

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»
(НИЯУ МИФИ)»

УДК 539.1

ОТЧЁТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
**ХАРАКТЕРИСТИКИ 32-КАНАЛЬНОГО МАКЕТА
ПЭТ НА ОСНОВЕ СЦИНТИЛЛЯТОРА GAGG В
СОЧЕТАНИИ С SIRM**

Научный руководитель
к.ф.-м.н., ведущий инженер

_____ Ф. А. Дубинин

Студент

_____ А. Д. Конотоп

Москва 2022

Оглавление

Введение	3
1 Принципиальная схема установки	3
1.1 Плата Petiros 2A	3
1.2 Сцинтилляционный кристалл GAGG(Ce)	4
1.3 Кремниевые фотоумножители (SiPM)	6
1.4 Программное обеспечение. Petiros User Interface	7
2 Экспериментальная часть	7
2.1 Оценка параметра Hold Delay	7
2.2 Оценка величины амплитуды и энергетического разрешения каналов установки	9
3 Заключение	12
Список используемых источников	13

ВВЕДЕНИЕ

Позитронно-эмиссионная томография (сокр. ПЭТ) – метод исследования биохимических и физиологических процессов при помощи введения в организм человека или животного позитрон-излучающего изотопа с последующим измерением аннигиляционного излучения методом совпадений. [1] С помощью данного метода проводится изучение фармакинетики меченых препаратов, а также влияние этих препаратов на метаболизм. Оценка его отклонений от нормы позволяет получить представление о биологических процессах, ответственных за различные заболевания.

Для детального наблюдения за поведением препарата внутри организма применяются специальные установки – позитронно-эмиссионные томографы. Первые изыскания в этой области начались в конце 50-х годов двадцатого века Дэвидом Кулом. В настоящий момент, согласно данным ВОЗ, в Европе насчитывается около пяти сотен установок, в России – 24. [2]

В рамках лаборатории физики нейтрино НИЦ «Курчатовский институт» группой сотрудников собран макет позитронно-эмиссионного томографа на базе специализированной тестовой платы Petiros 2A. В данном отчете описаны результаты получения некоторых основных характеристик данного макета, необходимых для оценки качества и точности работы прибора.

1. ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА УСТАНОВКИ

1.1. ПЛАТА ПЕТИРОС 2А

За основу установки взята тестовая плата на базе интегральной схемы специального назначения (*ASIC*) **Petiros 2A**, разработанной компанией Weegoc. Данная интегральная микросхема создавалась специально для считывания данных с кремниевых фотоумножителей (*SiPM*), в том числе измерение времени регистрации γ -квантов с последующим анализом и обработкой в соответствующем ПО.

Плата обладает набором из 32-х биполярных каналов, к которым можно подключить как одиночные SiPM, так и целые матрицы. Основная концепция данной микросхемы – комбинирование двух измерений (времени регистрации сигнала и его амплитуды) независимым образом. Временной триггер срабатывает по переднему фронту сигнала (начало сцинтилляционной вспышки), амплитудное значение достигается, когда большая часть фотонов вспышки собрана на SiPM, а за амплитуду – величина засвета всего сцинтилляционного кристалла.

Сигнал с фотоумножителя поступает на плату разделяется на два: временную и зарядовую ветвь. Первичный отбор производится на основе срабатывания триггера временного канала, также могут быть применены отборы на основе триггера зарядового канала и на основе совпадений.

