

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

УДК 539.12.01

**ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ**

**Автоматическая настройка параметров кремниевых фотоумножителей
для сцинтилляционного годоскопа с использованием атмосферных
мюонов**

Научный руководитель
к.ф.-м.н.,
ведущий научный сотрудник НИЦ КИ-ИФВЭ
Семёнов П. А.

Выполнил работу
Шерстяных И. С.

Москва, 2026

Реферат

Объект исследования: сцинтилляционный профилометр пучка на мишени эксперимента СПАСЧАРМ, использующий кремниевые фотоумножители (SiPM).

Цель работы: разработка программного инструментария и методики настройки напряжения смещения и порога дискриминации SiPM-каналов профилометра на основе пороговых сканов с использованием атмосферных мюонов.

Методы исследования: программирование на языке Python, управление аппаратурой по протоколу Modbus RTU, логирование параметров измерения, сопоставление временных меток с raw-файлами системы сбора данных, парсинг бинарных файлов, подсчет срабатываний каналов, построение пороговых зависимостей и подготовка к численному дифференцированию.

Результаты: разработано приложение для автоматизированного перебора параметров профилометра. Приложение позволяет задавать диапазоны порога дискриминации и напряжения смещения SiPM, выполнять последовательную запись параметров в регистры электроники, фиксировать статус Modbus-команд и сохранять временные метки измерений. Разработан программный контур подготовки данных к анализу: загрузка raw-файлов с сервера по временным меткам, первичный парсинг бинарного формата, подсчет событий по выбранному каналу, сохранение результатов в базе данных и построение предварительных графиков. Сформулирована методика восстановления амплитудного спектра по зависимости счета от порога дискриминации.

Выводы: выполненный обзорный скан подтвердил работоспособность управляющей и логирующей части комплекса. Основной длительный скан вблизи предварительно выбранной рабочей точки получен, но на момент подготовки отчета находится на стадии постобработки. Разработанный инструментарий является основой для дальнейшего создания полного комплекса настройки каналов профилометра СПАСЧАРМ.

Ключевые слова: кремниевый фотоумножитель, SiPM, профилометр, СПАСЧАРМ, атмосферные мюоны, порог дискриминации, напряжение смещения, Modbus RTU, raw-файл, пороговый скан, восстановление спектра.

Оглавление

Реферат	2
Введение	5
1 Экспериментальная установка и профилометр	7
1.1 Эксперимент СПАСЧАРМ	7
1.2 Назначение и структура профилометра	8
1.3 Особенности считывающей электроники	8
1.4 Настраиваемые параметры	8
2 Методика настройки по пороговым сканам	10
2.1 Стандартная настройка по амплитудному спектру	10
2.2 Пороговый скан как интегральный спектр	11
2.3 Восстановление спектра дифференцированием	12
2.4 Выбор рабочего порога	12
2.5 Выбор напряжения смещения SiPM	13
2.6 Предлагаемый алгоритм настройки одного канала	13
3 Программный комплекс	15
3.1 Общая архитектура	15
3.2 Графический интерфейс	16
3.3 Конфигурация скана	17
3.4 Контроль статуса Modbus-команд	18
3.5 Привязка к raw-файлам и учет UTC	19
3.6 Первичный парсинг raw-формата	20
3.7 База данных и предварительная обработка	20
4 Тестовые измерения	21
4.1 Общие условия	21

4.2	Обзорный двумерный скан	21
4.3	Зависимость счета от порога	22
4.4	Зависимость счета от напряжения смещения	23
4.5	Двумерная карта счета	23
4.6	Предварительная оценка производной	24
4.7	Длительный скан вблизи рабочей точки	25
4.8	Интерпретация текущих результатов	26
5	Перспективы развития комплекса	27
5.1	Завершение обработки длительного скана	27
5.2	Автоматический выбор рабочей точки	27
5.3	Масштабирование на все каналы	28
	Заключение	29
	Список использованных источников	31
A	Пример конфигурации управляющего приложения	32
B	Пример CSV-лога	33
C	Основные этапы обработки данных	34
D	Обозначения	35

Введение

Эксперимент СПАСЧАРМ предназначен для исследования спиновых эффектов в адронных взаимодействиях на ускорительном комплексе У-70. Для успешного проведения физических измерений требуется надежная работа пучковой аппаратуры, в том числе детекторов, контролирующей положение пучка в области поляризованной мишени. Одним из таких детекторов является сцинтилляционный профилометр, построенный на сцинтилляционных элементах и кремниевых фотоумножителях.

Кремниевые фотоумножители обладают высокой чувствительностью, компактностью и устойчивостью к магнитному полю, что делает их удобными для применения в области криостата поляризованной мишени. Вместе с тем отклик SiPM существенно зависит от напряжения смещения, температуры, уровня шумов и выбранного порога дискриминации. Для многоканального детектора ручная настройка этих параметров является трудоемкой, плохо воспроизводимой и не обеспечивает быстрого повторения процедуры при изменении условий работы.

Стандартный подход к настройке SiPM предполагает измерение амплитудного спектра аналогового сигнала. По такому спектру можно отделить область шумовых срабатываний от области сигналов, соответствующих прохождению частиц, и выбрать рабочий порог. В электронике профилометра СПАСЧАРМ аналоговый сигнал после формирователей недоступен для непосредственного измерения. Система регистрации фиксирует только факт превышения заданного порога. Поэтому для настройки требуется использовать косвенную методику, основанную на сканировании порога дискриминации.

При фиксированном пороге измеряется число событий, амплитуда которых оказалась выше этого порога. Такая величина является интегралом от амплитудного спектра. Следовательно, восстановить форму амплитудного распределения можно путем численного дифференцирования зависимости счета от порога. После восстановления спектра появляется возможность выбирать порог и напряжение смещения на основе разделения шумовой и сигнальной областей.

Целью настоящей работы является разработка программного инструментария и методики настройки SiPM-канала профилометра СПАСЧАРМ на основе порогового сканирования с использованием атмосферных мюонов.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. описать особенности профилометра и его считывающей электроники;
2. сформулировать методику восстановления амплитудного спектра по пороговым сканам;
3. разработать приложение для автоматизированного задания порога дискриминации и напряжения смещения;
4. реализовать логирование измерений, включая контроль статуса Modbus-команд;
5. подготовить программный контур загрузки и первичной обработки raw-файлов;
6. выполнить тестовые измерения одного канала и оценить качество полученных зависимостей.

Работа является продолжением предыдущего этапа НИРС, в котором была сформулирована общая задача автоматизации настройки SiPM-каналов профилометра [2]. В настоящем отчете основной акцент сделан на практической реализации программного инструмента, методике пороговых сканов и подготовке данных к последующему восстановлению спектров.

1 Экспериментальная установка и профилометр

1.1. Эксперимент СПАСЧАРМ

Экспериментальная установка СПАСЧАРМ расположена на канале 14 ускорительного комплекса У-70 и предназначена для систематического исследования спиновых эффектов в адронных взаимодействиях [1]. Установка включает систему пучковых детекторов, комплекс поляризованной мишени, спектрометр с трековыми детекторами, электромагнитный калориметр, регистрирующую электронику и систему сбора данных.

