

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»

УДК 531.3, 539.1.05

ОТЧЁТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

**Разработка программно-аппаратного комплекса для
автоматизированной прецизионной обработки торцов
многоканальных оптоволоконных коннекторов детектора ВВС
для эксперимента SPD**

Студент _____ Е. А. Чекмаев
Научный руководитель,
к.ф.-м.н., _____ П. Е. Тетерин

Москва 2026

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	2
1 Эксперимент SPD	4
1.1 Введение и цели эксперимента	4
1.2 Строение детектора SPD	5
1.3 Счётчики встречных пучков (Beam-Beam Counters)	6
1.4 Актуальность разработки устройства для прецизионной обработки коннекторов секторов сцинтилляционных детекторов BBC	8
2 Представление результатов	9
Представление результатов	9
2.1 Разработка аппаратной части устройства обработки коннекторов	9
2.2 Разработка прошивки контроллера устройства	10
2.3 Результаты полировки	12
2.4 Результаты тестов на космическом излучении	13
Заключение	18
Список используемых источников	19
Приложение А	20

ВВЕДЕНИЕ

В рамках эксперимента SPD (Spin Physics Detector) на коллайдере NICA ключевую роль в решении широкого круга физических задач играют детекторы встречных пучков – Beam-Beam Counters (BBC). Эти детекторы, расположенные в прямом и обратном конусах установки на расстоянии приблизительно ± 1.7 м от точки взаимодействия, выполняют несколько критически важных функций. К основным задачам BBC относятся: локальная поляриметрия в столкновениях поперечно-поляризованных протонных пучков на основе измерения азимутальных асимметрий, мониторинг столкновений пучков, точное определение времени события и восстановление плоскости события в исследованиях с ион-ионными столкновениями.

Конструктивно BBC состоит из двух частей: внутренней (покрывающей углы 30–60 мрад) и внешней (60–500 мрад). Внешняя часть, являющаяся предметом настоящей работы, представляет собой высокогранулированный детектор, выполненный из пластиковых сцинтилляционных плиток (тайлов). Каждая из 16 азимутальных секций одного BBC содержит 26 концентрических тайлов, что в сумме для двух детекторов составляет 800 независимых каналов регистрации. Светосбор в каждом канале осуществляется посредством спектросмещающего оптоволоконна, соединенного с кремниевым фотоумножителем. Чтение сигналов производится с помощью системы FERS-5200 (CAEN DT5202).

Проведенные моделирования и опытно-конструкторская работа, определили оптимальные материалы для производства детектора: полистироловый сцинтиллятор с матовой поверхностью, оптический клей ОК-72 в соотношении компонентов 76/24. Эффективность и стабильность работы такого сложного детекторного массива напрямую зависят от качества и идентичности отклика каждого из сотен сцинтилляционных каналов.

Каждая секция имеет собственный вывод оптоволоконных каналов в спе-

циальные коннекторы для соединения спектросмещающего оптоволокна и чистого оптоволокна с кремниевыми фотоумножителями. Для увеличения качества сбора сигналов необходимо сделать так, чтобы на описанных выше переходах терялось как можно меньше света, соответственно необходимо обеспечить полировку надлежащего качества. Данная работа велась для создания устройства, способного выполнить данную операцию.

1 ЭКСПЕРИМЕНТ SPD

1.1 ВВЕДЕНИЕ И ЦЕЛИ ЭКСПЕРИМЕНТА

Коллаборация **Spin Physics Detector (SPD)** предлагает установить универсальный детектор во второй точке взаимодействия коллайдера **NICA** (ОИЯИ, Дубна) для изучения спиновой структуры протона, дейтрона и других явлений, связанных со спином, с помощью поляризованных пучков протонов и дейтронов [1]. Проект реализуется в два этапа.

На **первом этапе (Stage I)** планируется изучение поляризованных явлений при энергиях до $\sqrt{s} = 9.4$ ГэВ для $p-p$ и $\sqrt{s} = 4.5$ ГэВ/нуклон для $d-d$ столкновений со светимостью до 10^{31} см⁻²с⁻¹. Основное внимание будет уделено упругому рассеянию, рождению чармония у порога и другим эксклюзивным процессам.

На **втором этапе (Stage II)**, при достижении проектных энергий (до 27 ГэВ) и светимостей (до 10^{32} см⁻²с⁻¹), фокус сместится на изучение поляризованной глюонной составляющей в реакциях инклюзивного рождения чармониев, открытого чарма и прямых фотонов. Эксперимент SPD заполнит уникальную нишу в кинематическом диапазоне между низкоэнергетическими установками (COSY, SATURNE) и коллайдерами высоких энергий (LHC) (рис. 1.1).