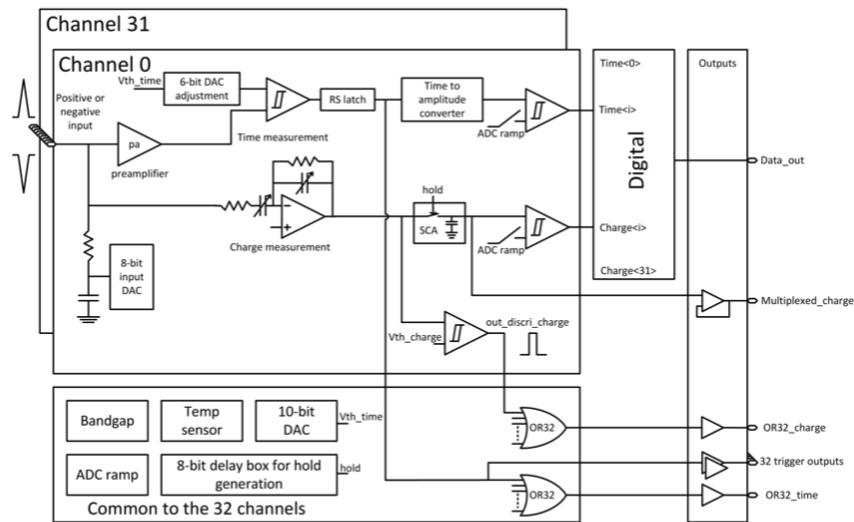


Рисунок 1 — Принципиальная схема тестовой платы Petiros 2A

Пришедший сигнал, предварительно усиленный на предусилителе, оцифровывается с помощью аналогово-цифрового преобразователя (ADC-converter), а полученные величины передаются в ячейки памяти (по четыре на событие для каждого канала), которые затем силами как прилагаемого программного обеспечения, так и при помощи стороннего можно проанализировать и получить необходимые результаты.

1.2. СЦИНТИЛЯЦИОННЫЙ КРИСТАЛЛ GAGG(CE)

В качестве сцинтиллятора применяется сцинтилляционный кристалл GAGG(Ce)* (*гадолиний-алюминий-галлиевый гранат, активированный ионами церия*). Одними из главных его особенностей являются: высокая плотность, так как при увеличении этого параметра кристалла кванты эффективнее теряют энергию в материале в силу прямой зависимости этих величин, позволяя детектировать кванты высоких энергий, высоким коэффициентом ослабления излучения, а также с достаточно высоким световыходом ($\sim 56000 \text{ ph/MeV}$, $T = 293\text{K}$), что позволяет более точно измерять энергию падающих на него γ -квантов.

Таблица 1 — Сравнительные характеристики распространенных сцинтилляционных кристаллов. [3–6]

	CsI(Tl)	LYSO(Ce)	LaCl ₃ (Ce)	NaI(Tl)	GAGG(Ce)
Плотность (г/см ²)	4.51	7.2	3.85	3.67	6.63
Эффективный Z_{eff} (атомный) номер	54	65	59.5	50	54.4
Длина вол- ны мах поглощения (нм)	550	420	350	415	520
Время вы- свечивания (нс)	1,050	40	28	230	87(90%)255(10%)
Световыход (фото- ны/кэВ)	54	32	49	38	56
Гигроско- пичность	Слегка	НЕТ	ДА	ДА	НЕТ
Собственная радиоактив- ность	НЕТ	ДА	НЕТ	НЕТ	ДА

Как видно из таблицы 1, в сравнении с более традиционными сцинтилляторами, такими как NaI(Tl), CsI(Tl), или более современным его прямым конкурентом в лице LYSO(Ce), выбранный нами кристалл не только не хуже, но и превосходит по многим параметрам. Кроме того, GAGG(Ce), как более новый среди остальных, является интересным с точки зрения изучения его работы. Отдельно хочется отметить, что технология выращивания является отечественной, что позволяет свободно в полной мере производить и закупать их на территории страны.