Контроль положения пучка в области мишени является важной частью работы установки. При использовании поляризованной мишени необходимо обеспечить прохождение пучка через рабочее вещество мишени, а не через конструкционные элементы криостата. Для этого используются пучковые детекторы, в том числе профилометр, расположенный вблизи выхода из криостата. Схематическое положение профилометра на установке показано на рис. 1.1.

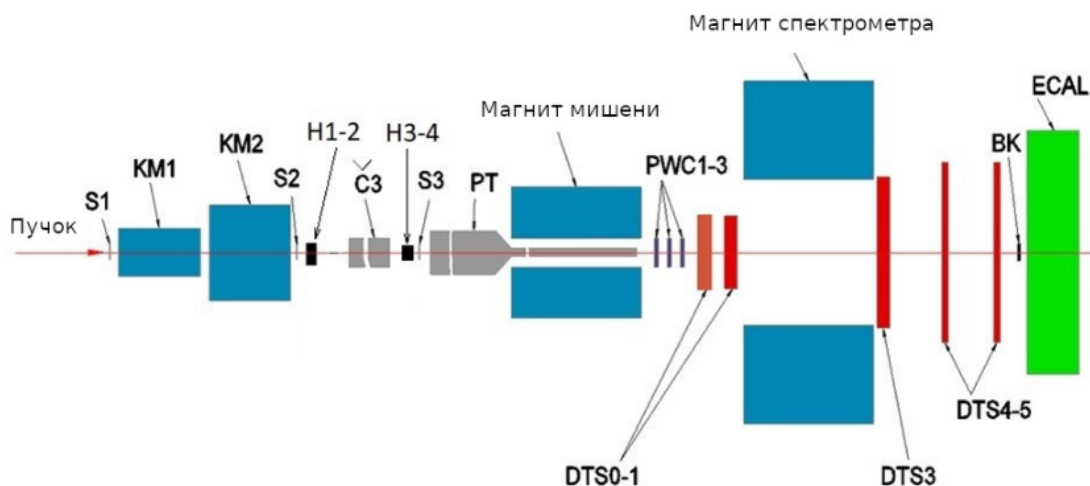


Рис. 1.1 – Схема экспериментальной установки СПАСЧАРМ с указанием положения профилометра PT.

1.2. Назначение и структура профилометра

Профилометр предназначен для измерения профиля пучка в двух взаимно перпендикулярных координатах. Детектор построен на сцинтилляционных элементах, свет с которых регистрируется кремниевыми фотоумножителями. Использование SiPM позволяет работать в области магнитного поля и разместить фотодетекторы непосредственно вблизи сцинтиллятора.

В рассматриваемой системе каналы профилометра организованы в четыре набора по 16 SiPM: X-четные, X-нечетные, Y-четные и Y-нечетные. Такое разбиение удобно для разводки электроники и управления отдельными группами каналов. На текущем этапе методика настройки обрабатывается на одном канале. После отладки алгоритма ее можно распространить на остальные каналы и группы профилометра.

1.3. Особенности считывающей электроники

Сигнал SiPM усиливается, формируется и поступает на компаратор. На уровне последующей цифровой электроники доступна не амплитуда аналогового импульса, а только результат сравнения с заданным порогом. Если сигнал превысил порог, канал считается сработавшим; если не превысил, событие не регистрируется как срабатывание данного канала.

Эта особенность является ключевым ограничением при настройке. Нельзя подключить аналого-цифровой преобразователь к выходу электроники и напрямую получить амплитудный спектр. Вместо этого необходимо задавать разные значения порога и по числу срабатываний восстанавливать интегральную зависимость. Такая процедура требует автоматизации, поскольку ручной перебор порогов и напряжений смещения занимает много времени и затрудняет повторяемость измерений.

1.4. Настраиваемые параметры

В настоящей работе используются два управляемых параметра:

- V_{th} - порог дискриминации, задаваемый в единицах регистра ЦАП;

- V_{bias} - напряжение смещения SiPM, задаваемое в единицах регистра управляющей электроники.

В программной реализации эти параметры обозначаются как `param1` и `param2`: параметр `param1` соответствует порогу дискриминации V_{th} , а параметр `param2` соответствует напряжению смещения V_{bias} . Предварительно вручную подобранная рабочая область находится вблизи $V_{th} \approx 30$ и $V_{bias} \approx 2470$ в единицах управления.

2 Методика настройки по пороговым сканам

2.1. Стандартная настройка по амплитудному спектру

В стандартной задаче настройки SiPM измеряется амплитудный спектр сигналов. В области малых амплитуд расположен шумовой пик, связанный с темновым счетом, электронными шумами, оптическими перекрестными срабатываниями и другими неидеальностями фотодетектора и электроники. В области больших амплитуд располагаются сигналы от прохождения частиц через сцинтиллятор.

Рабочий порог выбирают между шумовой областью и областью полезных сигналов. При таком выборе шумовые срабатывания подавляются, но эффективность регистрации частиц сохраняется. Схематический вид идеализированного амплитудного спектра показан на рис. 2.1.

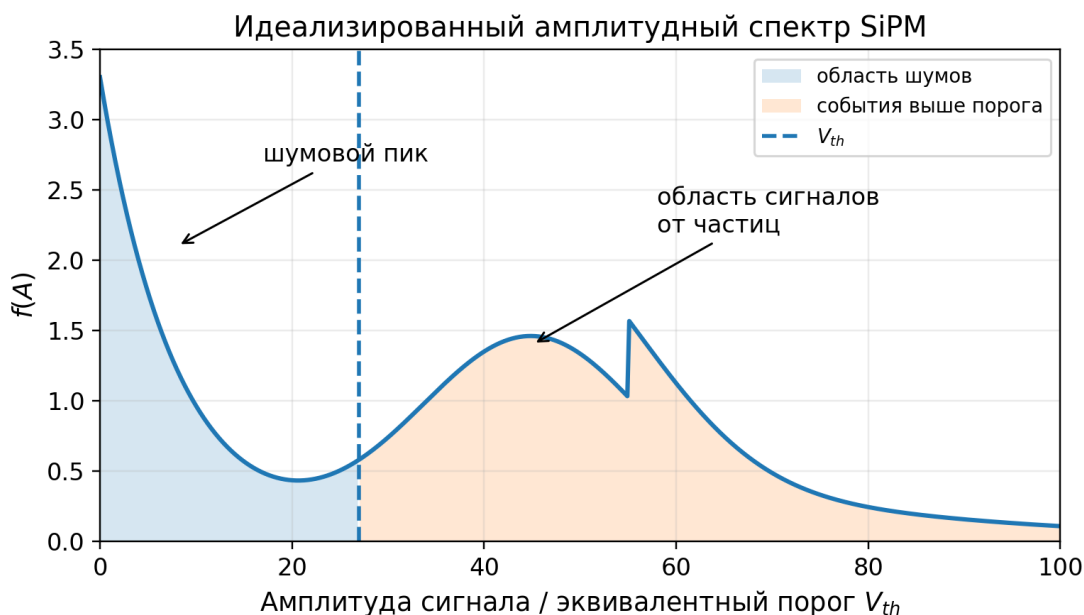


Рис. 2.1 – Идеализированный амплитудный спектр SiPM и выбор рабочего порога V_{th} между шумовой областью и областью полезных сигналов.