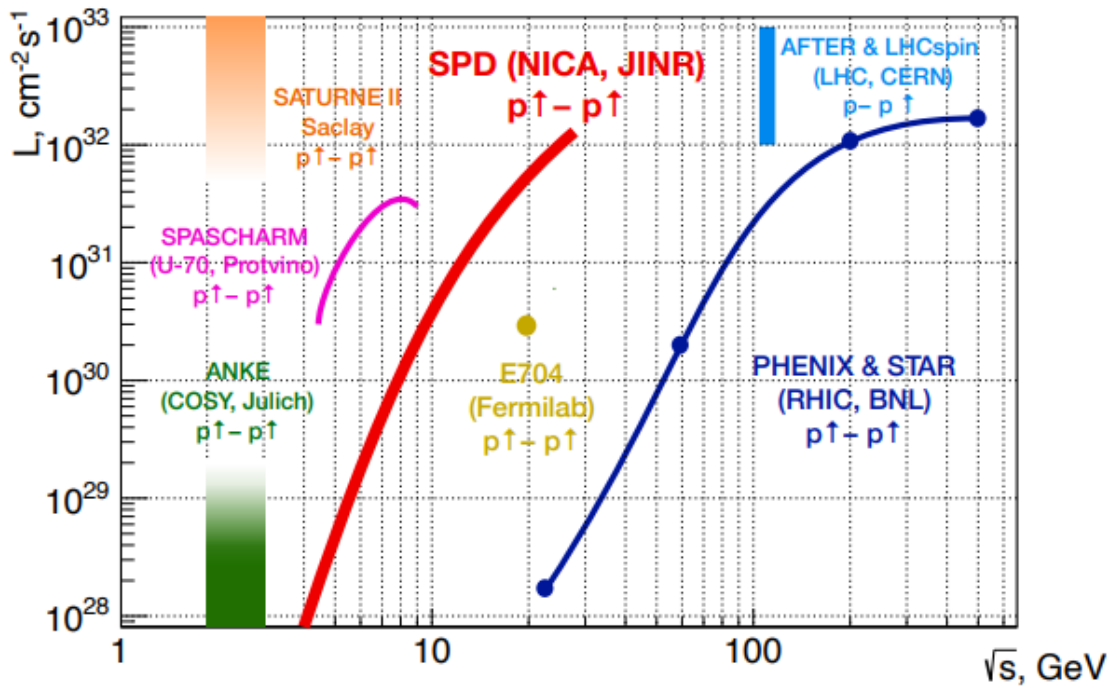


Рисунок 1.1 — SPD NICA и другие прошлые, современные и будущие эксперименты с поляризованными протонами

1.2 СТРОЕНИЕ ДЕТЕКТОРА SPD

SPD проектируется как универсальный 4π -детектор с низкой радиационной длиной, оснащённый триггерной DAQ-системой. Общая структура включает следующие ключевые подсистемы:

- **Магнитная система:** Сверхпроводящий соленоид, создающий поле до 1 Тл для спектрометрии.
- **Трековая система:** На первом этапе – Straw трекер и центральный трекер на базе Micromegas. На втором этапе МСТ заменяется на Кремниевый вершинный детектор для реконструкции вторичных вершин, а ST остаётся для трекинга.
- **Система идентификации частиц:** На первом этапе – измерение dE/dx в ST и мюонная система Range System. На втором этапе добавляются время-пролётная система с разрешением ~ 50 пс и Черенковский детектор на аэрогеле.
- **Калориметрия:** Электромагнитный калориметр (ECal) с разрешением $\sim 5\%/\sqrt{E}$ для регистрации фотонов. На первом этапе может быть установлен его прототип.

- **Поляриметрия и мониторинг:** Два торцевых Beam-Beam Counter'а (BBC) и два калориметра нулевого угла (ZDC).

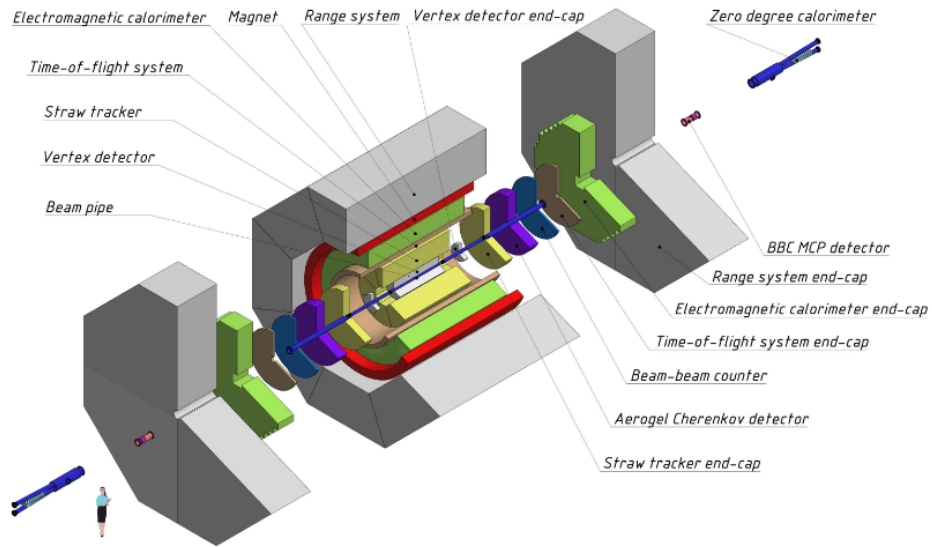


Рисунок 1.2 — Компоновка детектора SPD.

Таблица 1.1 — Основные параметры установки SPD на разных этапах.

