детектора

2.4 Дискриминаторы

Каждый канал имеет быстрый формирователь (Fast Shaper) и дискриминатор, предназначенный для генерации самотриггера.

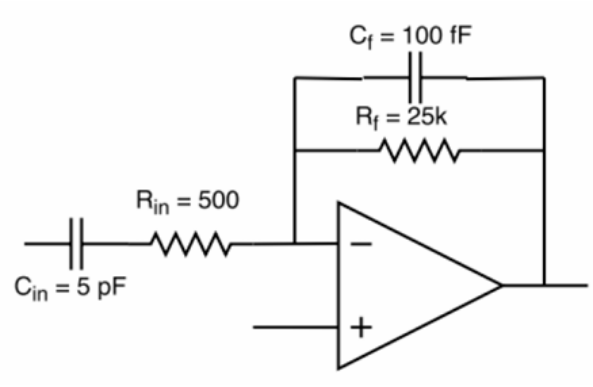


Рисунок 8 – Быстрый формирователь (Fast Shaper)

Сигнал с выхода Fast Shaper подается на два дискриминатора:

1. Зарядовый дискриминатор (QD);

2. Временной дискриминатор (TD), использующийся для подсчета событий, измерения времени прихода (ToA) и времени выше порога (ToT).

3. Представление результатов

3.1 Калибровка сигналом с внутреннего генератора

Для проверки работы системы предусмотрен тестовый генератор (Test Pulser). Калибровка сигналом с внутреннего генератора может проводиться двумя способами.

Первый способ заключается в том, что тестовый импульс подается на все каналы одновременно. Такой режим удобен для проверки функциональности всей платы, однако его не стоит использовать в качестве точной проверки из-за возможности возникновения кросс-токов между близко расположенными каналами [5].

Второй метод заключается в подаче сигнала только на один канал платы и является рекомендуемым производителем методом для точной настройки канала.

Оба метода калибровки реализуются через вкладку Test-Probe в Janus. Настройки вкладки включают в себя:

- выбор источника импульса (PTRG для внутреннего генератора);
- настройку амплитуды;
- выбор канала, на который подается сигнал;
- выбор типа предусилителя (HG, LG).

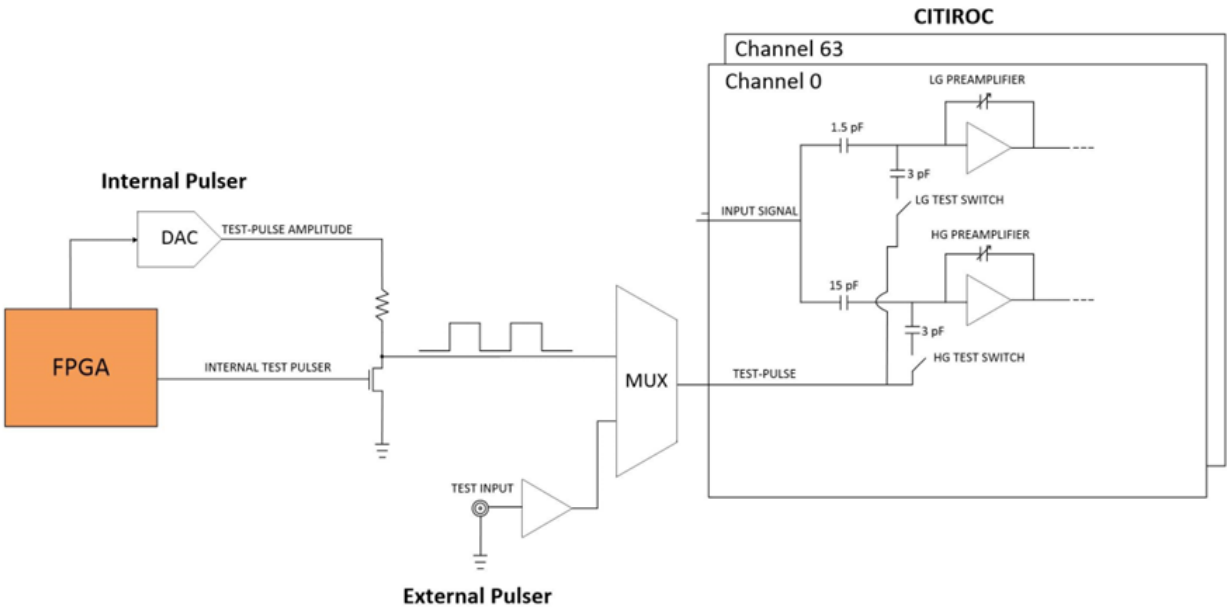


Рисунок 9 – Блок-схема сигнала тестового генератора.

Первый этап калибровки проводился импульсом от внутреннего генератора. Сигнал одновременно подавался на все каналы и проходил усиление по LG и HG. Измерялось среднее значение амплитуды по распределению (рисунок 10).

Калибровка по сигналу с внутреннего генератора при одинаковых параметрах импульса показала расхождение в амплитуде между двумя группами каналов, которые соответствуют двум чипам ASIC Citiroc-1A.