2.2. Пороговый скан как интегральный спектр

Пусть $f(A)$ - амплитудный спектр сигналов SiPM, где A обозначает амплитуду импульса. При установке порога V_{th} электроника регистрирует только события, амплитуда которых превышает этот порог. Поэтому измеренное число событий при данном пороге равно интегралу амплитудного спектра от порога до бесконечности:

$$N(V_{th}) = \int_{V_{th}}^{\infty} f(A) dA. \quad (2.1)$$

Здесь V_{th} используется как величина, пропорциональная пороговой амплитуде. Если время набора данных в каждой точке одинаково, то вместо полного числа событий можно использовать скорость счета. При этом форма зависимости не меняется с точностью до постоянного множителя.

Таким образом, результат порогового сканирования представляет собой интегральный спектр. Качественный вид такой зависимости показан на рис. 2.2. С ростом порога число зарегистрированных событий должно уменьшаться, поскольку все большая часть амплитудного распределения отсекается.

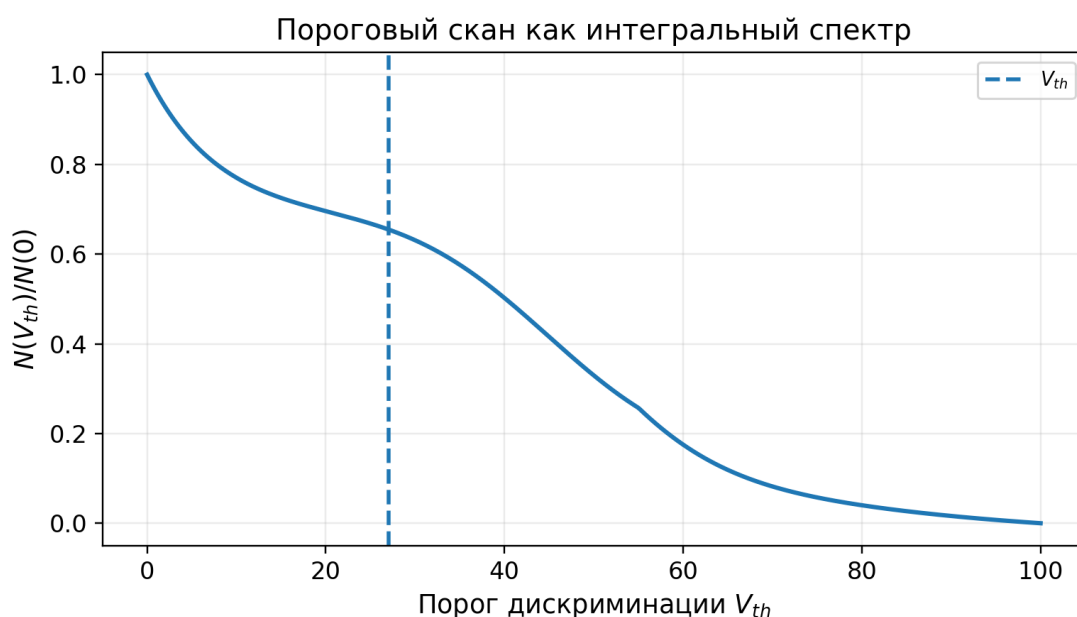


Рис. 2.2 – Пороговый скан $N(V_{th})$ как интегральная форма амплитудного спектра.

2.3. Восстановление спектра дифференцированием

Из формулы (2.1) следует, что амплитудное распределение можно восстановить через производную интегральной зависимости:

$$f(V_{th}) \sim -\frac{dN(V_{th})}{dV_{th}}. \quad (2.2)$$

Для дискретного набора порогов используется конечная разность:

$$f_i \sim -\frac{N_{i+1} - N_i}{V_{th,i+1} - V_{th,i}}. \quad (2.3)$$

Знак минус связан с тем, что интегральная зависимость убывает с ростом порога. В реальном измерении перед дифференцированием может потребоваться сглаживание или объединение точек, поскольку численное дифференцирование усиливает статистические флуктуации. Поэтому для надежного восстановления спектра необходим достаточный набор статистики в каждой точке.

2.4. Выбор рабочего порога

После восстановления спектра рабочий порог должен выбираться по двум условиям:

1. порог должен быть выше области интенсивных шумовых срабатываний;
2. порог должен быть ниже основной области полезных сигналов, чтобы не терять эффективность регистрации атмосферных мюонов.

На практике предпочтительно выбирать не единственную точку, а рабочую область, в которой малые изменения V_{th} не приводят к резкому изменению скорости счета полезных событий. Такой выбор повышает устойчивость настройки к дрейфу параметров электроники и внешних условий.

2.5. Выбор напряжения смещения SiPM

Напряжение смещения V_{bias} определяет коэффициент усиления SiPM и влияет как на амплитуду полезных сигналов, так и на уровень шумов. При слишком малом V_{bias} усиления недостаточно, и полезные сигналы могут оказаться ниже порога. При слишком большом V_{bias} возрастает частота шумовых срабатываний, и шумовая область начинает доминировать над полезным сигналом.

Качественно эти режимы показаны на рис. 2.3. Оптимальный режим соответствует ситуации, когда сигнал от атмосферных мюонов достаточно отделен от шумовой области, а рабочий порог можно поставить между ними.

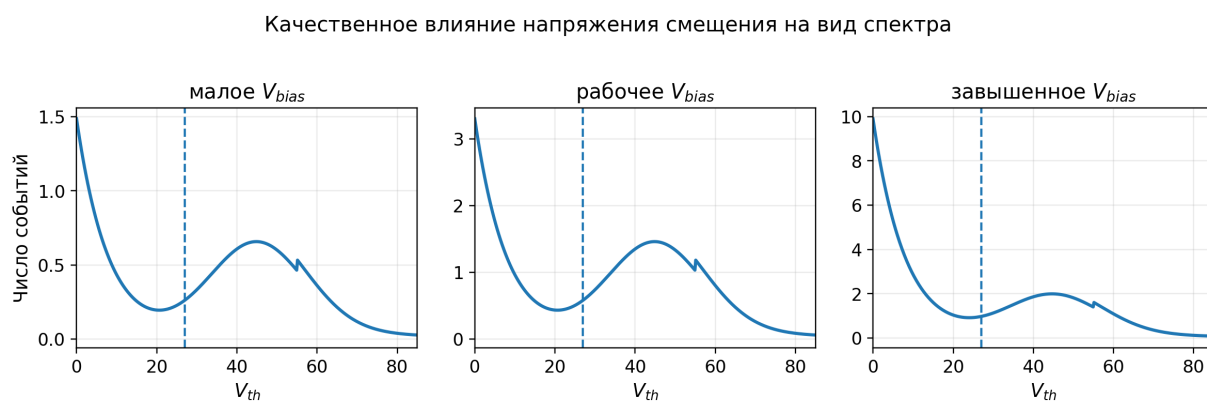


Рис. 2.3 – Качественное влияние напряжения смещения V_{bias} на вид спектра: недостаточное усиление, рабочая область и режим с повышенным шумом.