Параметр	Stage I	Stage II
Макс. светимость, $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$	10^{31}	10^{32}
Магнитное поле, Тл	1.0	1.0
Кол-во каналов, тыс.	~ 177	~ 280
Разрешение по импульсу (1 ГэВ/с), %	~ 1.7	~ 1.0
Вес, т	~ 1249	~ 1253

1.3 СЧЁТЧИКИ ВСТРЕЧНЫХ ПУЧКОВ (BEAM-BEAM COUNTERS)

Два детектора BBC являются критически важной подсистемой SPD, особенно на первом этапе эксперимента. Они будут расположены в прямом и обратном торцах установки на расстоянии приблизительно ± 1.7 м от точки взаимодействия. Основные задачи BBC:

- 1) **Локальная поляриметрия** на основе измерения азимутальных асимметрий в инклюзивном рождении заряженных частиц.
- 2) **Мониторинг** столкновений пучков и светимости.

- 3) **Определение времени события** (t_0), особенно для упругих событий, где другие детекторы неэффективны.
- 4) **Предварительный отбор (пре-триггер)** событий для мониторинга жёстких процессов.

Конструктивно каждый ВВС состоит из двух частей (рис. 1.3):

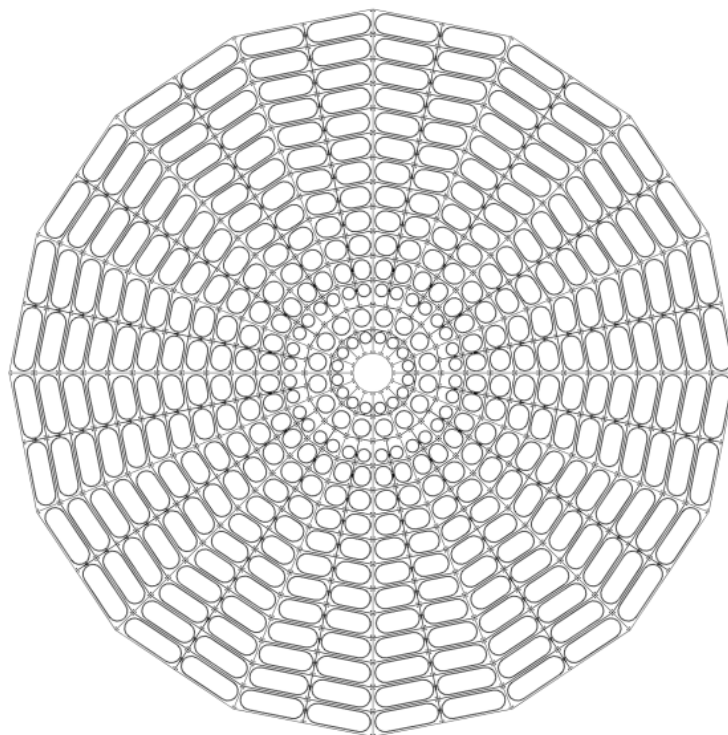


Рисунок 1.3 — Конструкция счетчика пучков (ВВС).

- **Внутренняя часть:** основана на быстрых микроканальных пластинах (Microchannel Plate, MCP), размещаемых внутри вакуумной трубы. Высокое временное разрешение (~ 50 пс) необходимо для точного определения t_0 .
- **Внешняя часть:** является предметом настоящей работы. Она представляет собой сцинтилляционный детектор, выполненный в виде массива пластиковых тайлов. Согласно последнему дизайну, внешняя часть будет разделена на **5–6 концентрических слоёв** по радиусу, каждый из которых сегментирован на **16 азимутальных секторов**. Таким образом, в каждом ВВС будет от 80 до 96 независимых сцинтилляционных каналов, а для двух детекторов – порядка **800 каналов** в сумме.

Каждый сцинтилляционный тайл будет соединён со спектросмеща-

ющим оптоволоконном, которое собирает и переносит свет к кремниевому фотоумножителю (SiPM). Считывание сигналов со всех SiPM планируется осуществлять с помощью высокоплотной электронной системы CAEN FERS-5200 (DT5202).

1.4 АКТУАЛЬНОСТЬ РАЗРАБОТКИ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ КОННЕКТОРОВ СЕКТОРОВ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ ВВС

Использование оптоволоконных линий для сбора и передачи светового сигнала требует применения точных операций по обработке поверхности стыка волокно - волокно и волокно - кремниевый фотоумножитель. Использование ручной полировке в контексте создания детектора ВВС не имеет практического смысла, так как количество концов, которые потребуется обработать выше трех тысяч. К тому же, ручная обработка достаточно медлительна и зависит от опыта оператора. Соответственно для создания детектора ВВС необходимо создать устройство, которое с заданной точностью обеспечит полировку оптоволоконных линий.

Целью данной работы является разработка электронной части, создание и испытания устройства для автоматизированной обработки торцов оптоволоконных коннекторов детектора ВВС.

Требования к устройству:

- 1) **Автоматизированная обработка:** устройство должно производить обработку коннекторов по командам оператора.
- 2) **Работа в оптимальном режиме:** устройство должно учитывать давление на обрабатываемую поверхность для принятия решения о последующей подаче инструмента для минимизации повреждения оптоволоконного волокна и увеличения срока службы полировочной поверхности.

2 ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

2.1 РАЗРАБОТКА АППАРАТНОЙ ЧАСТИ УСТРОЙСТВА ОБРАБОТКИ КОННЕКТОРОВ

Аппаратная часть устройства предполагает совершение управления над шаговым двигателем и двигателем постоянного тока имеющими номинальное напряжение питания 5В и суммарного пикового тока порядка 10 А. Для их питания был взят блок питания мощностью 120 Вт. Питание микроконтроллера ATmega 328-PU осуществляется импульсным блоком на 9 В и 9 Вт мощности.