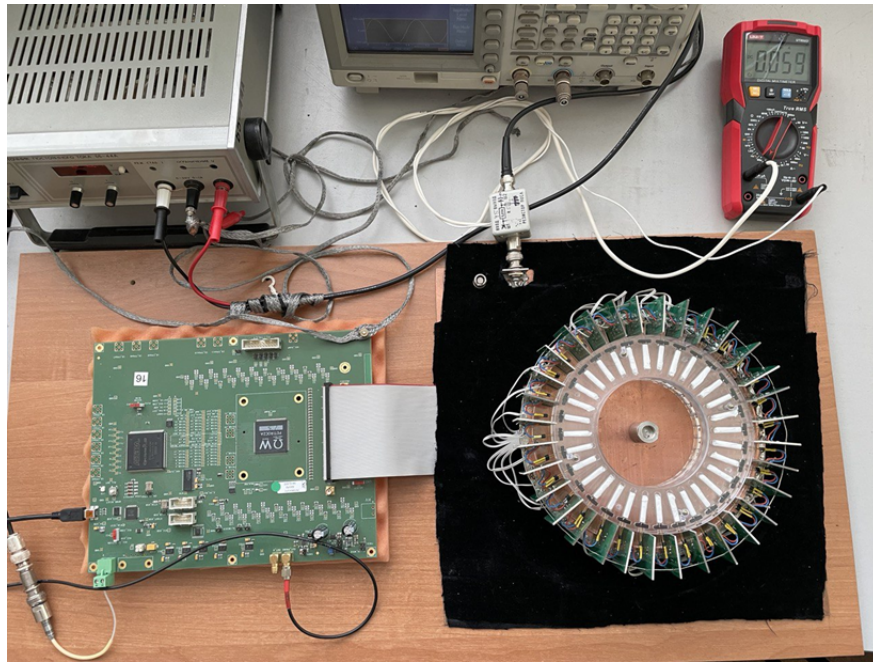


Рисунок 2 — Общий вид установки. Слева – плата Petiros 2A, справа – 32 сцинтиллятора и SiPM

1.3. КРЕМНИЕВЫЕ ФОТОУМНОЖИТЕЛИ (SiPM)

Si-ФЭУ представляют собой матрицу полупроводниковых лавинных фотодиодов (ЛФД, SPAD) работающих в гейгеровском режиме. Пример принципиальной схемы Si-ФЭУ представлено на рисунке 2, у разных производителей схемы могут отличаться. В схеме резистивный элемент нужен для пассивного гашения лавины.

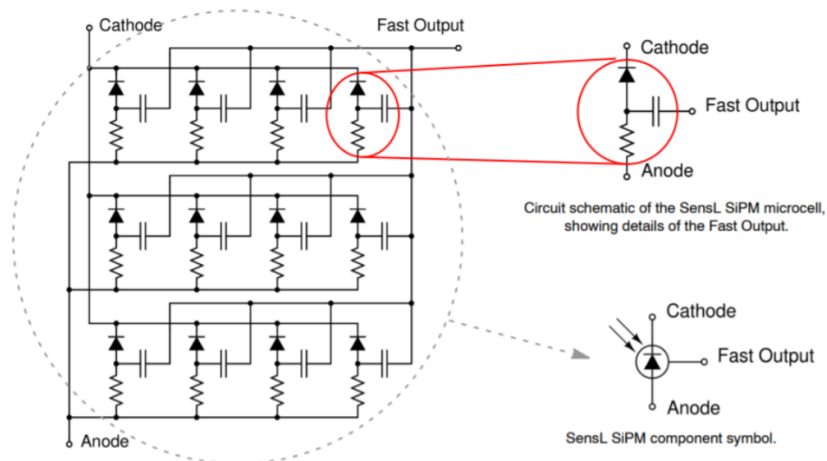


Рисунок 3 — Упрощенная принципиальная схема SiPM (SensL), взятая из технической документации

1.4. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ. PETIROC USER INTERFACE

Данные, собираемые установкой, первично обрабатываются, а также отображаются в реальном времени при помощи поставляемого вместе с платой программного обеспечения Petiroc UI.