2.6. Предлагаемый алгоритм настройки одного канала

На основе описанных соображений процедура настройки одного канала может быть представлена следующим образом:

1. выбрать начальный диапазон V_{bias} вокруг предварительно подобранного значения;
2. для каждого значения V_{bias} выполнить сканирование по V_{th} ;
3. для каждой точки сохранить параметры, временную метку и статус записи в регистры;
4. сопоставить временной интервал измерения с raw-файлами системы сбора данных;

5. посчитать число событий в выбранном канале и нормировать его на время набора;
6. построить зависимость $N(V_{th})$ для каждого V_{bias} ;
7. после набора достаточной статистики выполнить численное дифференцирование и оценить форму спектра;
8. выбрать рабочую пару (V_{bias}, V_{th}) по разделению шумовой и сигнальной областей.

На текущем этапе работы реализованы первые шесть пунктов и подготовлены модули для выполнения последующих пунктов. Основной длительный набор данных находится на стадии обработки.

3 Программный комплекс

3.1. Общая архитектура

Разработанный программный комплекс предназначен для автоматизированного задания параметров профилометра и подготовки данных к анализу. Его архитектура показана на рис. 3.1. Комплекс состоит из управляющей части, логирующей части, модуля загрузки raw-файлов, модуля первичного парсинга данных и модулей предварительной визуализации.



Рис. 3.1 – Общая схема программного комплекса: от задания параметров до первичной визуализации данных.

Основные модули комплекса перечислены в табл. 3.1.

Таблица 3.1 – Основные модули программного комплекса

Модуль	Назначение
<code>main.py</code>	Точка входа, загрузка конфигурации, запуск графического интерфейса.
<code>gui.py</code>	Графический интерфейс для задания диапазонов, запуска, паузы и остановки измерения.
<code>experiment_runner.py</code>	Цикл перебора комбинаций параметров и вызова функций записи.
<code>modbus.py</code> , <code>modbus_controller.py</code>	Запись параметров в регистры устройства по Modbus RTU и обработка ошибок связи.
<code>logger.py</code>	Сохранение временных меток, параметров и статусов команд в CSV-лог.
<code>http_file.py</code>	Поиск и загрузка raw-файлов с HTTP-сервера по временным меткам.
<code>parse_file.py</code>	Парсинг raw-файлов и подсчет срабатываний каналов.
<code>process.py</code>	Сопоставление интервалов лога с raw-файлами и сохранение результата в SQLite.
<code>diff.py</code> , <code>diffViz.py</code>	Предварительное вычисление разностей по порогу и визуализация результатов.

3.2. Графический интерфейс

Для управления измерением разработан графический интерфейс. Он позволяет задавать параметры подключения, адрес устройства, номера регистров, диапазоны сканирования, шаги и задержку между итерациями. Также интерфейс показывает текущее состояние эксперимента, прогресс выполнения и журнал событий. Внешний вид приложения приведен на рис. 3.2.

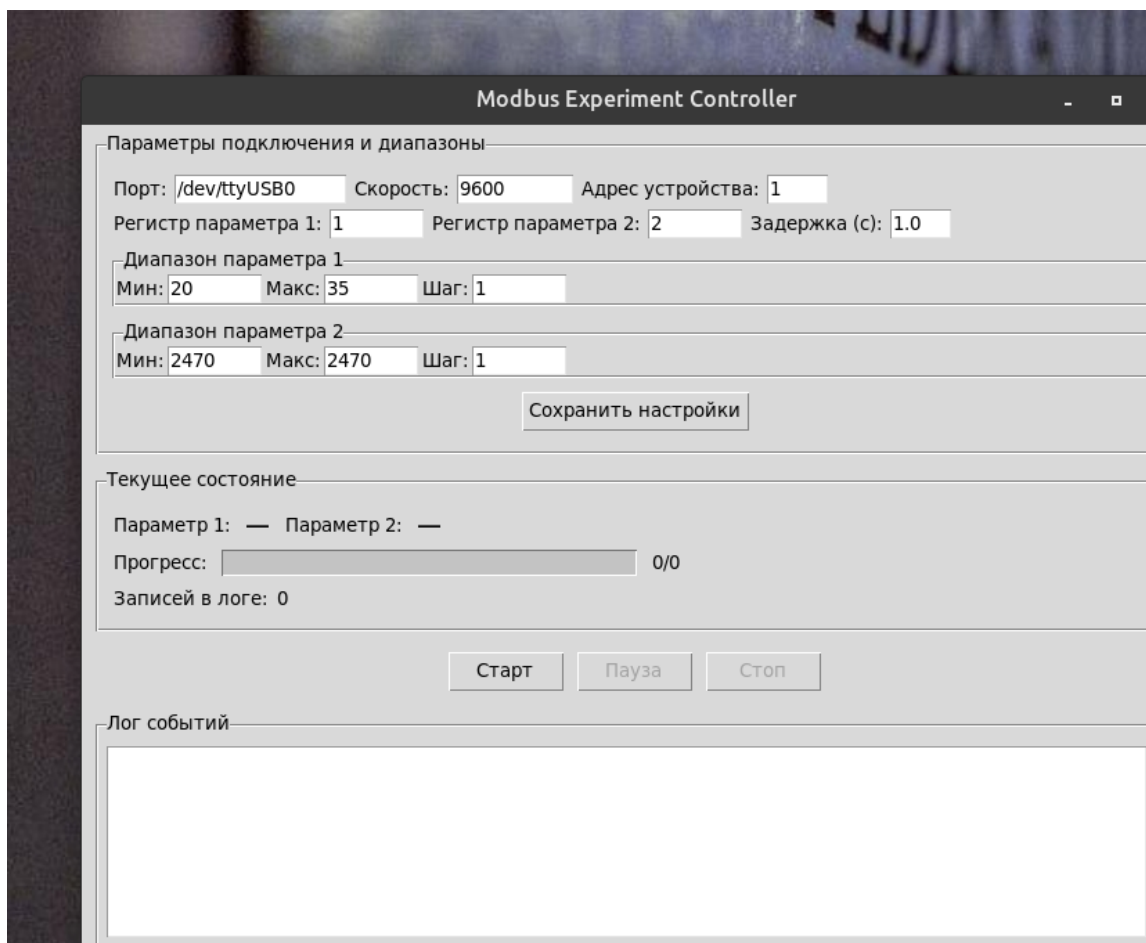


Рис. 3.2 – Графический интерфейс приложения для автоматизированного перебора порога дискриминации и напряжения смещения SiPM.

Наличие интерфейса важно не только для удобства, но и для воспроизводимости измерения. Все параметры скана задаются явно, сохраняются в конфигурации и фиксируются в логе. Это позволяет повторить измерение с теми же диапазонами и шагами.

3.3. Конфигурация скана

Параметры работы приложения задаются в конфигурационном файле. В конфигурации указываются последовательный порт, скорость обмена, адрес устройства, номера регистров, диапазоны двух параметров, задержки и имя лог-файла. Пример полей конфигурации приведен в табл. 3.2.

