

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский ядерный университет  
МИФИ»  
(НИЯУ МИФИ)

УДК 53-05

ОТЧЁТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ  
ИЗМЕРЕНИЕ КРОСС-ТОКОВ В ШЛЕЙФЕ С ПОМОЩЬЮ  
ПЛАТЫ RETIROC 2A

Научный руководитель:  
ассистент каф. 40

\_\_\_\_\_ Ф. А. Дубинин

Выполнил:

\_\_\_\_\_ Д. Д. Кандыбин

Москва 2022

# Содержание

<b>Введение</b>	<b>2</b>
<b>1 Литературный обзор</b>	<b>3</b>
1 Позитронно-эмиссионный томограф . . . . .	3
1.1 Устройство ПЭТ . . . . .	3
2 Сцинтилляционные детекторы . . . . .	4
2.1 Сцинтилляторы . . . . .	4
2.2 SiPM . . . . .	5
3 Petiros 2A . . . . .	7
3.1 Кросс-токи . . . . .	8
<b>2 Выполнение поставленной задачи</b>	<b>10</b>
1 Подготовка установки . . . . .	10
2 Методика . . . . .	12
3 Основное измерение . . . . .	13
Список использованных источников . . . . .	17

# Введение

Физика элементарных частиц в наши дни - одно из ключевых направлений в исследованиях, ведь область ее применения широка. Одной из таких областей является медицина.

Классическим примером прикладной задачи в физике элементарных частиц является позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ) для ядерной медицины. Данное направление является крайне важным, ведь одна из функций томографии – обнаружение злокачественных опухолей, и усовершенствование этого метода локализации области накопления радиофарм-препарата – актуальная задача современной науки.

Актуальной сферой исследований являются времяпролетные ПЭТ (ТОФ-ПЭТ) которые еще два-три десятка лет назад не могли конкурировать с ПЭТ-сканерами на основе ортогерманата висмута (BGO) из-за сочетания малого ослабления пучка и ограниченного пространственного разрешения (вызванного ограниченной светоотдачей сцинтилляторов) [1]. Однако, на сегодняшний день сочетание быстрых фотоумножителей, быстрых сцинтилляторов с высокой плотностью, современной электроники и больших вычислительных мощностей для реконструкции изображений позволяет внедрять в работу ТОФ-ПЭТ-системы.

Целью проведения данной работы являлась разработка методики обнаружения и измерения величины кросс-токов для дальнейших измерений с помощью платы Petiroc2A сигналов с кремниевых фотоумножителей, чтобы в дальнейшем создать прототип ПЭТ-сканера.

# Глава 1

## Литературный обзор

### 1 Позитронно-эмиссионный томограф

Позитронно-эмиссионный томограф (ПЭТ) – это прибор для получения послойного изображения внутренней структуры объекта методом регистрации в режиме совпадений двух аннигиляционных гамма-квантов с энергией 511 кэВ, образующихся при аннигиляции электрона среды и позитрона, излучаемого при  $\beta^+$ -распаде радиоактивного изотопа [2].

Метод позитронно-эмиссионной томографии позволяет при помощи детектирующего оборудования (ПЭТ-сканера) отслеживать распределение в организме биологически активных соединений, меченных радионуклидами и получать объёмные (томографические) изображения зон интереса. Он основан на способности радиофармпрепарата накапливаться в тканях, обладающих высокой метаболической активностью (например, злокачественные опухоли).

#### 1.1 Устройство ПЭТ

ПЭТ-сканер представляет из себя кольцо сцинтилляционных детекторов, располагаемых вокруг исследуемого объекта, которые представляют собой комбинацию сцинтиллятора и фотоумножителя (рисунок 1.1).

Сцинтилляционные детекторы настроены на регистрацию фотопика от излучения с энергией 511 кэВ. Регистрируемые противоположно направленные  $\gamma$ -лучи, возникающие в результате распада позитрония, называются линией совпадения [3]. Каждая линия регистрирует именно те два  $\gamma$ -

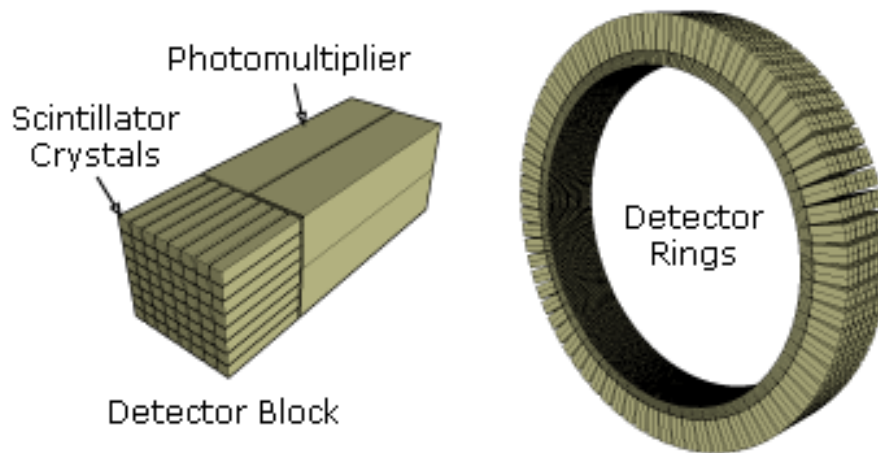


Рисунок 1.1 – Схема ПЭТ

кванта, которые участвовали в акте аннигиляции. Томограф регистрирует эти лучи, означающие, что позитронная аннигиляция произошла где-то на данной линии совпадения.