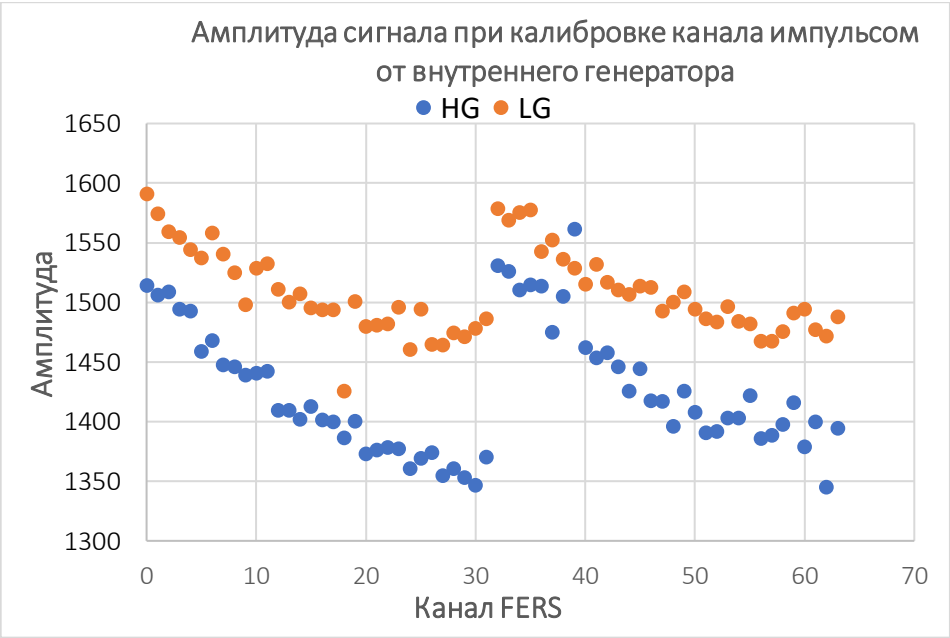


Рисунок 10 – Калибровка каналов импульсом от внутреннего генератора

В режиме усиления LG амплитуда в канале 32 составляет 93% от амплитуды в канале 1, а амплитуда в канале 64 составляет 94% от амплитуды в канале 33.

В режиме усиления HG амплитуда в канале 32 составляет 90% от амплитуды в канале 1, а амплитуда в канале 64 составляет 91% от амплитуды в канале 33.

Далее проводилась подробная калибровка для одного канала, в результате которой были получены кривые, демонстрирующие различие в обработке сигнала между двумя методами калибровки. В случае, когда тестовый импульс подается только на один канал, снимаемая амплитуда оказывается выше при тех же параметрах входного сигнала, чем в случае, когда импульс подается на все каналы одновременно, а показания снимаются только с одного.