Таблица 3.2 – Основные параметры конфигурации приложения

Параметр	Назначение
<code>port</code>	Последовательный порт Modbus RTU.
<code>baudrate</code>	Скорость обмена.
<code>device_address</code>	Адрес ведомого устройства.
<code>register_1</code>	Регистр порога дискриминации V_{th} .
<code>register_2</code>	Регистр напряжения смещения V_{bias} .
<code>range_1</code>	Диапазон и шаг сканирования порога.
<code>range_2</code>	Диапазон и шаг сканирования напряжения смещения.
<code>delay_between_writes</code>	Задержка между итерациями.
<code>log_file</code>	Файл для записи лога измерения.

3.4. Контроль статуса Modbus-команд

Для каждой точки измерения важно знать, были ли параметры действительно записаны в электронику. Поэтому в лог сохраняются не только значения V_{th} и V_{bias} , но и статусы записи `success1` и `success2`. Они показывают, была ли успешно выполнена команда записи соответствующего регистра.

Такой контроль повышает достоверность данных. Если при последующей обработке обнаруживается точка с ошибкой записи, ее можно исключить из анализа или повторить измерение. На рис. 3.3 показан пример контроля статуса команд в обзорном тестовом логе: все записи в данном наборе завершились успешно.

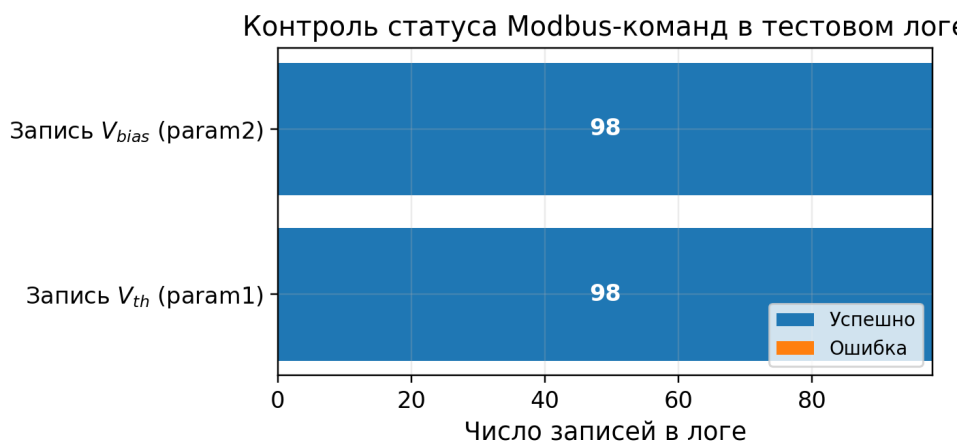


Рис. 3.3 – Пример контроля статуса Modbus-команд в тестовом логге. В логге фиксируются статусы записи порога и напряжения смещения.

Фрагмент CSV-лога имеет вид:

```
timestamp,param1,param2,success1,success2
2026-03-03T16:47:20.390811,20,2300,True,True
2026-03-03T16:47:50.588892,25,2300,True,True
2026-03-03T16:48:20.786374,30,2300,True,True
```

3.5. Привязка к raw-файлам и учет UTC

Сырые данные профилометра хранятся на сервере в виде raw-файлов. Файлы организованы по годам и подпапкам с именами вида YYMMDD-NN, соответствующими времени UTC. Имя raw-файла содержит UNIX timestamp. Поэтому для обработки необходимо сопоставить временные метки из CSV-лога с файлами, попадающими в соответствующий интервал времени.

Для этой цели разработан модуль загрузки raw-файлов. Он считывает временные метки из CSV, применяет при необходимости поправку на часовой пояс, определяет минимальный и максимальный timestamp, находит подходящие папки на сервере и скачивает raw-файлы с поддержкой докачки. В конфигурации обработки предусмотрен параметр `log_utc_offset`. Если лог записан в локальном времени, он используется для перевода меток к UTC. Если лог уже содержит UTC-время, смещение принимается равным нулю.

3.6. Первичный парсинг raw-формата

Для подготовки данных к анализу реализован парсер raw-файлов. Одна запись raw-файла имеет фиксированный размер 16 байт и включает маркеры начала и конца записи, две укороченные временные метки и четыре 16-битных слова состояния каналов. Схематическое представление записи показано на рис. 3.4.



Одна запись raw-файла: 16 байт, четыре 16-битных слова состояния групп каналов

Рис. 3.4 – Схематическое представление одной записи raw-файла, используемой при первичном парсинге.

В каждом 16-битном слове отдельные биты соответствуют ячейкам группы каналов. На текущем этапе для анализа используется быстрый подсчет числа ненулевых слов в выбранном канале. Также в коде предусмотрены функции для статистики по отдельным ячейкам и построения временных распределений.

3.7. База данных и предварительная обработка

После сопоставления интервалов лога с raw-файлами число событий нормируется на время набора и сохраняется в базу данных `results.db`. Для дальнейшего восстановления спектра предусмотрен модуль вычисления разностей между соседними точками по порогу. Это является первым приближением к численному дифференцированию зависимости $N(V_{th})$.

На момент подготовки отчета обработка основного длительного набора данных еще не завершена. Однако цепочка загрузки, парсинга, нормировки и визуализации уже реализована и была использована для обзорного набора данных. Это подтверждает работоспособность первой половины комплекса настройки: от задания параметров до получения предварительных графиков.

4 Тестовые измерения

4.1. Общие условия

Тестовые измерения проводились с использованием атмосферных мюонов. Настройка выполнялась для одного канала профилометра. Такой подход выбран как первый этап отладки методики: перед масштабированием на все каналы необходимо проверить корректность управления, логирования и связи с raw-данными на одном канале.

В работе использовались два набора логов:

1. обзорный двумерный скан по V_{th} и V_{bias} с малым временем набора;
2. более длительный скан по порогу вблизи предварительно выбранной рабочей точки при фиксированном V_{bias} .

4.2. Обзорный двумерный скан

Первый набор данных был выполнен как обзорный тестовый скан. Его целью была проверка работы приложения, правильности перебора параметров, формирования логов и первичной цепочки обработки. Параметры скана приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1 – Параметры обзорного двумерного скана

Параметр	Значение
Адрес устройства	1
Порог V_{th}	20–60, шаг 5
Напряжение V_{bias}	2300–2500, шаг 20
Время точки	около 30 с
Источник событий	атмосферные мюоны и фоновые срабатывания
Назначение	проверка программного комплекса и грубая карта счета

Из-за малого времени набора данный скан не предназначен для окончательного выбора рабочей точки. Его результаты используются как качествен-

ная проверка ожидаемого поведения системы.

4.3. Зависимость счёта от порога

На рис. 4.1 показаны зависимости нормированного счёта от порога дискриминации при нескольких значениях V_{bias} . Видно, что при малых значениях порога счёт велик, а при увеличении порога резко уменьшается. Такое поведение соответствует интегральной природе измеряемой зависимости: чем выше порог, тем меньшая часть амплитудного распределения проходит дискриминатор.