Большой набор детекторов, расположенных вокруг исследуемого объекта, и компьютерная обработка сигналов с них позволяет выполнить трёхмерную реконструкцию распределения радионуклида в сканируемом объекте.

## 2 Сцинтилляционные детекторы

### 2.1 Сцинтилляторы

Как уже было написано выше, одной из двух составных частей сцинтилляционного детектора является сцинтиллятор. Сцинтилляторами называют вещества, излучающие свет при поглощении ионизирующего излучения (гамма-квантов, альфа-частиц, электронов, и т. д.). Как правило, излучаемое количество фотонов для данного типа излучения приблизительно пропорционально поглощённой энергии, что позволяет получать энергетические спектры излучения [4].

В сцинтилляционных детекторах ядерных излучений свет, излученный при сцинтилляции, собирается на фотоприёмнике, который, как правило, является фотоэлектронным умножителем (ФЭУ), преобразуется в импульс тока, усиливается и записывается той или иной регистрирующей системой.

## 2.2 SiPM

В качестве фотоприемника в сцинтилляционных детекторах может быть использован кремниевый фотоумножитель, который представляет собой микропиксельный лавинный фотодиод (ЛФД), работающий в гейгеровском режиме и предназначенный для счета фотонов (рисунок 2.1). Каждый пиксель SiPMa (silicon photomultiplier) создает импульсный выходной сигнал при обнаружении единичного фотона. Характерный размер ячейки составляет порядка 30–100 мкм (рисунок 2.2). Плотность упаковки матрицы — 100–1000 ячеек/мм<sup>2</sup> [5]. Общий выходной сигнал кремниевого фотоумножителя представляет собой сумму выходных сигналов с каждого пикселя. Кремниевые фотоумножители обладают высокой эффективностью регистрации, необходимой для счета фотонов, и используются в различных областях, которые требуют детектирования очень слабых световых сигналов, в частности на уровне единичных фотонов.

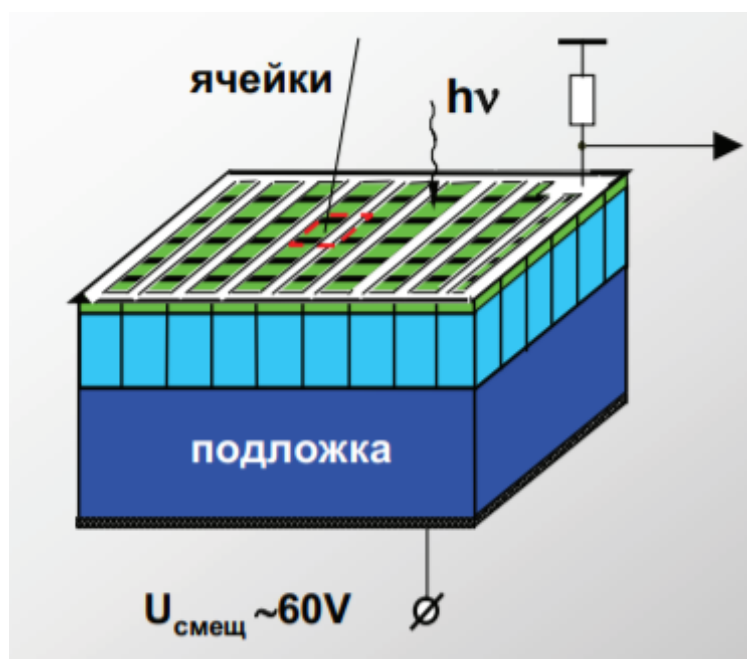


Рисунок 2.1 – Схема SiPM

Кремниевые фотоумножители обеспечивают превосходную обнаружительную способность для счета фотонов. Подключив SiPM к усилителю, на экране осциллографа можно увидеть четкие сигналы в зависимости от количества фотонов (рисунок 2.3). Тот факт, что отдельные пики четко выражены и различимы говорит о том, что существует минимальная вариация между коэффициентами усиления отдельных пикселей, из которых

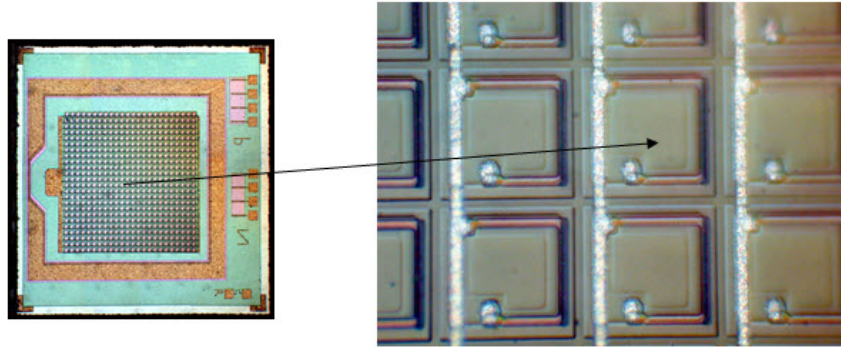


Рисунок 2.2 – Ячейки SiPM

состоит кремниевый фотоумножитель.