Управление шаговым двигателем осуществляется через драйвер на базе микросхемы A4988 и плату расширения для одного. Для управления двигателем постоянного тока была выбрана плата расширения для Arduino на базе микросхемы L293D, представляющей собой четыре полумостовых схемы питания.

Для получения сигнала обратной связи был использован дифференциальный усилитель на базе операционного усилителя LM358 с униполярным питанием [2] (рис. 2.1):

С помощью напряжения, снятого с резистора R5 можно оценить протекающий через двигатель ток. Далее разность напряжения усиливается в 27 раз за счет правильно подобранных номиналов резисторов R1, R2 и R3, R4 и сигнал с выхода операционного усилителя поступает на аналоговый вход микроконтроллера. Резистор RV1 на схеме служит для смещения рабочей точки операционного усилителя. В итоговой схеме вместо подстроечного резистора использован делитель напряжения. В итоге рабочая точка находится на уровне 1 В. Также по выходу операционного усилителя стоит один каскад фильтра нижних частот с частотой среза порядка 20 Гц.

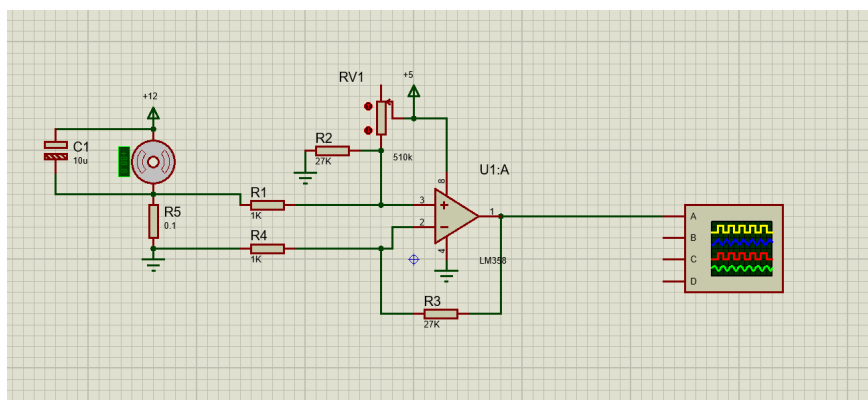


Рисунок 2.1 — Моделирование дифференциального усилителя в программе Proteus

2.2 РАЗРАБОТКА ПРОШИВКИ КОНТРОЛЛЕРА УСТРОЙСТВА

Исходя из заданных условий были сформулированы следующие требования к прошивке микроконтроллера:

- Создание прошивки для МК с поддержкой оптимизированного языка G-code
- Необходимость наличия связи МК -> компьютер и компьютер -> МК для оценки обратной связи работы двигателя и выработки правильных параметров работы.
- Использование программной фильтрации шума от системы обратной связи работы двигателя//

Разработка прошивки для МК велась в VS Code в расширении Platform IO на языке C++. За основу была взята прошлая работа для взаимодействия с драйвером шагового двигателя A4988. Дальнейшая работа была произведена в процедурной парадигме: были созданы необходимые функции для обработки входящих команд поступающих через порт UART с компьютера. Была организована система флагов для контроля движения на каждой итерации главного цикла программы. Блок схема представлена в Приложении А

Прошивка поддерживает следующие команды:

- G00 - быстрое перемещение по координатам.

Синтаксис:

G00 XN FK

G00 FK

где

N - количество мм на которое нужно переместиться по оси X

K - скорость перемещения мм/с

Ответ: Ok - готовность принять новую команду

- G01 - перемещение по координатам с заданным порогом (по умолчанию 1,32 В)

Синтаксис: G01 XN FK

G01 FK

где N - количество мм на которое нужно переместиться по оси X K -

скорость перемещения мм/с Ответ:

DONE - сообщение о завершение перемещения Ok - готовность принять новую команду

- G66 - установка нового порога

Синтаксис: G66 VNum

где Num - дробное число вольт в пределах от 1 до 5

Ответ: New threshold = Num - вывод нового порога

Ok - готовность принять новую команду

- G90 - переход в абсолютную систему координат - новые перемещения будут осуществляться до заданных точек относительно установленной нулевой точки

Синтаксис: G90

Ответ: Ok - готовность принять новую команду

- G91 - переход в относительную систему координат - новые перемещения будут осуществляться до заданных точек относительно установленной текущей точки

Синтаксис: G91

Ответ: Ok - готовность принять новую команду

- M03 - запуск двигателя постоянного тока

Синтаксис: M03

Ответ: Ok - готовность принять новую команду

- M05 - Остановка двигателя постоянного тока

Синтаксис: M05

Ответ: Ok - готовность принять новую команду

- M18 - измерить текущее значение напряжения на обратной связи

Синтаксис: M18

Ответ: threshold = "Значение порога"

signal = "Среднее значение сигнала"

mean true false

filtered true false

Ok - готовность принять новую команду

- M40 - вернуться к концевым выключателям

Синтаксис: M40

Ответ:

Ok - готовность принять новую команду

- M55 - заглушка

- M69 - выбрать тип длительности измерения сигнала Синтаксис: M69

Ответ: Long measure = true false

Ok - готовность принять новую команду

- S - задать скорость двигателя постоянного тока Синтаксис: Sspeed

Ответ: Ok

2.3 РЕЗУЛЬТАТЫ ПОЛИРОВКИ

В полностью собранном виде устройство выглядит следующим образом: (рис.2.2)

Процесс полировки проиллюстрирован изображениями на рис.2.3, где показан процесс полировки, который заключается в удалении остатков клея с поверхности коннектора черновой полировкой и дальнейшей чистовой полировке с доведением до нужной зернистости.