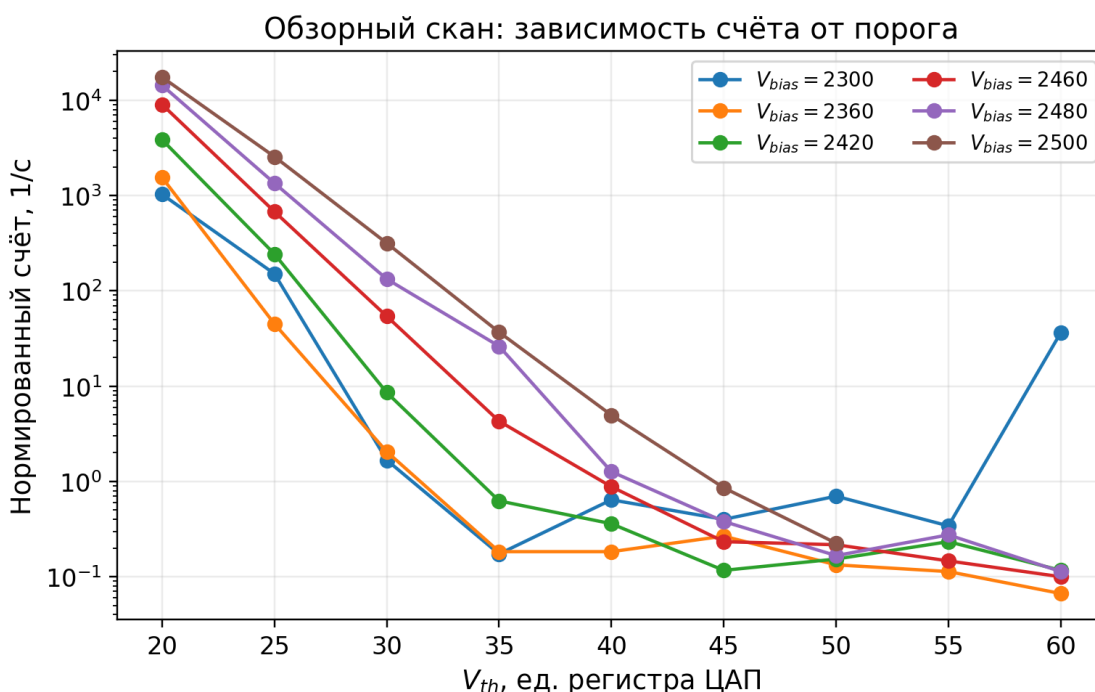


Рис. 4.1 – Обзорный скан: зависимости нормированного счёта от порога V_{th} при разных значениях V_{bias} . Шкала по оси Y логарифмическая.

При повышенном напряжении смещения общий уровень счёта при малых порогах возрастает. Это ожидаемо, поскольку увеличение V_{bias} повышает усиление SiPM и одновременно может усиливать вклад шумовых срабатываний.

4.4. Зависимость счёта от напряжения смещения

Другой срез тех же данных показан на рис. 4.2. Здесь построена зависимость нормированного счёта от V_{bias} при фиксированных значениях порога. При низких порогах рост V_{bias} приводит к быстрому увеличению счёта. При более высоких порогах зависимость выражена слабее, поскольку значительная часть шумовой области уже отсекается.

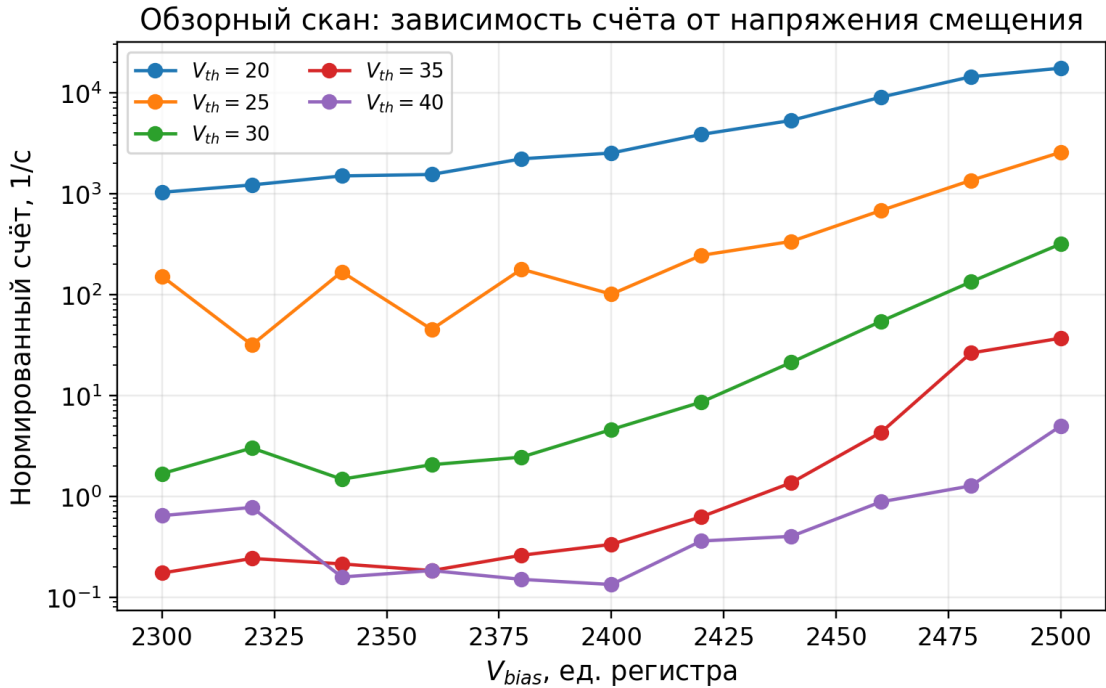


Рис. 4.2 – Обзорный скан: зависимости нормированного счёта от V_{bias} при фиксированных значениях порога V_{th} . Шкала по оси Y логарифмическая.

Такая картина качественно согласуется с ожидаемым поведением SiPM: при слишком малом V_{bias} сигнал недостаточно усилен, а при слишком большом V_{bias} возрастает вклад шумов.

4.5. Двумерная карта счёта

Для наглядного представления обзорного скана была построена двумерная карта нормированного счёта в координатах (V_{th}, V_{bias}) , показанная на рис. 4.3. Логарифмическая шкала выбрана из-за большого динамического диапазона счётов.