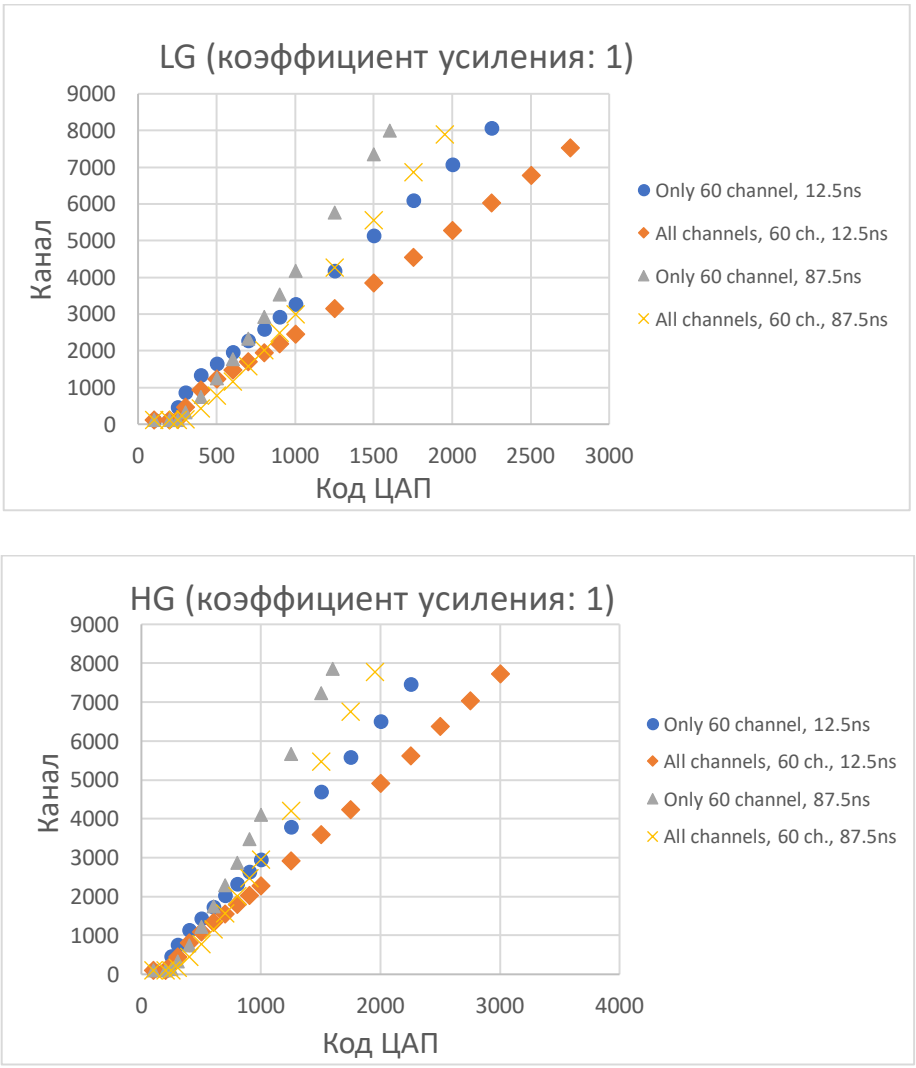
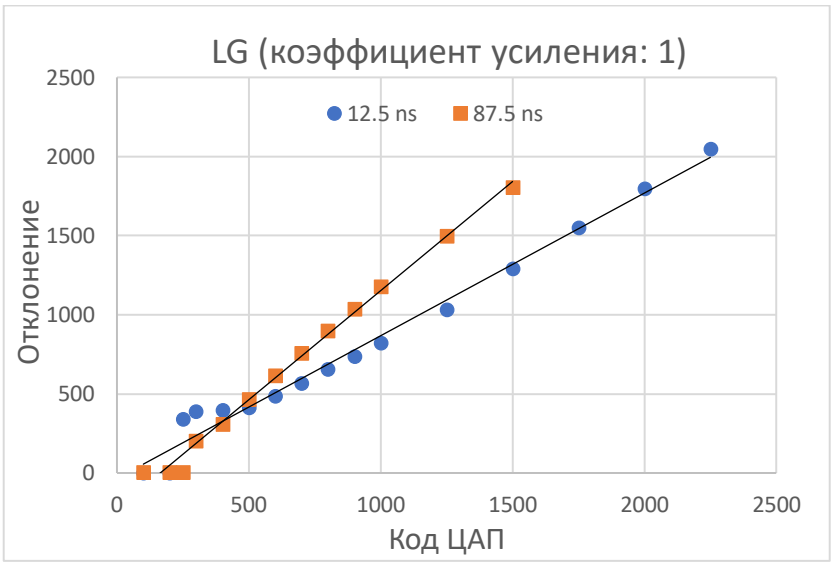


Рисунок 11 – Подробная калибровка канала №60 сигналом от внутреннего генератора двумя способами

Однако, выбор метода калибровки в этом случае не влияет на характер зависимости (рисунок 19).



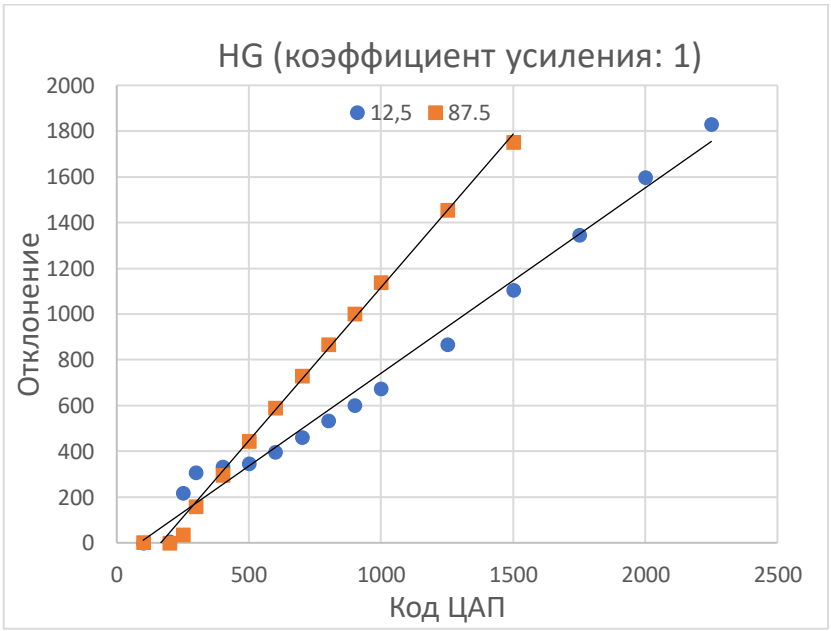


Рисунок 12 – Графики разностей для двух методов калибровки импульсом от внутреннего генератора

3.2 Калибровка сигналом с внешнего генератора

3.2.1 Схема установки и методика измерений

Дальнейшая калибровка каналов проводилась внешним генератором, сигнал с которого приходил на аттенюатор для более точного варьирования напряжения, подаваемого на канал.