Первоначальные тесты полировки производились на коннекторах с отверстиями под оптоволокно ≈ 1.25 мм что приводило к тому, что волокно в коннекторе имело некоторую степень подвижности и при обработке повреждалась оболочка как на рис.2.4а. При уменьшении диаметра отверстия до 1.15 мм повреждения оболочки были значительно уменьшены, что



Рисунок 2.2 — фотография устройства

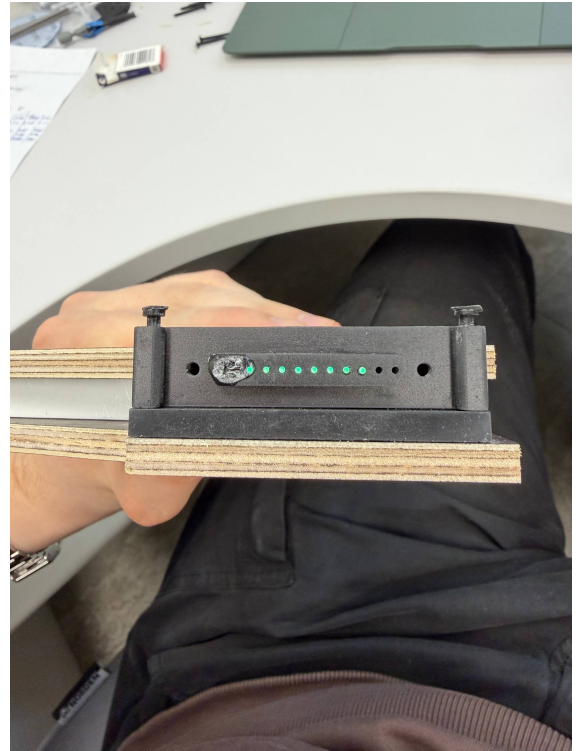
видно на рис.2.4б.

2.4 РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТОВ НА КОСМИЧЕСКОМ ИЗЛУЧЕНИИ

Для иллюстрации результатов полировки показаны наиболее вероятное количество фотоэлектронов собранных с сектора на космическом излучении. Для тестирования использовалась следующая сборка (рис. 2.5) На третьих тайлах набранная статистика выглядит следующим образом (рис.2.6). Очевидно, что данные измерения не показывают конкретно на качество полировки, а оценивают всю оптическую систему, начиная с сцинтилляционных детекторов, заканчивая корректностью установки кремниевых фотоумножителей. Однако и по имеющимся данным можно судить о приемлемом качестве полировки.