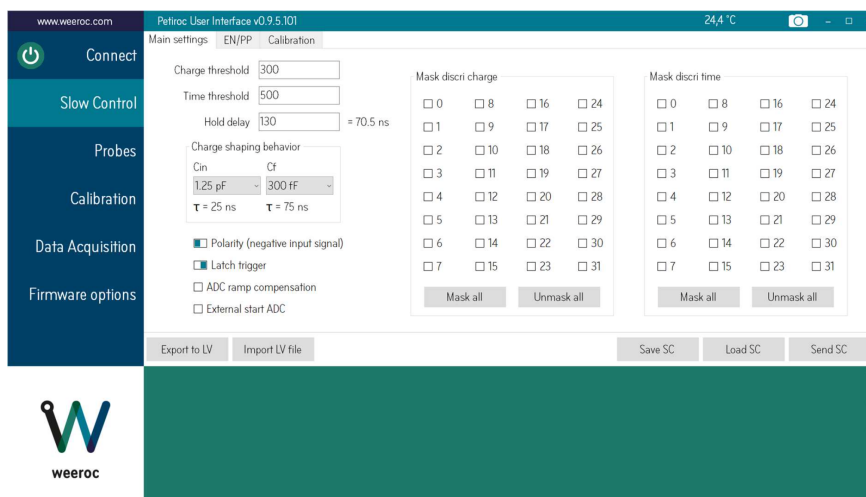


Рисунок 4 — Интерфейс программного обеспечения тестовой платы Petiroc 2A

Это базовое ПО, позволяющее пользователю взаимодействовать с платой. Помимо отображения и анализа данных, есть возможность настраивать основные параметры, например задержки, регулировать и калибровать каналы, а также просматривать сигнал с каждого из каналов по отдельности напрямую при помощи осциллографа.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

2.1. ОЦЕНКА ПАРАМЕТРА HOLD DELAY

В качестве настраиваемых параметров по обработке входного сигнала представляется три величины: порог временного канала, который отсекает сигналы, ниже величины порога, порог по заряду, отсекающий сигналы с зарядом ниже определённой по зарядовому каналу, а также параметр Hold Delay (*Задержка ожидания*), который будет рассмотрен ниже.

Принцип его работы заключается в отсрочке момента измерения энергетических (зарядовых) характеристик сигнала, что позволяет выявить точное положение его амплитуды. Согласно руководству пользователя и инструкции по работе с установкой [7, 8], величина генерируется в диапазоне 27 – 115 ns при помощи 8-bit счетчика и, как следствие, принимает значения 0..255, а формула пересчёта в наносекунды представляется в виде:

$$t_h \approx 27 + 0.34 \cdot n \quad (1)$$

Причём пересчёт предусмотрен программно и выводится в меню работы рядом с его цифровым значением.

Существует два способа установки величины Hold Delay: пользовательский, когда человек собственноручно вводит параметр в соответствующее поле, и программный, когда ПО, варьируя значение величины, самостоятельно находит положение пика и, как следствие, необходимую задержку отсчёта. В случае с ручным вводом, происходит корректное выставление параметра и перевод из цифровых единиц в наносекунды. Однако в случае с программным поиском необходимый пересчёт не работает, хотя нужное цифровое значение появляется в необходимой ячейке. Как итог, было принято решение повести анализ параметра Hold Delay вручную и выяснить, корректное ли значение вносится программой.