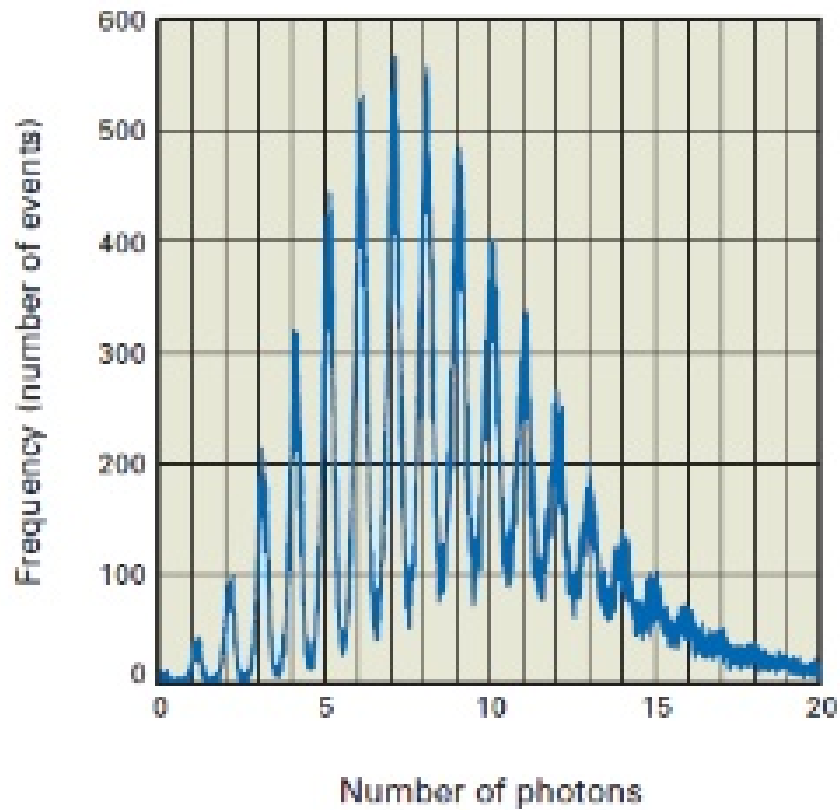


Рисунок 2.3 – Осциллограмма с SiPM

При попадании фотона на активную область фотоумножителя выходной сигнал с каждого пикселя постоянен и не зависит от числа падающих фотонов. Это означает, что каждый пиксель фотодиода позволяет получить информацию о том, попал ли на него фотон. Гасящий резистор (дополнительное сопротивление) присоединен к каждому пикселю и препятствует протеканию выходного тока через него. Поскольку все пиксели фотодиода соединены в один считывающий канал, то выходные импульсы с пикселей суммируются друг с другом, создавая большой импульс. Измеряя высоту

или электрический заряд этого импульса  $Q_{out}$ , можно определить количество фотонов, детектируемых кремниевым фотоумножителем [6]:

$$Q_{out} = C \cdot (U_r - U_{br}) \cdot N_f, \quad (1.1)$$

где  $C$  - емкость одного пикселя,  $U_r$  - обратное напряжение,  $U_{br}$  - напряжение пробоя,  $N_f$  - число пикселей фотоумножителя, которые детектируют фотоны.

### 3 Petiroc 2A

Для считывания сигналов с SiPMов в будущем прототипе будет использоваться плата Petiroc 2A (рисунок 3.1) [7].