(а) сектор до полировки, видно выступающий клей

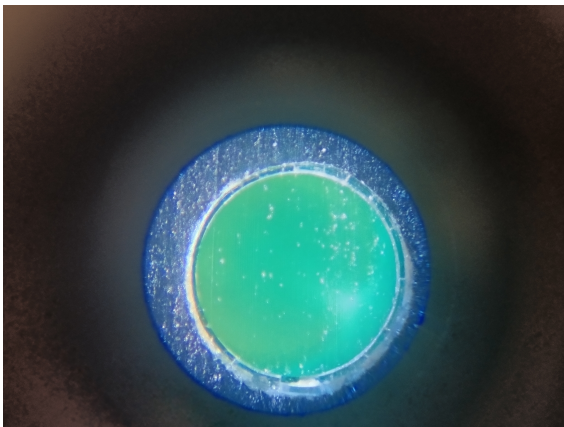


(б) сектор после черновой полировки

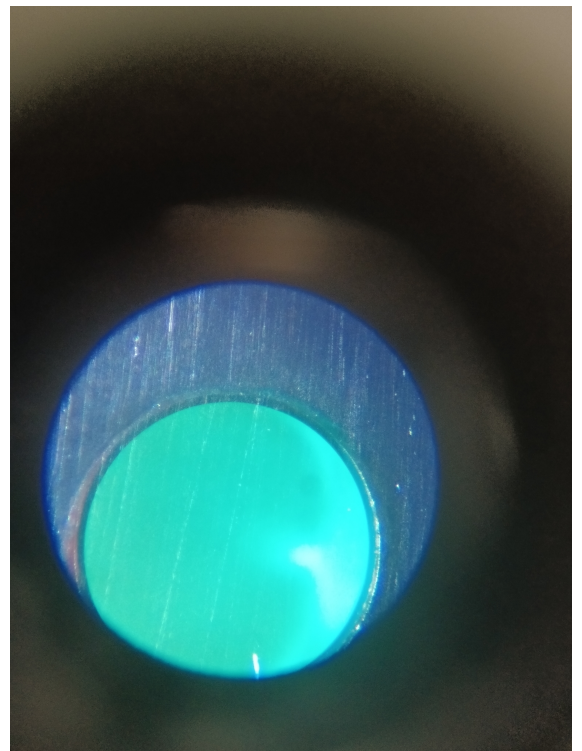


(в) сектор после финальной полировки

Рисунок 2.3 — Процесс полировки

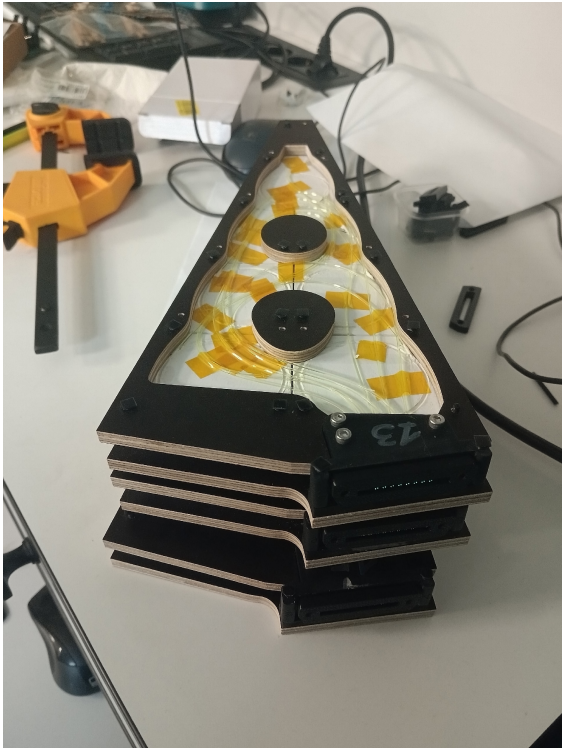


(а) Диаметр отверстий 1.25 мм

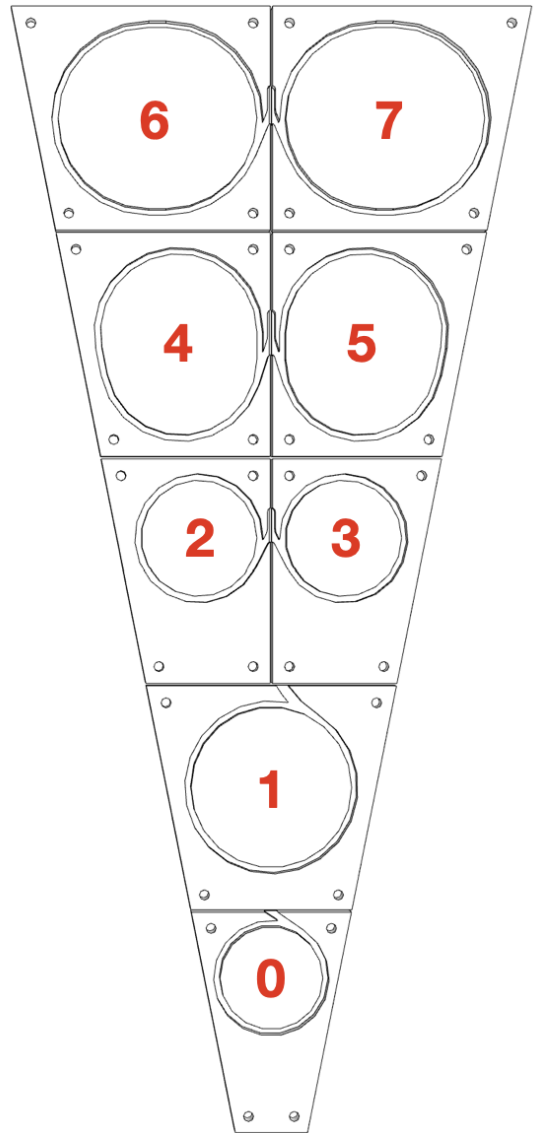


(б) Диаметр отверстий 1.15 мм

Рисунок 2.4 — Зависимость сохранения оболочки от диаметра отверстия под оптоволокно