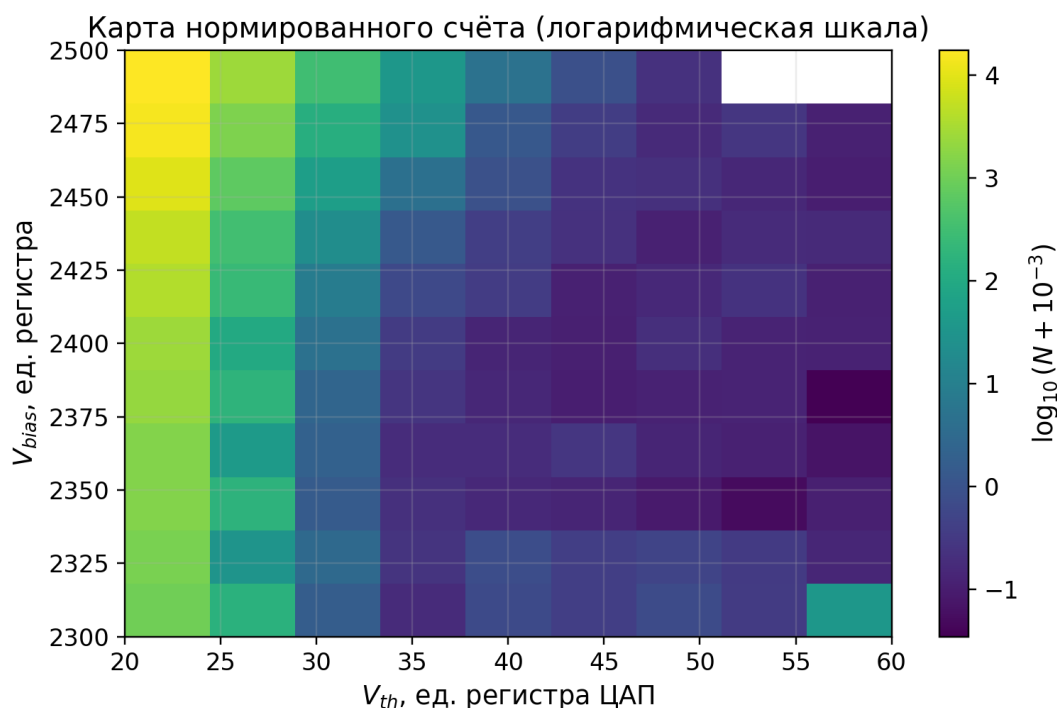


Рис. 4.3 – Двумерная карта нормированного счёта по результатам обзорного скана. Цвет соответствует логарифму нормированного числа событий.

Карта показывает, что область малых порогов и больших напряжений смещения соответствует максимальному счёту. Для настройки это важная информация: такая область может быть связана с ростом шумовой компоненты, поэтому рабочий порог должен находиться выше этой области.

4.6. Предварительная оценка производной

Для проверки идеи восстановления спектра была построена предварительная оценка величины $-\Delta N / \Delta V_{th}$ по обзорному скану. Результат показан на рис. 4.4. Из-за малого времени набора и крупного шага по порогу этот график не следует использовать для окончательного выбора порога. Его назначение - продемонстрировать, что программная цепочка позволяет перейти от интегральной пороговой зависимости к оценке производной.

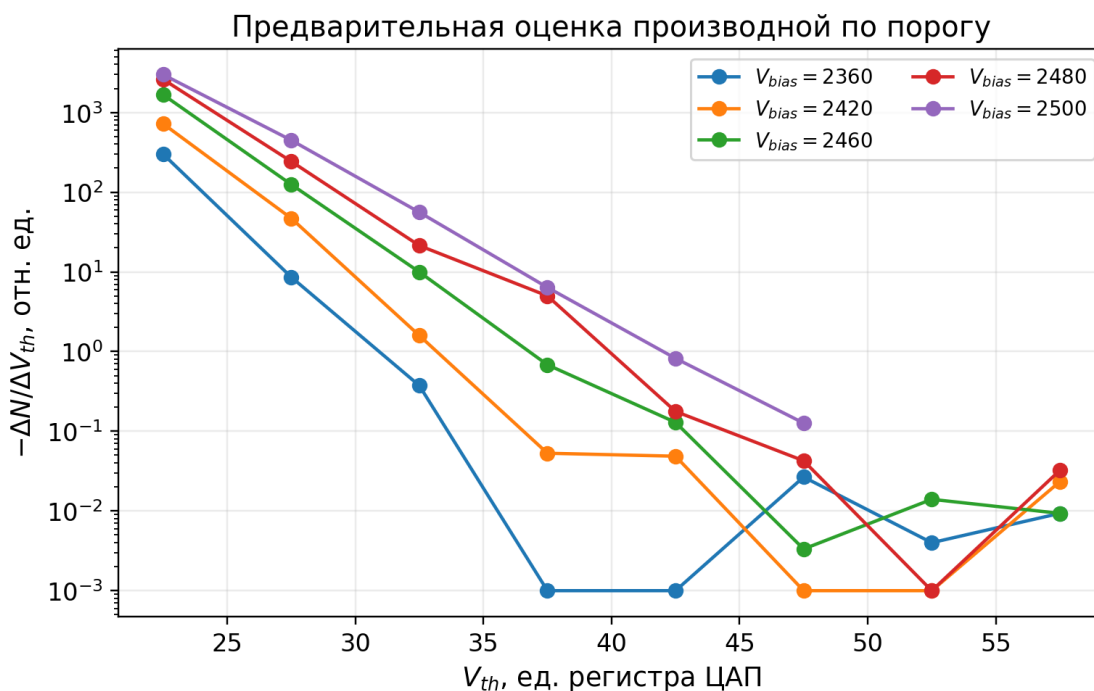


Рис. 4.4 – Предварительная оценка производной по порогу по данным обзорного скана. График носит демонстрационный характер из-за малой статистики.

4.7. Длительный скан вблизи рабочей точки

После обзорного измерения был выполнен более основательный набор данных при фиксированном напряжении смещения. Значение $V_{bias} = 2470$ было выбрано вблизи предварительно подобранной вручную рабочей точки. Диапазон порога был сужен и измерялся с меньшим шагом.

Параметры длительного скана:

- $V_{th} = 20 \dots 40$, шаг 1;
- $V_{bias} = 2470$;
- интервал между соседними точками - 30 минут;
- временные метки доступны в формате UTC.

Этот набор должен дать существенно большую статистику, чем обзорный скан. На момент подготовки отчета он еще не прошел полную постобработку. Поэтому в настоящей работе он рассматривается как основной экспериментальный материал для следующего этапа: восстановления амплитудного спектра и выбора оптимального порога.

4.8. Интерпретация текущих результатов

Полученные предварительные графики позволяют сделать несколько качественных выводов:

1. программный комплекс корректно выполняет перебор двух параметров и фиксирует их в логе;
2. зависимость счета от порога имеет ожидающийся падающий характер;
3. увеличение V_{bias} приводит к росту счета, особенно при низких порогах;
4. обзорный скан обладает недостаточной статистикой для окончательной настройки, но достаточен для проверки работоспособности цепочки;
5. длительный скан должен использоваться для более надежного восстановления спектра после завершения постобработки.

Таким образом, на текущем этапе получены не окончательные параметры настройки, а проверенная методика набора данных и программная основа для их обработки.

5 Перспективы развития комплекса

5.1. Завершение обработки длительного скана

Ближайшая задача состоит в завершении обработки длительного скана при $V_{bias} = 2470$. Для этого необходимо выполнить полную привязку временных интервалов лога к raw-файлам, посчитать события в выбранном канале, построить зависимость $N(V_{th})$ и выполнить устойчивое численное дифференцирование.