Методика проведения калибровки импульсом от внешнего генератора состояла из:

1. Уменьшения сигнала генератора на аттенюаторе;
2. Измерения амплитуды сигнала по осциллографу;
3. Подачи выходного сигнала с аттенюатора на канал FERS-5200;
4. Оцифровки сигнала;
5. Фиксирования средней амплитуды в канале при известном напряжении.

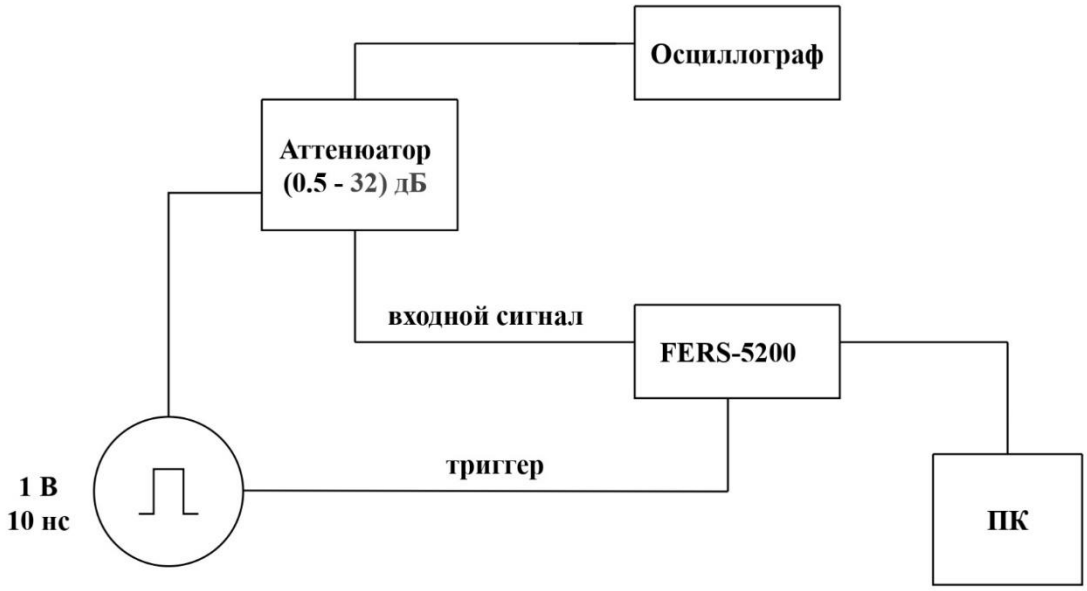


Рисунок 13 – Схема установки для калибровки каналов импульсом от внешнего генератора

Используемое оборудование:

1) Генератор импульсов Г5-56;

2) Caen Dual Attenuator Mod.N858;
3) Цифровой осциллограф Tektronix TDS 3032C.

Параметры Janus при калибровке 64 каналов в двух режимах усиления:

- **Spectroscopy**:

1) Gain Selection: BOTH
2) HG Gain: 1
3) LG Gain: 1
4) Pedestal Position: 100
5) HG Shaping Time: 87.5 ns
6) LG Shaping Time: 87.5 ns
7) Hold Delay: 100 ns
8) MUX Clock Period: 300 ns
9) Energy N Channels: 8K

Источником триггера был внешний генератор с форматом сигнала LvTTL (3.3 В), подающийся на вход T0-IN.

3.2.2 Калибровка по трем точкам

Всего для 64 каналов было снято по 3 точки с напряжениями сигнала 40, 80 и 120 мВ. По полученным точкам были построены графики, линейно аппроксимированные кривой вида y=kx+b.

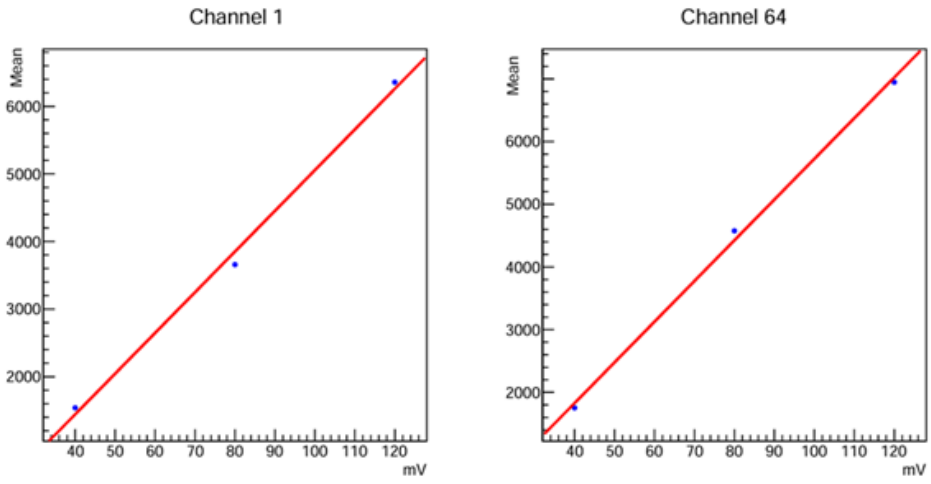


Рисунок 14 – Пример аппроксимации по трем точкам

Коэффициент k включает в себя коэффициент усиления и коэффициент преобразования амплитуды в цифровой код после прохождения усилителей.