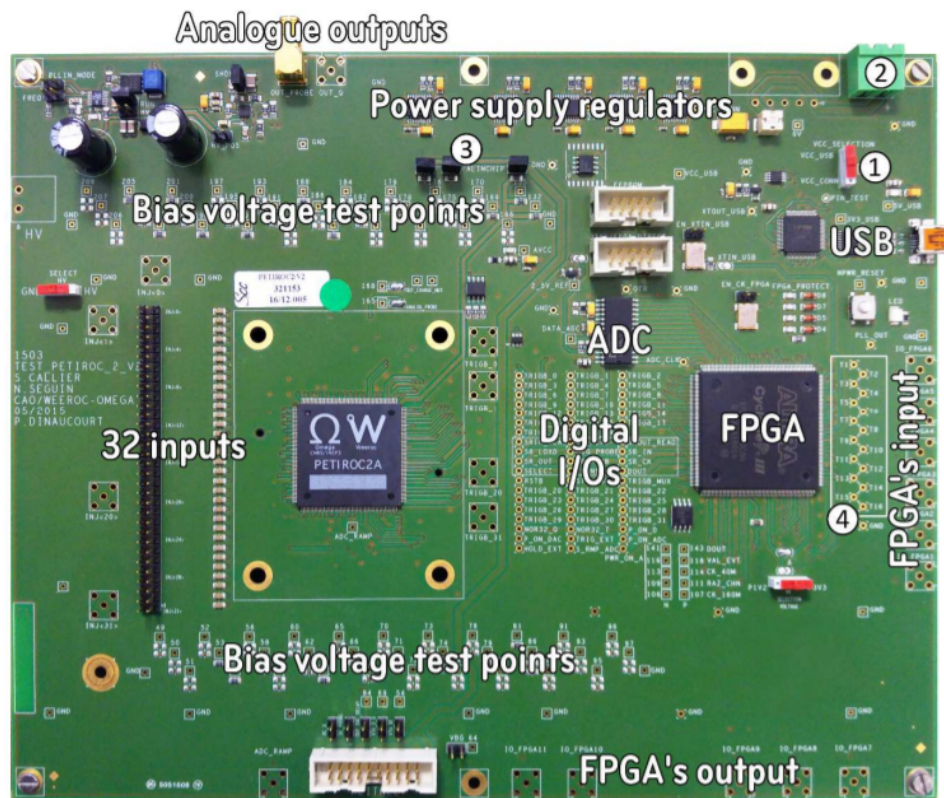


Рисунок 3.1 – Petiroc2A

Эта плата – 32-канальный интерфейсный ASIC (интегральная схема специального назначения), предназначенный для считывания сигнала с кремниевых фотоумножителей с обеими полярностями для высокоточного измерения времени пролета частиц. Энергия и время оцифровываются внутри устройства с помощью 10-разрядного АЦП и ВЦП с 40 пс/бит.



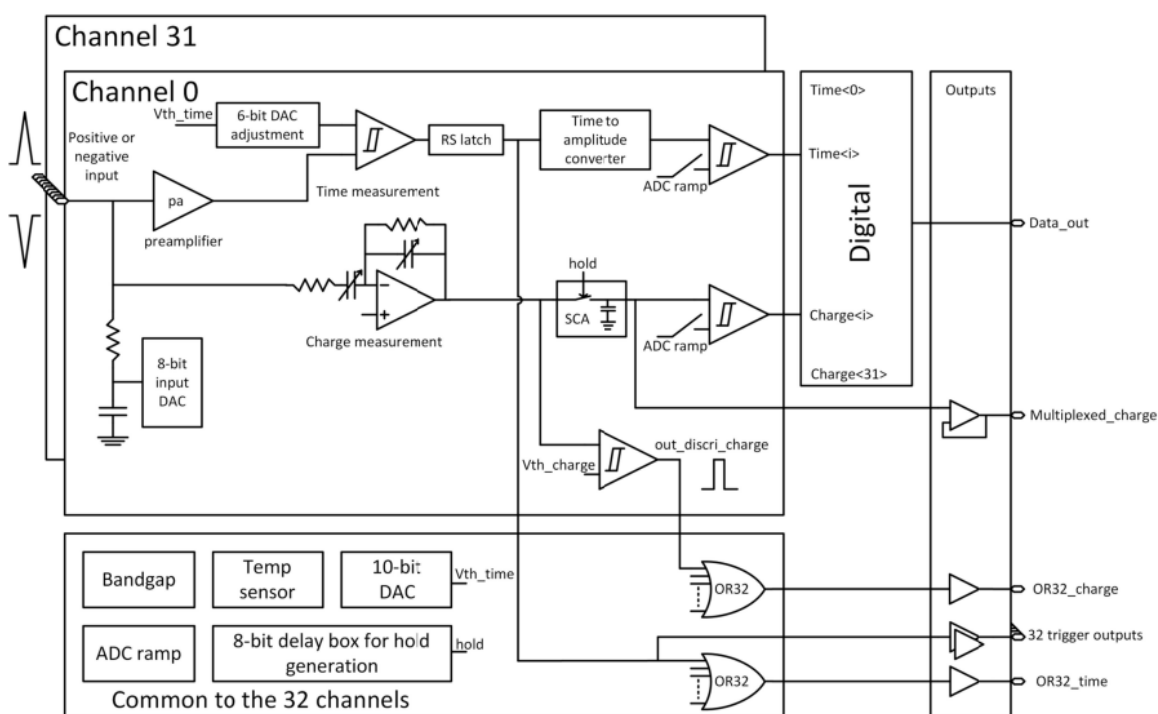


Рисунок 3.2 – Схема платы Petiros2A

Концепция ASIC заключается в объединении двух измерительных линий, которые не будут мешать друг другу, для измерения как времени первого падающего фотона, так и суммарного заряда.

Основное применение Petiros 2A – использование в прототипах TOF-ПЭТ, но при этом плата может быть использована везде, где требуется высокоточное измерение временного разрешения или энергии.

### 3.1 Кросс-токи

При работе с платой имело место срабатывание триггера в некоторых каналах, хотя сигнал на эти каналы не подавался. Была выдвинута гипотеза, что причиной этому является наличие *кросс-тока* – явления, при котором сигнал, передаваемый по одной цепи или каналу системы передачи, создает наведенный сигнал в другой цепи или канале.

Каждый электрический сигнал представляет собой переменное электромагнитное поле. Там, где эти поля перекрываются, они мешают сигналам друг друга. Эти электромагнитные помехи будут создавать кросс-токи.

В плате Petiros 2A имеется 32 самостоятельных входных канала, к которым подключается шлейф – неоптимальное приспособление для передачи сигналов с крутыми фронтами. Проводники в шлейфе не экранированы, по этой причине при прохождении сигнала по какому-либо из них, происходит образование кросс-токов в других проводниках, которые в дальнейшем детектируются платой в каналах, на которые входной сигнал не был отправлен. Необходимо было выработать методику обнаружения и измерения кросс-токов в плате.

## Глава 2

# Выполнение поставленной задачи

### 1 Подготовка установки

Для работы со всеми каналами платы Petiros 2A к его входным разъемам подключался шлейф, обернутый медным экраном. Чтобы иметь возможность комбинировать используемые каналы, работать с каждым по отдельности или с группой каналов одновременно было необходимо его распаять. Шлейф с некоторыми распаянными каналами представлен на рисунке 1.1.