Так как шаг по порогу равен 1, а время набора в каждой точке существенно больше, чем в обзорном скане, этот набор данных должен быть более пригоден для восстановления спектра. При необходимости перед дифференцированием можно использовать сглаживание или объединение соседних точек.

5.2. Автоматический выбор рабочей точки

После восстановления спектра необходимо реализовать алгоритм автоматического выбора рабочей точки. Возможны несколько критериев:

- поиск области между шумовым пиком и областью полезных сигналов;
- выбор порога по заданному уровню подавления шумового счета;
- выбор порога в области минимальной чувствительности к малым изменениям V_{th} ;
- оптимизация отношения сигнал/шум при сохранении эффективности регистрации атмосферных мюонов.

Наиболее практичным для начальной реализации является критерий устойчивой области порога: рабочий порог выбирается там, где шум уже подавлен, а зависимость полезного счета от порога изменяется достаточно плавно.

5.3. Масштабирование на все каналы

После отладки на одном канале методику можно распространить на все четыре группы каналов профилометра. Для этого потребуется:

1. добавить в конфигурацию выбор группы и номера канала;
2. организовать последовательный или параллельный перебор каналов;
3. сохранять результаты настройки для каждого SiPM;
4. контролировать однородность отклика по всем каналам;
5. реализовать отчет о качестве настройки всего профилометра.

Итоговым результатом дальнейшей работы должен стать комплекс, который не только собирает данные, но и автоматически предлагает рабочие значения V_{bias} и V_{th} для каждого канала.

Заключение

В ходе работы была рассмотрена задача настройки SiPM-канала сцинтилляционного профилометра эксперимента СПАСЧАРМ. Особенность электроники профилометра состоит в том, что аналоговый амплитудный сигнал недоступен, а система регистрации фиксирует только факт превышения заданного порога. Поэтому стандартный подход к настройке по прямому амплитудному спектру был заменен методикой порогового сканирования.

Показано, что зависимость числа срабатываний от порога дискриминации является интегральной формой амплитудного спектра. Следовательно, восстановление спектра возможно путем численного дифференцирования зависимости $N(V_{th})$. Эта методика позволяет в дальнейшем выбирать рабочий порог и напряжение смещения по разделению шумовой и сигнальной областей.

Разработано приложение для автоматизированного перебора порога дискриминации и напряжения смещения SiPM. Приложение имеет графический интерфейс, позволяет задавать диапазоны сканирования, управлять измерением, фиксировать временные метки и сохранять статусы Modbus-команд. Запись статуса команды является важным элементом контроля качества данных, поскольку позволяет отличать корректно выполненные точки измерения от точек с ошибками связи или записи параметров.

Также разработана первая версия программного контура постобработки: загрузка raw-файлов с сервера по временным меткам, учет UTC-смещения, парсинг бинарного формата, подсчет событий в выбранном канале, сохранение результатов в SQLite-базу и построение предварительных графиков. Таким образом, реализована первая половина будущего комплекса настройки - от задания параметров до получения подготовленных данных для анализа.

Выполнен обзорный двумерный скан одного канала в диапазонах $V_{th} = 20 \dots 60$ и $V_{bias} = 2300 \dots 2500$. Этот скан имеет малую статистику и используется как демонстрационный и проверочный. Его результаты показывают ожидаемое качественное поведение: счет уменьшается с ростом порога и возрастает при увеличении напряжения смещения, особенно в области малых

порогов.

Также выполнен более основательный длительный скан по порогу при фиксированном $V_{bias} = 2470$ с шагом порога 1 и интервалом 30 минут между точками. На момент подготовки отчета этот набор данных еще не обработан полностью, однако он является основой для следующего этапа работы - восстановления спектра и выбора рабочей точки канала.

Дальнейшее развитие работы предполагает завершение обработки длительного скана, реализацию устойчивого численного дифференцирования, разработку критерия автоматического выбора порога и напряжения смещения, а затем масштабирование методики на все каналы профилометра.

Литература

- [1] Абрамов В. В. и др. Экспериментальная установка СПАСЧАРМ для исследования спиновых эффектов в адронных взаимодействиях на ускорительном комплексе У-70. Описание установки и пучковой аппаратуры.
- [2] Шерстяных И. С. Автоматическая настройка параметров кремниевых фотоумножителей для сцинтилляционного годоскопа с использованием атмосферных мюонов. Отчет о научно-исследовательской работе. НИ-ЯУ МИФИ, 2025.
- [3] Документация программного модуля загрузки raw-файлов по временному диапазону из CSV. 2026.
- [4] Документация программного комплекса для автоматического перебора параметров профилометра через Modbus. 2026.
- [5] Python Software Foundation. Python Language Reference. Версия 3.x.
- [6] Modbus Organization. Modbus Application Protocol Specification.
- [7] SQLite Documentation. SQLite Database Engine.

А Пример конфигурации управляющего приложения

Ниже приведен пример структуры конфигурационного файла, используемого для задания подключения и диапазонов сканирования.

```
{
  "port": "/dev/ttyUSB0",
  "baudrate": 9600,
  "device_address": 1,
  "register_1": 1,
  "register_2": 2,
  "range_1": {"min": 20, "max": 60, "step": 5},
  "range_2": {"min": 2300, "max": 2500, "step": 20},
  "delay_between_writes": 1.0,
  "log_file": "log.csv"
}
```

В данном примере `register_1` соответствует порогу дискриминации, а `register_2` - напряжению смещения SiPM.

В Пример CSV-лога

CSV-лог является центральным связующим элементом между управляющей частью и обработкой данных. Он содержит временную метку, значения параметров и статус записи в регистры.

```
timestamp,param1,param2,success1,success2
2026-03-03T16:47:20.390811,20,2300,True,True
2026-03-03T16:47:50.588892,25,2300,True,True
2026-03-03T16:48:20.786374,30,2300,True,True
```

Поля `success1` и `success2` позволяют контролировать корректность каждой точки сканирования.

С Основные этапы обработки данных

Алгоритм первичной обработки данных можно представить следующим образом:

1. считать CSV-лог и получить список временных меток;
2. привести временные метки к UTC, если требуется;
3. определить интервалы между соседними точками сканирования;
4. найти raw-файлы, временные метки которых попадают в соответствующие интервалы;
5. распарсить raw-файлы и посчитать срабатывания выбранного канала;
6. нормировать число событий на время набора;
7. сохранить результат в таблицу **results**;
8. построить зависимости $N(V_{th})$ и $N(V_{bias})$;
9. после набора достаточной статистики вычислить $-\Delta N / \Delta V_{th}$.

D Обозначения

Обозначение	Расшифровка
V_{th}	Порог дискриминации, задаваемый в единицах регистра ЦАП.
V_{bias}	Напряжение смещения SiPM, задаваемое в единицах управляющего регистра.
N	Число событий или нормированный счет.
$f(A)$	Амплитудный спектр сигналов SiPM.
param1	Программное обозначение порога V_{th} .
param2	Программное обозначение напряжения смещения V_{bias} .
success1	Статус записи порога в регистр.
success2	Статус записи напряжения смещения в регистр.