Коэффициент b показывает точку пересечения прямой с осью y и определяет наличие смещения сигнала по энергетической шкале. Положительное значение b может указывать на смещение в отрицательную область шкалы из-за которого возможно отсечение малых амплитуд сигнала.

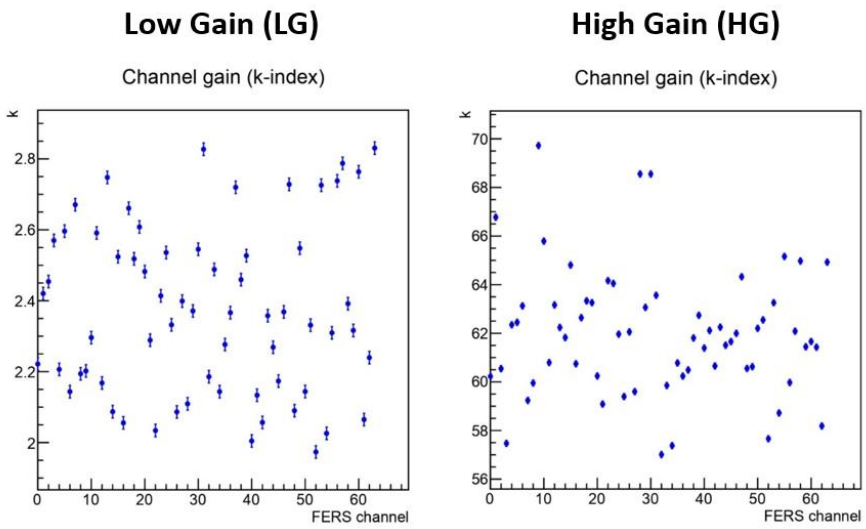


Рисунок 15 – Разброс коэффициента k, полученный в результате линейной аппроксимации калибровочных кривых

Калибровка 64 каналов системы FERS-5200 выявила наличие разброса коэффициента преобразования входного напряжения в цифровой код, особенно заметный в режиме усиления High Gain (Таблица 1).

Таблица 1. Усредненные по каналам характеристики

Режим усиления	High Gain (HG)	Low Gain (LG)
СКО коэффициента k	2,6	0,2
Коэффициент b (пьедестал)	-902,6	96,8
СКО коэффициента b	217,6	9,8

3.2.3 Точная калибровка одного канала

Для одного канала системы были сняты точные калибровочные кривые в двух режимах усиления при максимальном (63) и минимальном (1) коэффициентах усиления.

Используемое оборудование:

1) Генератор сигналов Rigol DG4102;
2) Цифровой осциллограф Tektronix MSO 2022B.

Параметры Janus при подробной калибровке одного канала остались аналогичными, как и в случае калибровки по трем точкам.

Источником триггера был внешний генератор с форматом сигнала NIM (-0.8 В), подающийся на вход T0-IN.

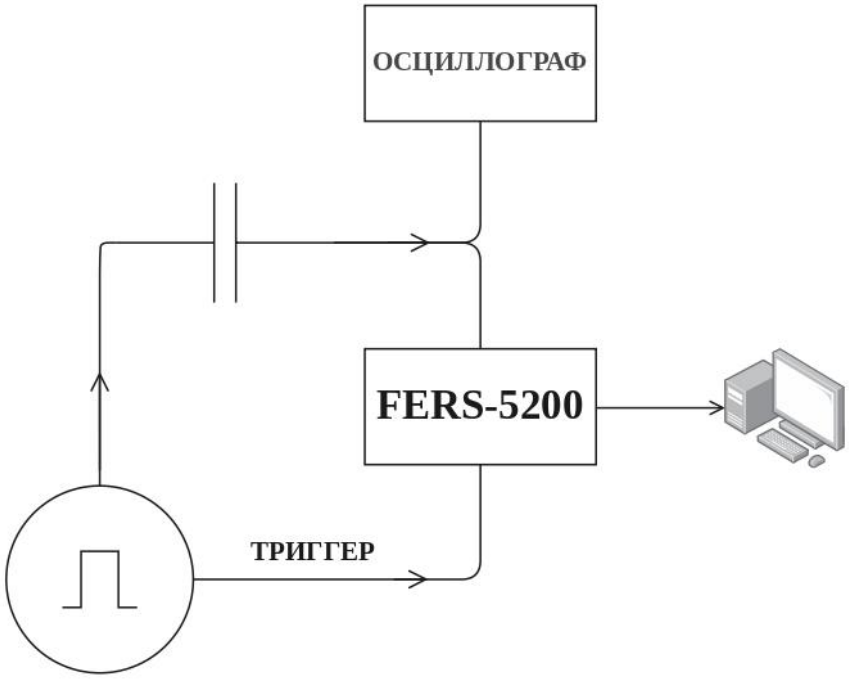


Рисунок 16 – Схема установки при подробной калибровке одного канала

При подробной калибровке одного канала была изменена методика измерений. Так как напряжение на сигнальном пине определяется подстроечным ЦАП и может отличаться от 0, прямое подключение заземленного генератора может привести к появлению тока, направленного от

ЦАП на землю. Такой режим работы может вывести ЦАП из строя. В связи с этим, для того чтобы подаваемое с генератора напряжение не влияло на работу усилительного каскада и ЦАП, между генератором и входом канала была добавлена разделительная емкость.