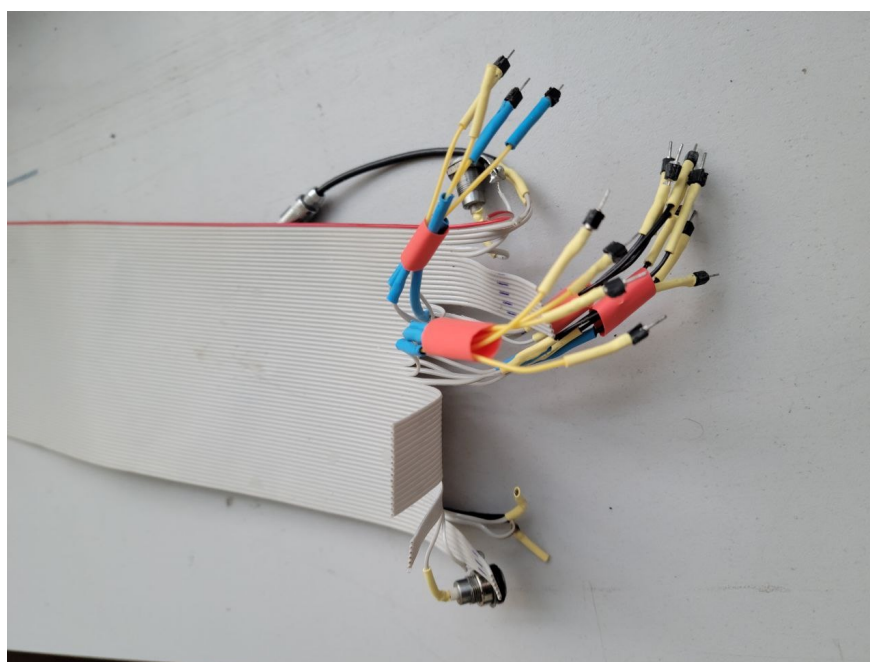


Рисунок 1.1 – Шлейф с распаянными каналами

Также была подготовлена плата с одним разъемом для подключения входного сигнала и группой разъемов для подключения шлейфа. Плата отдельно и с подключенным шлейфом представлены на рисунках 1.2 и 1.3 соответственно. На входной разъем на плате подавался экспоненциальный сигнал с амплитудой 100 мВ.