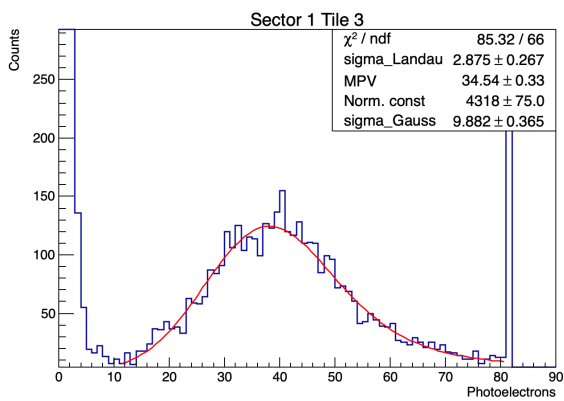


(а) сборка из трёх секторов

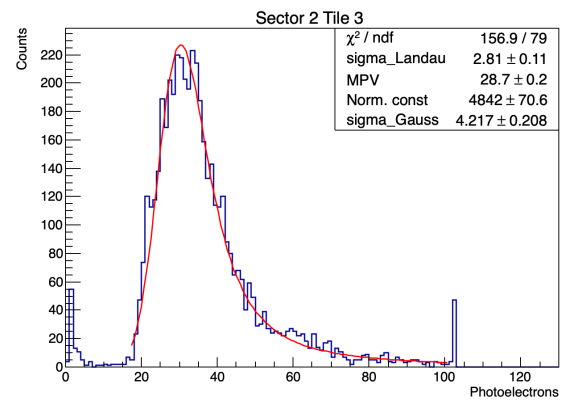


(б) Диаметр отверстий 1.15 мм

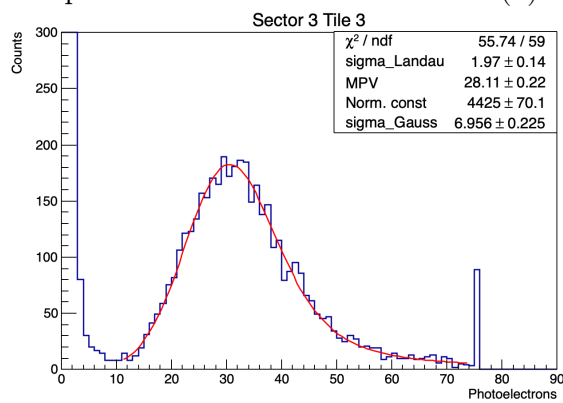
Рисунок 2.5 — используемые обозначения для тайлов



(а) верхний сектор



(б) средний сектор



(в) нижний сектор

Рисунок 2.6 — собранная статистика на трёх секторах

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе данной научно-исследовательской работы была разработана и собрана электрическая схема и написано программное обеспечение для числового программного управления устройства для обработки торцов коннектора с поддержкой синтаксиса G-code.

Была произведена полировка коннекторов и их оценка визуально-оптическим методом.

Направление для дальнейшей работы:

Произвести оценку влияния полировки шлифовальной бумагой и полировочной пленкой на итоговый результат сбора фотоэлектронов

Произвести оценку перпендикулярности полученного коннектора и плотности прилегания коннектор-коннектор

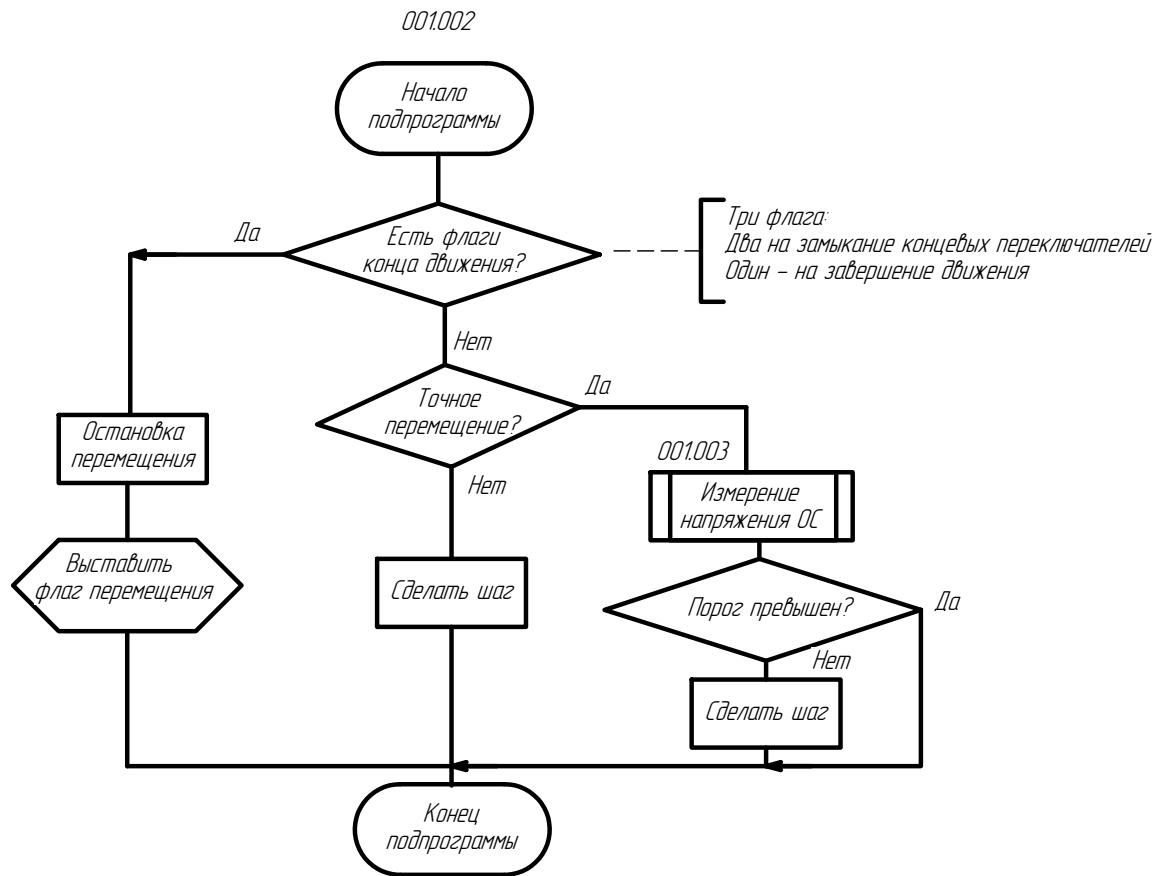
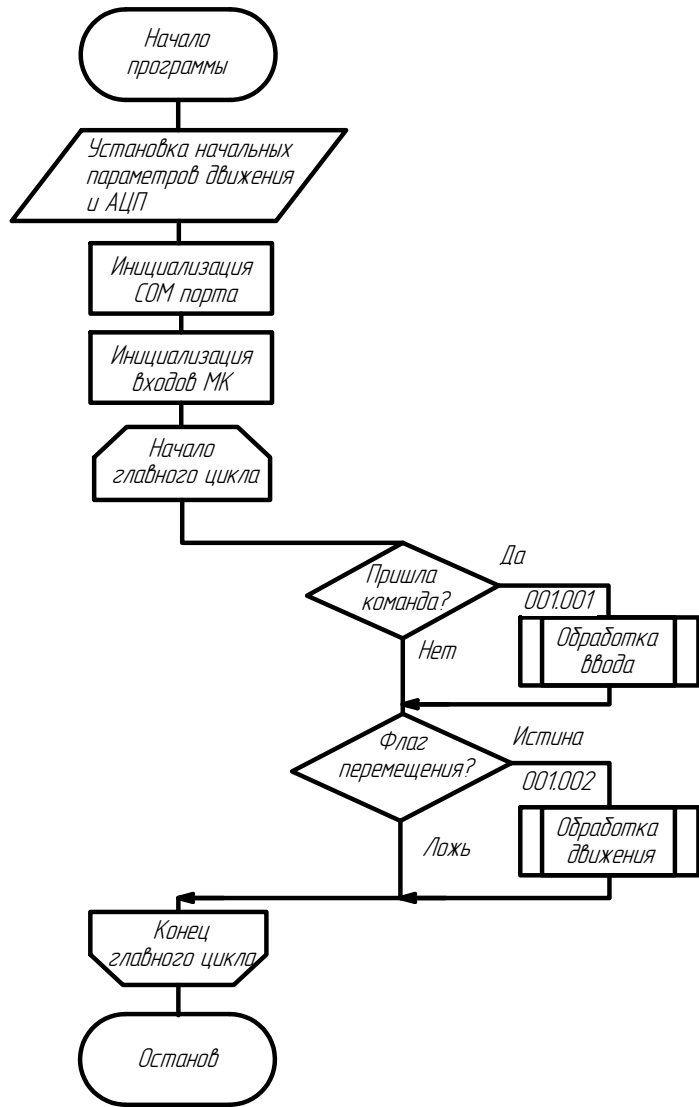
Увеличить степень автоматизации полировки — составить алгоритмы автоматизированной полировки коннекторов на основании полученных оценок