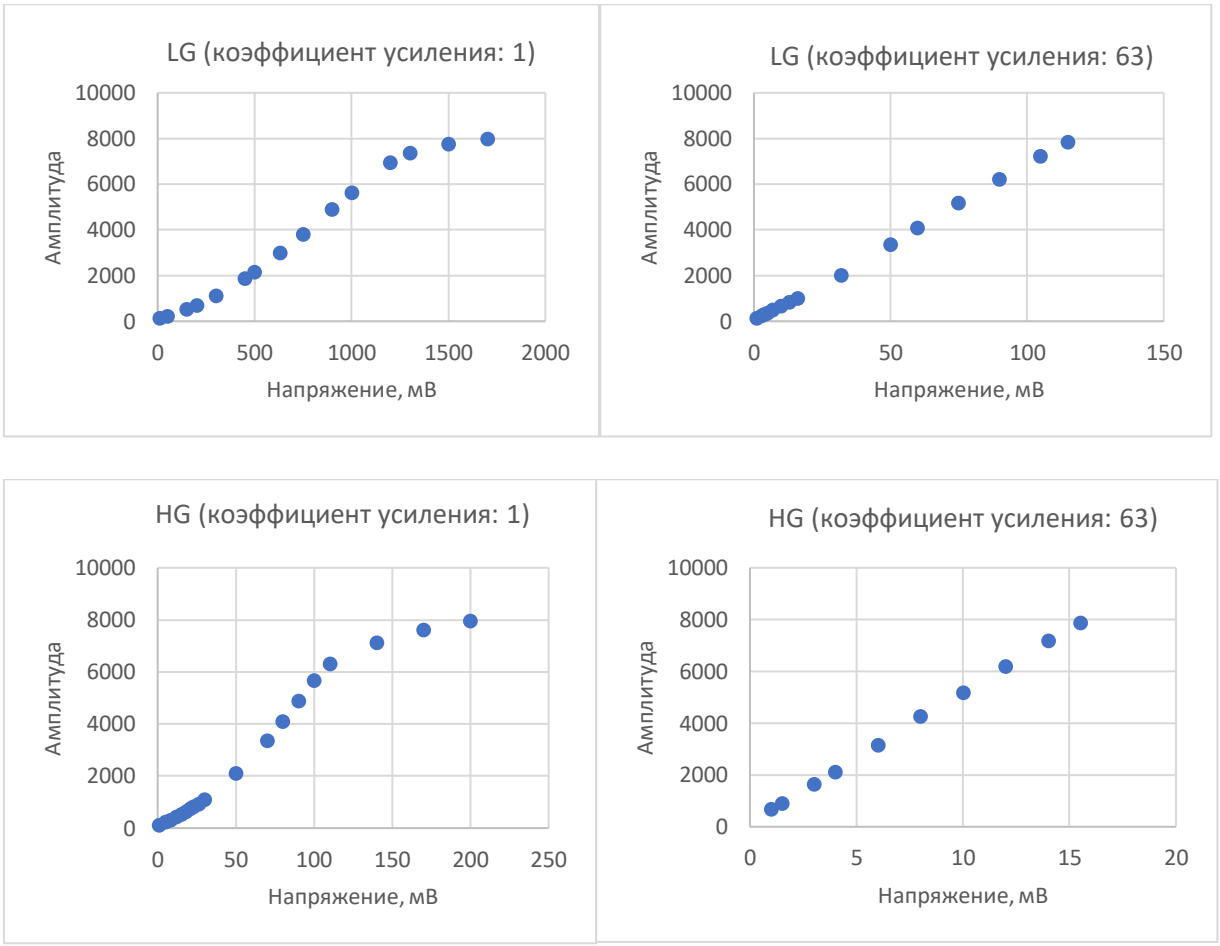


Рисунок 17 – Калибровочные кривые для канала №60 в двух режимах усиления при минимальном (1) и максимальном (63) коэффициентах усиления

По результатам подробной калибровки канала была выявлена нелинейность шкалы, особенно заметная при усилении в режиме Low Gain, что может быть связано с особенностями работы усилительных каскадов.

3.2.4 Калибровка при различном времени формирования

После усиления сигнал поступает на медленный формирователь, в котором происходит фильтрация шумов и изменение его формы. Время формирования (shaping time) – это параметр, определяющий ширину и длительность

измененного импульса до его прихода на пиковый детектор. То есть, в медленном формирователе прямоугольный импульс приобретает сглаженную форму с плавным подъемом, максимумом и спадом, тогда как время формирования влияет на протяженность этого сигнала.