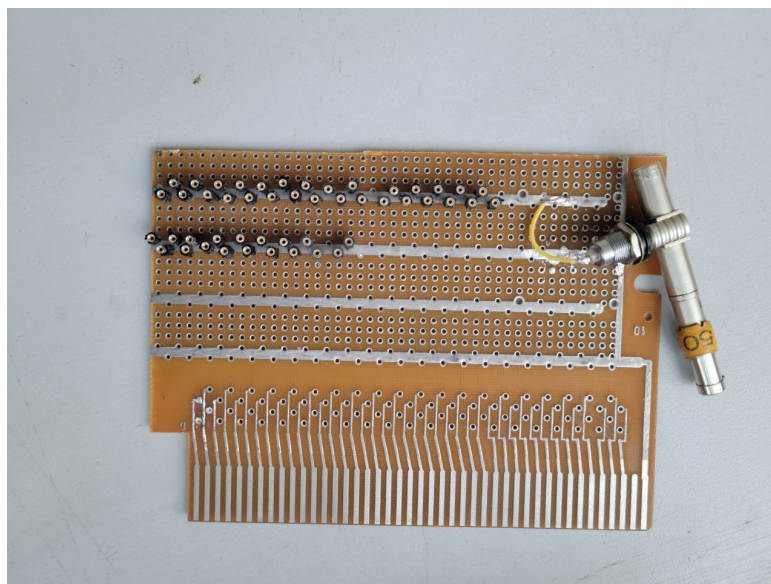


Рисунок 1.2 – Плата

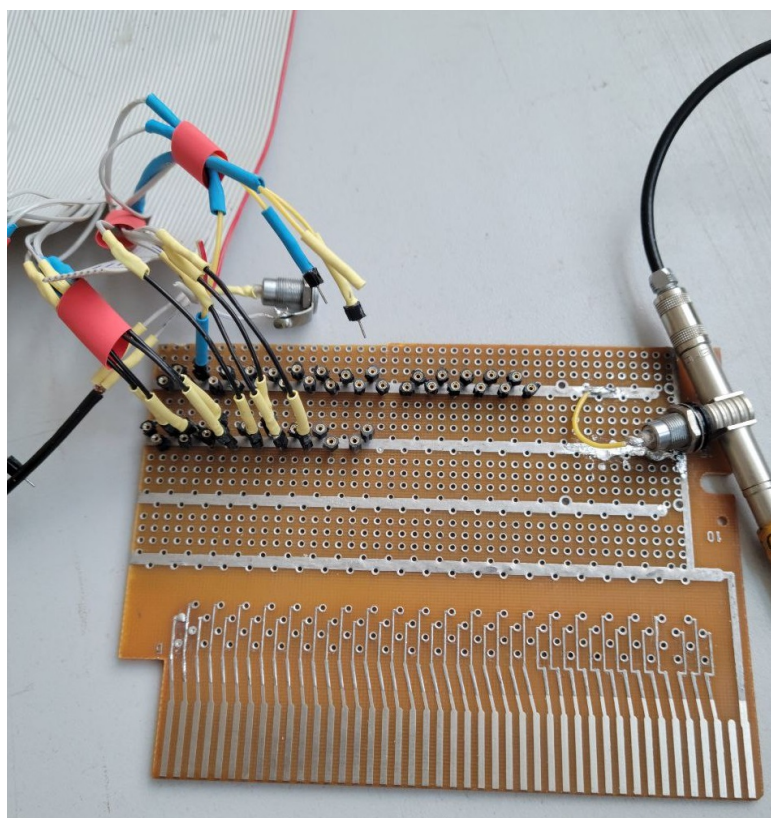


Рисунок 1.3 – Плата с подключенным шлейфом

С данной конфигурацией появляется возможность подавать сигналы на определенные каналы платы Petiros 2A с определенным количеством одновременно подключенных каналов.

## 2 Методика

В программном обеспечении для платы Petiros 2A имеется возможность построить изображение в координатах Амплитуда - Время, связанное с подаваемым сигналом. В отсутствие входного сигнала на некотором канале и при наличии триггера, плата воспринимает шумы и строит аналог сигнала. На рисунке 2.1 представлен такой сигнал с канала номер 3.

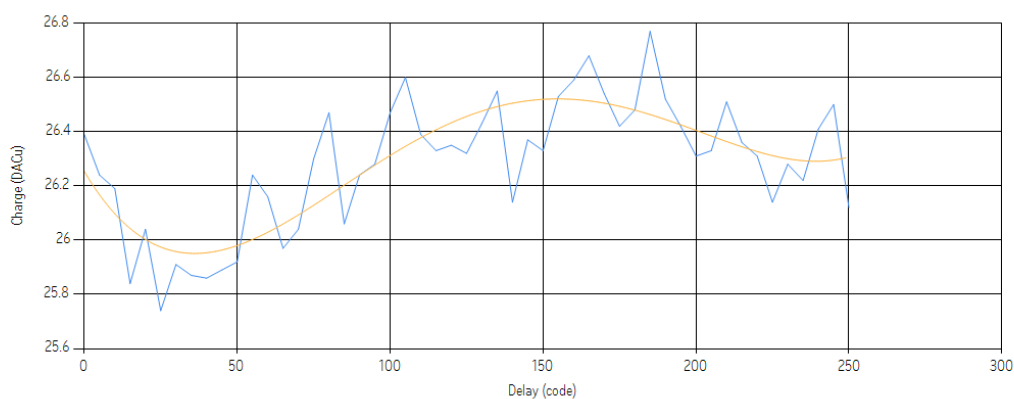


Рисунок 2.1 – Сигнал с канала 3

Однако при подаче входного сигнала на соседние каналы, амплитуда шумового сигнала в текущем канале увеличивается. На рисунке 2.2 представлен пример сигнала, видимого платой в канале 3 при подаче входного сигнала на канал 4.

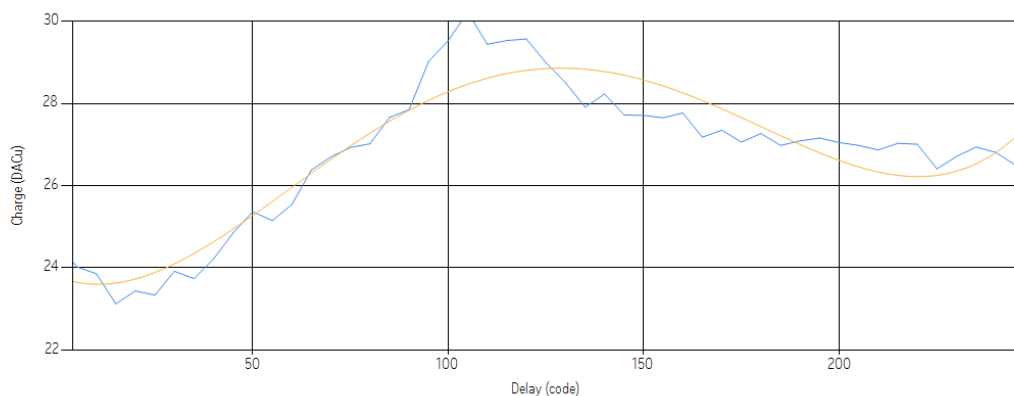


Рисунок 2.2 – Сигнал с канала 3 при подаче сигнала на канал 4

Соответственно, предполагается что причиной изменения амплитуды видимого сигнала являются кросс-токи, и появляется возможность определить их вклад, измеряя изменение амплитуды сигнала в некотором канале, при подаче входного сигнала на соседние.

### 3 Основное измерение

Основные измерения проводились относительно канала номер 21. На него подавался входной сигнал с генератора амплитудой 100 мВ. В дальнейшем измерялась амплитуда на каналах 1, 3, 18-20 и 22-24. Для каждого канала проводилось по 10 измерений с наличием сигнала в канале 21 и в отсутствие его. Пример для канала 20 представлен на рисунках 3.1 и 3.2.