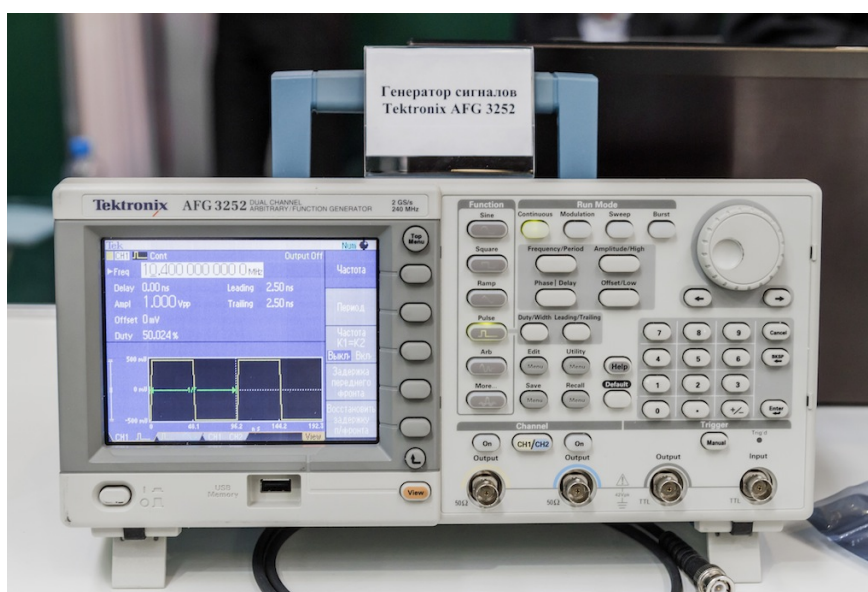


Рисунок 5 — Генератор сигналов Tektronix AFG 3252

В качестве исследуемого сигнала, на вход одного из каналов платы подавались отрицательные симметричные треугольные импульсы, создаваемые внешним генератором Tektronix AFG 3252. Варьируя значение Hold Delay, по показаниям АЦП была получена зависимость амплитуды сигнала от от этого параметра, представленная на рисунке 6:

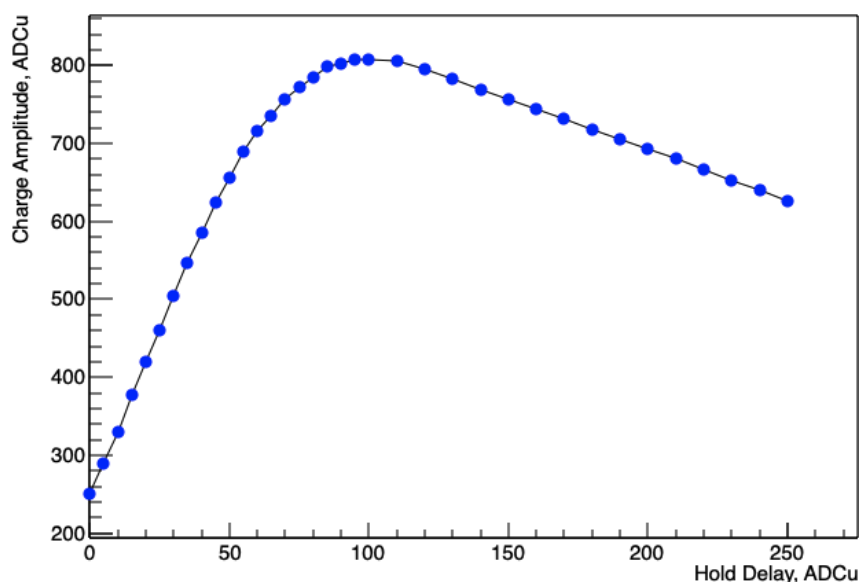


Рисунок 6 — График зависимости амплитуды заряда от величины Hold delay

Как и ожидалось, полученная зависимость соответствует форме входящего обработанного сигнала. Аппроксимируя полиномиально, получено положение пика (в данном случае – 100 ADCu). Полученное значение величины совпадает с подобранным программно, что подтверждает корректность работы метода, а отсутствие пересчёта является программным багом.

2.2. ОЦЕНКА ВЕЛИЧИНЫ АМПЛИТУТЫ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РАЗРЕШЕНИЯ КАНАЛОВ УСТАНОВКИ

Одним из важных параметров любого детектора является его энергетическое разрешение – мера способности различать (разрешать) два результата отклика детектирующей системы на воздействие двух потоков дискретного энергетического излучения близкого друг к другу по энергии. В случае ПЭТ его важность сложно оспаривать: мало того, что необходимо только как можно точнее измерить разницу моментов регистрации гамма-квантов от аннигиляции электрон-позитронной пары, но также гарантировать, что это действительно была именно она. В связи с чем необходимо, чтобы все каналы установки одинаковым энергетическим разрешением.