В быстром формирователе время формирования постоянно и равно 15 нс, а в медленном его можно варьировать от 12.5 до 87.5 нс с шагом 12.5 нс. Время можно задать отдельно для усилений LG и HG, но оно является общим для 32 каналов одного чипа. Неправильное соотношение между приходом триггера, временем формирования и параметром hold delay может привести к тому, что в фазе удержания пикового детектора будет захвачено не максимальное значение амплитуды, а ниспадающая или возрастающая области фронта сигнала.

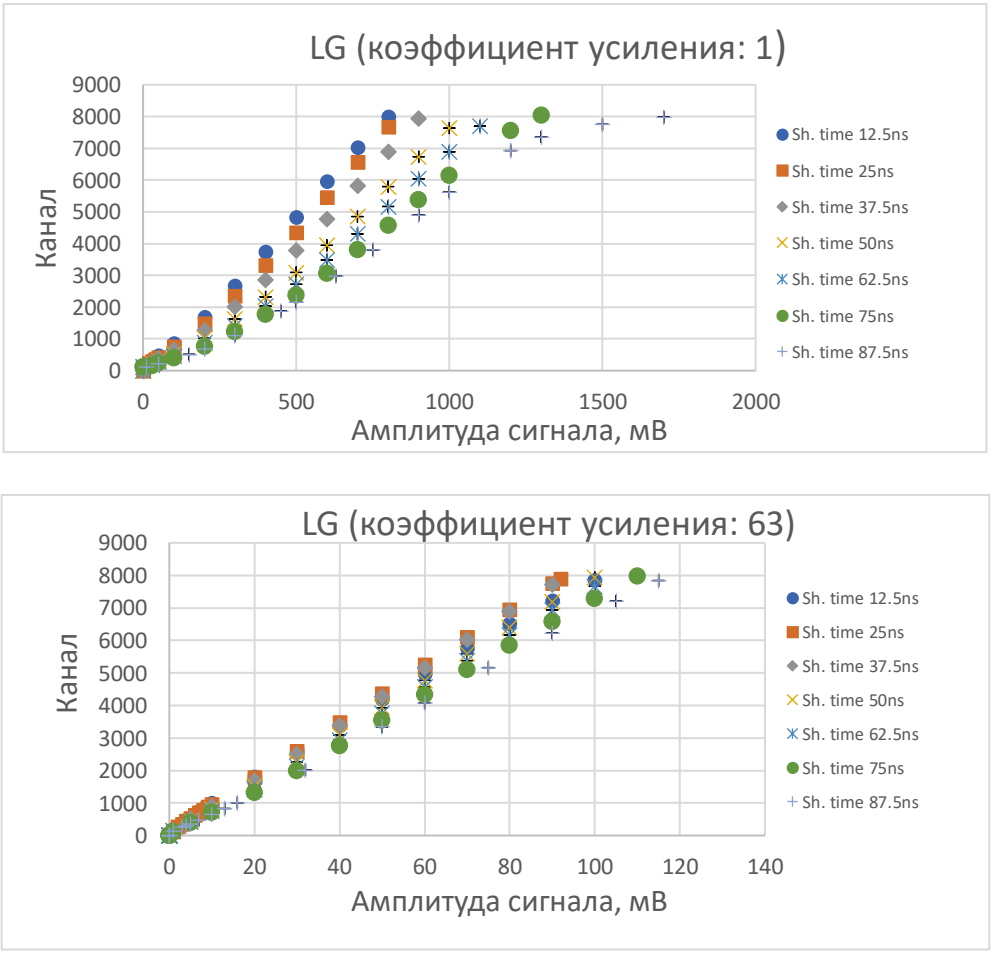


Рисунок 18 – Калибровочные кривые для канала №60 в режиме усиления LG при различном времени формирования