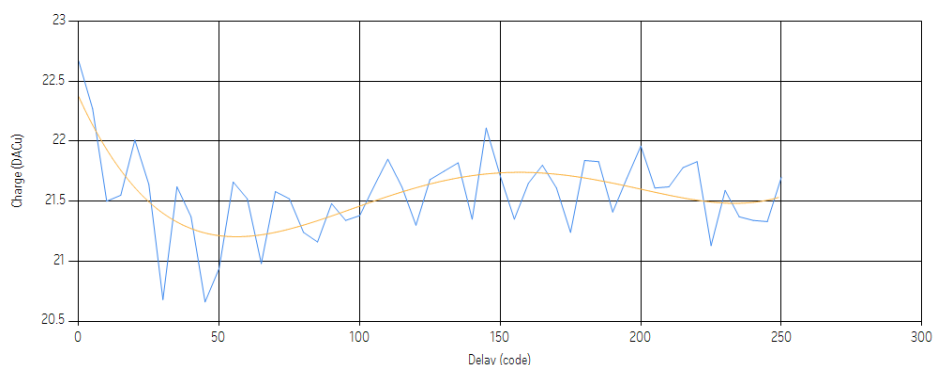


Рисунок 3.1 – Сигнал, видимый платой в канале 20 при отсутствии сигнала в канале 21

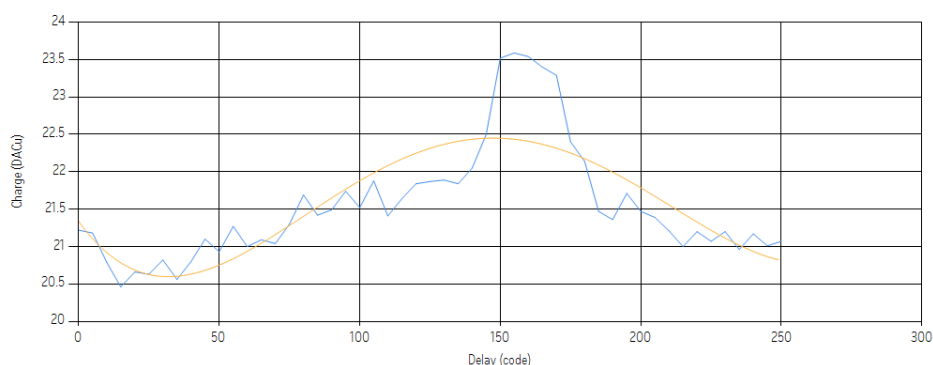


Рисунок 3.2 – Сигнал, видимый платой в канале 20 при подаче сигнала в канал 21

В результате построен график зависимости разности амплитуд сигналов (рисунок 3.3). Погрешности вычислялись методом Стюдента.



Рисунок 3.3 – Зависимость разности амплитуд сигналов в канале от номера этого канала

Аналогичные измерения проводились в отсутствие медного экрана вокруг шлейфа. Результат представлен на рисунках 3.4, 3.5 и 3.6.

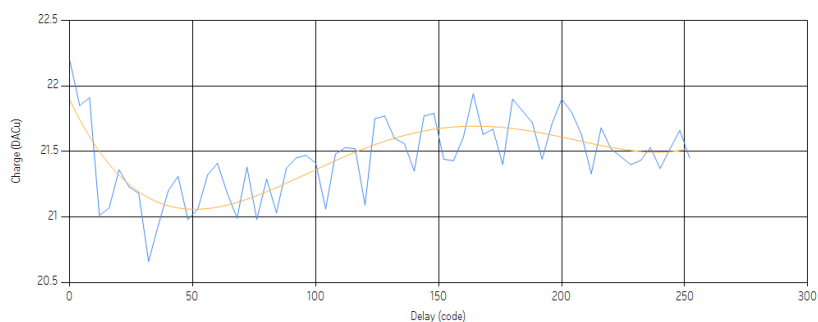


Рисунок 3.4 – Сигнал видимый платой в канале 20 при отсутствии сигнала в канале 21