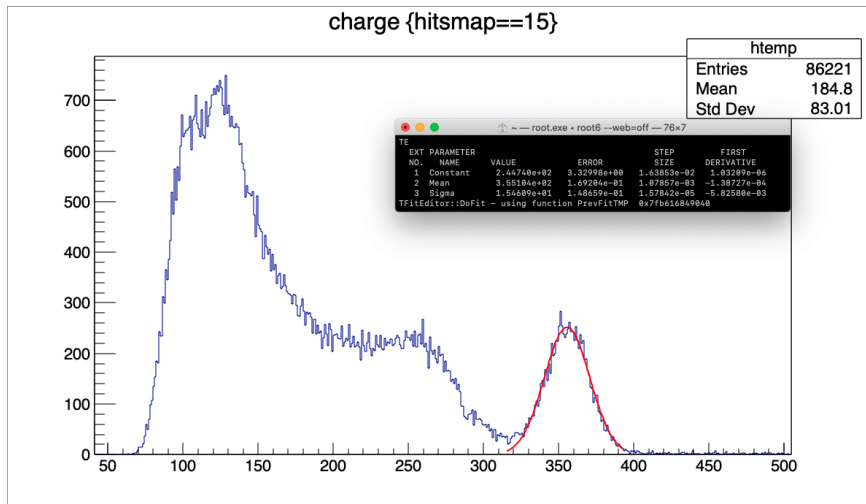


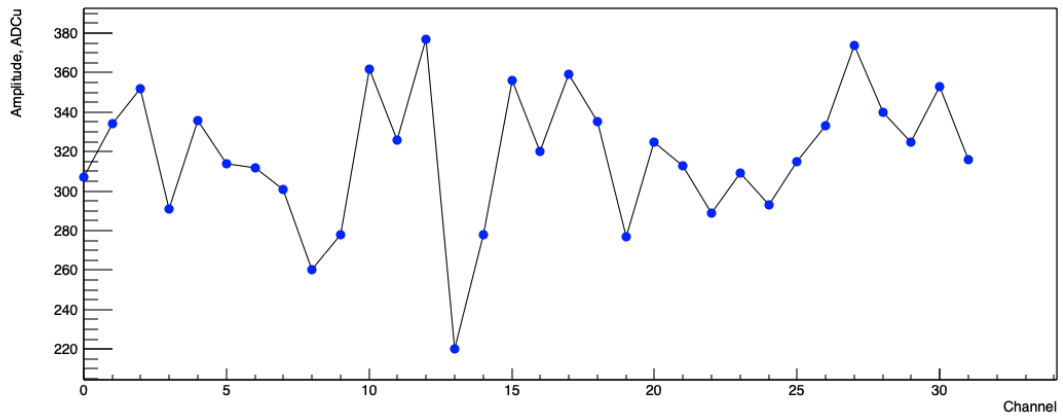
Рисунок 7 — Спектр ^{137}Cs на одном из каналов, в данном случае 16-м, также представлен поиск основных параметров интересующего пика – положения (величина амплитуды сигнала) и его полной ширины на половине высоты (энергетическое разрешение)

В связи с этим, следующим логическим шагом был анализ этих параметров с последующим сравнением и выявлением отклонений. Для этого в течении нескольких часов набирался спектр ^{137}Cs , представленный на рисунке 7. Собранные данные при помощи макроса для математического пакета Root были проанализированы. Результаты отображены на рисунке 8.