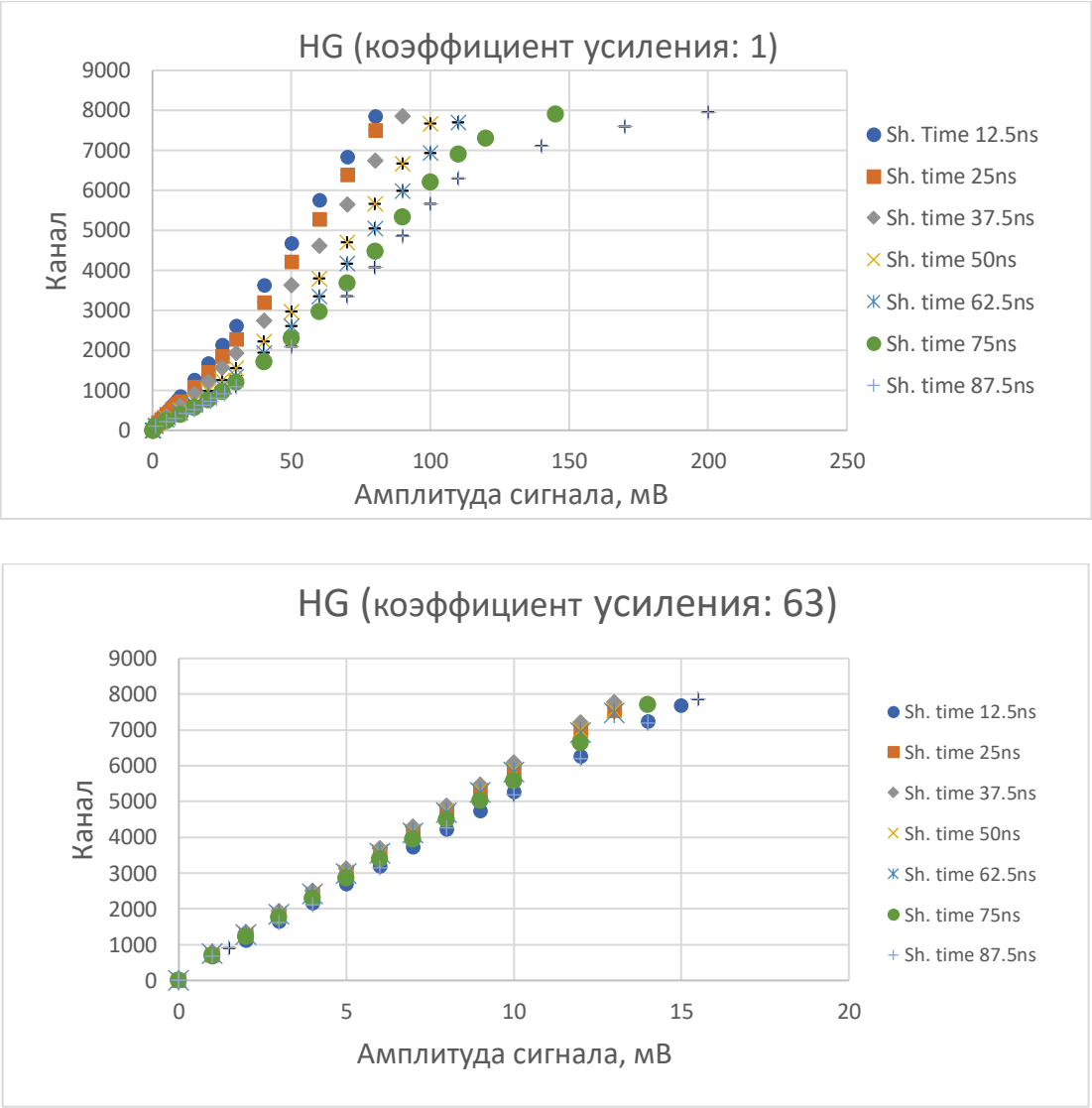


Рисунок 19 – Калибровочные кривые для канала №60 в режиме усиления HG при различном времени формирования

Подробная калибровка канала при различных временах формирования показала, что для случая с малым усилением (k=1) увеличение времени формирования приводит к возрастанию нелинейности.

Заключение

В результате калибровки каналов системы FERS-5200 импульсом от внутреннего генератора, подаваемым на все каналы, наблюдался разброс внутри и между двумя группами чипов ASIC Citiroc-1A. Также было выявлено, что калибровка методом подачи тестового импульса на все каналы одновременно занижает значение амплитуды относительно результатов, полученных при индивидуальной калибровке канала.

При калибровке сигналом с внешнего генератора выявлена нелинейность шкалы, особенно заметная при усилении в режиме LG, что может быть связано с характеристиками усилительных каскадов.

Также было выявлено, что при максимальном усилении (63) влияние эффектов, вносящих нелинейность, выражено слабо.

Калибровка канала при различном времени формирования сигнала показала, что для коротких импульсов наилучшее значение амплитуды достигается при малом времени формирования.

Список литературы

1. Abazov V. et al. Technical Design Report of the Spin Physics Detector at NICA // Nat ural Science Review. — 2025. — Apr. — Vol. 1, no. 1. — P. 1. — Access mode: https://nsr jinr.ru/index.php/nsr/article/view/35.

2. Abazov V. M. et al. Conceptual design of the Spin Physics Detector. — 2021. — Jan. — 2102.00442.

3. Zakharov A. M. et al. Tile Detector Configurations Testing for the SPD Beam-Beam Counter Prototype // Phys. Part. Nucl. Lett. —2024.—Vol. 21, no. 4.—P. 735–738.

4. Tishevsky A. V., Dubinin F. A. et al. Development of the SPD Beam–Beam Counter Scin tillation Detector Prototype with FERS-5200 Front-End Readout System // Phys. Atom. Nucl. —2024.—Vol. 87, no. 4.—P. 451–458.

5. CAEN. FERS-5200 Front-End Readout System. — https://www.caen.it/subfamilies/fers 5200/. —Accessed: 2023-10-20.