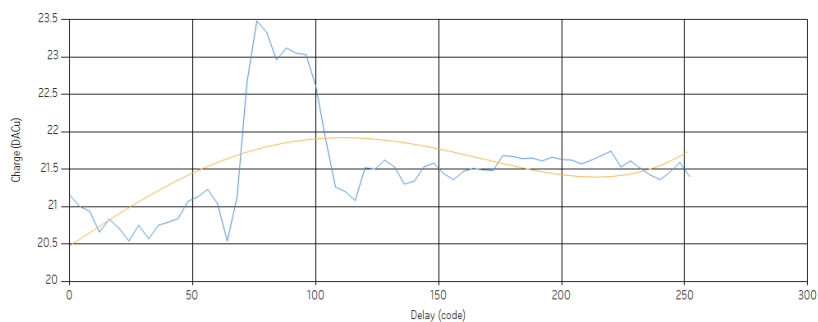


Рисунок 3.5 – Сигнал видимый платой в канале 20 при подаче сигнала в канал 21

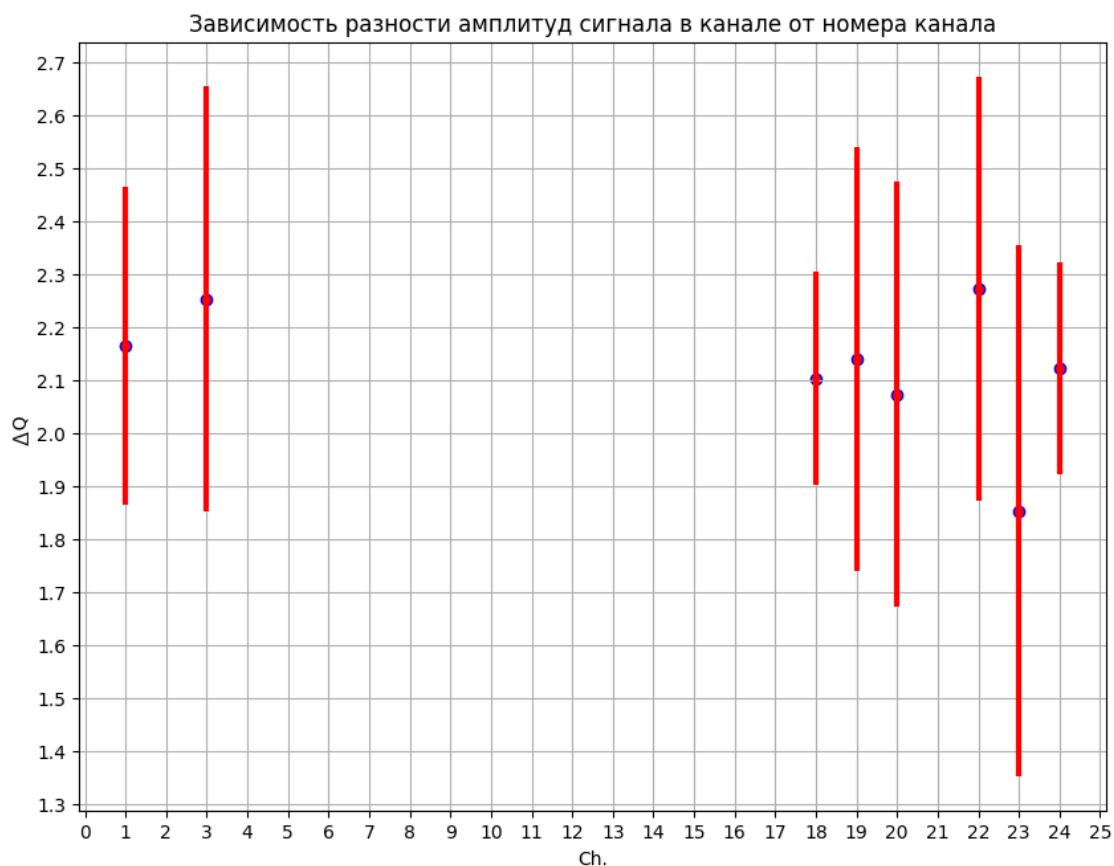


Рисунок 3.6 – Зависимость разности амплитуд сигналов в канале от номера этого канала

На графиках зависимости разности амплитуд от номера канала видно, что разность амплитуд без экрана ниже, чем при его наличии. Это говорит о меньшем вкладе кросс-токов по абсолютному значению. Также из положения точек видно, что значения разности амплитуд не превышают некоторого значения: в случае с экраном  $a_{\max} \approx 2.3 \pm 0.3$  вн. ед. =  $5.2 \pm 0.6$  мВ, без него  $a_{\max} \approx 2.12 \pm 0.15$  вн. ед. =  $4.2 \pm 0.3$  мВ, следовательно, предполагается, что вклад кросс-токов в шумы при работе с платой Petiros 2A можно избежать во всех каналах, выставив достаточный уровень порога для анализируемого платой сигнала.



# Заключение

В работе подготовлена установка для обнаружения кросс-токов в каналах платы Petiros 2A, выработана методика для их определения их вклада, а также измерены амплитуды видимых платой сигналов с каналов при отсутствии в них входного сигнала, но наличии в соседнем.

В результате построены графики зависимости разности амплитуд видимых сигналов от номера канала. Разности амплитуд не превышают некоторого значения:

$$\text{С экраном: } a_{\max} \approx 2.6 \pm 0.3 \text{ вн. ед.} = 5.2 \pm 0.6 \text{ мВ}$$

$$\text{Без экрана: } a_{\max} \approx 2.3 \pm 0.1 \text{ вн. ед.} = 4.6 \pm 0.2 \text{ мВ}$$

поэтому предполагается, что избежание вклада кросс-токов возможно выставлением необходимого уровня внутреннего порога платы.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Experimental time resolution limits of modern SiPMs and TOF-PET detectors exploring different scintillators and Cherenkov emission / S. Gundacker [и др.] // *Physics in Medicine & Biology*. — 2020.
2. *Бекман И. Н.* Ядерная медицина: физические и химические основы. — 2018. — с. 287—293.
3. *Бекман И. Н.* Радиохимия. — 2012.
4. *Шендрик Р. Ю.* Введение в физику высоких энергий. Введение в физику сцинтиляторов. т. 105. — Мир, 2013.
5. *Клемин С., Кузнецов Ю., Филатов Л.* Кремниевый фотоэлектронный умножитель // *ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес*. — 2007. — авг. — с. 80—86.
6. *Иванов И.* Методика оценки и сравнения кремниевых фотоумножителей // *Photonics*. — 2015. — т. 54, № 6. — с. 70—79.
7. *Weeros.* PETIROC2A SOFTWARE & TEST BOARD USER GUIDE //. — 2018.