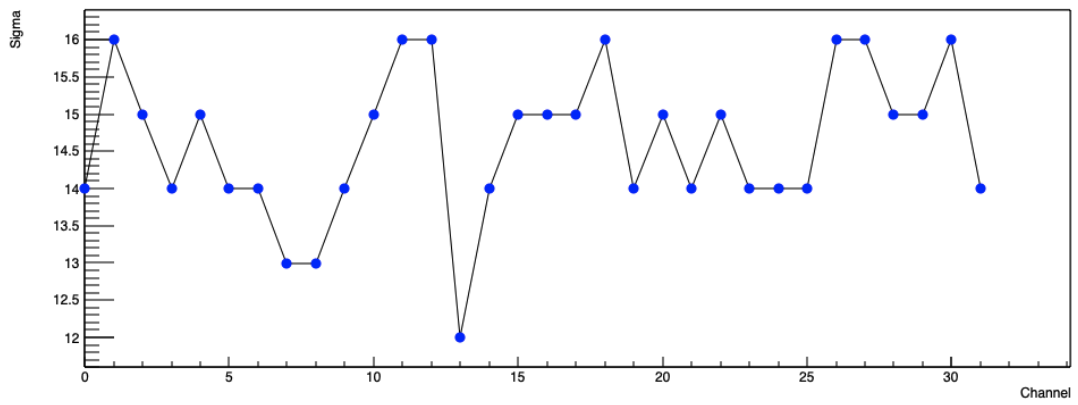
По полученным данным рассчитаны соответствующие средние по всем каналам значения амплитуды и энергетического разрешения:

$$\begin{aligned}
 \text{Mean Ampl.} &= 318 \text{ ADCu}, & \sigma_A &= 34; \\
 \text{Energy Res.} &= 15, & \sigma_E &= 1;
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Заметны явные отклонения канала №13 от нормального поведения остальных. Как видно из графиков. Основных причин подобного поведения может быть две: либо нарушения в работе канала, либо плохой контакт между фотоумножителем и кристаллом. Для проверки первого необходимо найти рабочие точки SiPM, а затем провести попарное сравнение. Если окажется, что отклонений в работе не наблюдается, появится необходимость разбирать установку и собирать конфигурацию канала заново.



а



б

Рисунок 8 — Зависимость амплитуды (а) и энергетического разрешения пика (б) в зависимости от канала

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, за текущий семестр удалось значительно продвинуться в изучении основных характеристик установки.

- изучена экспериментальная плата
- полностью изучено поставляемое программное обеспечение для работы с платой
- оценены рабочие значения задержек времён начала отсчёта
- завершён сбор и анализ данных одного из первых глобальных наборов данных с источником ^{137}Cs
- оценены общие отклонения в работе каналов от среднего значения, вычислены средние амплитуды и энергетические разрешения каналов

Следующим этапом исследования характеристик макета станет временная оценка одновременности детектирования совпадений, что позволит говорить о точности обнаружения источника позитронного распада.

Список используемых источников

- [1] A. Paans, *Positron emission tomography*, CERN (2006) 363.
- [2] WHO, *Positron emission tomography scanners statistics*, *Worldwide Health Organization* (2022) .
- [3] S.-G. Crystals, *Physical properties of common inorganic scintillators*, *Saint-Gobain Crystals* (2007) .
- [4] T. Frach, G. Prescher, C. Degenhardt, R. de Gruyter, A. Schmitz and R. Ballizany, *The digital silicon photomultiplier — principle of operation and intrinsic detector performance*, in *2009 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record (NSS/MIC)*, pp. 1959–1965, 2009.
- [5] M. Jeong and M. Hammig, *Development of hand-held coded-aperture gamma ray imaging system based on gagg(ce) scintillator coupled with sipm array*, *Nuclear Engineering and Technology* **52** (2020) 2572.
- [6] M. Jeong, B. Van, B.T. Wells, L.J. D’Aries and M.D. Hammig, *Comparison between pixelated scintillators: Csi(tl), lacl 3(ce) and lyso(ce) when coupled to a silicon photomultipliers array*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* **893** (2018) 75.
- [7] Weeroc, *PETIROC 2A SOFTWARE & TEST BOARD USER GUIDE*, Weeroc, Inc. (2018).
- [8] Weeroc, *Datasheet Petiroc 2A*, Weeroc, Inc. (2018).