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

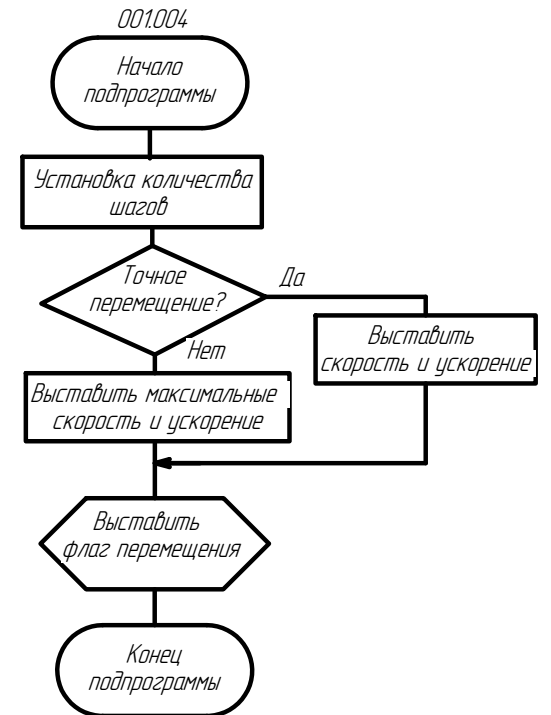
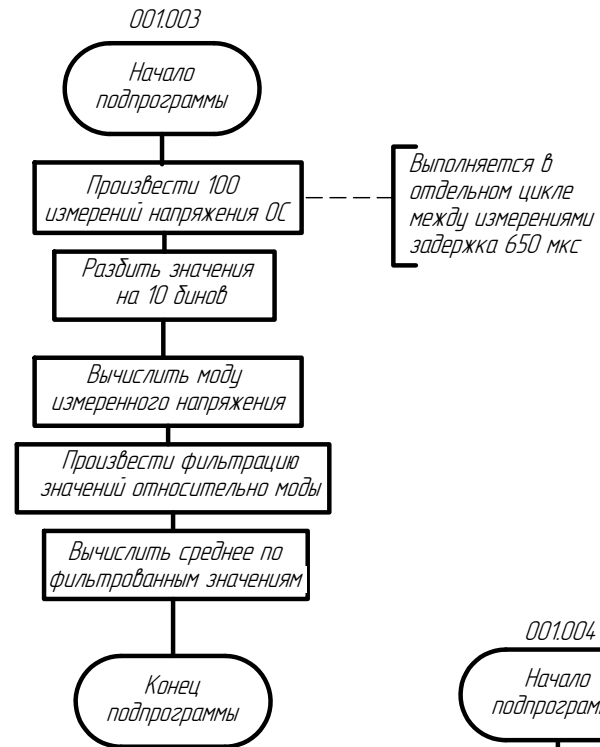
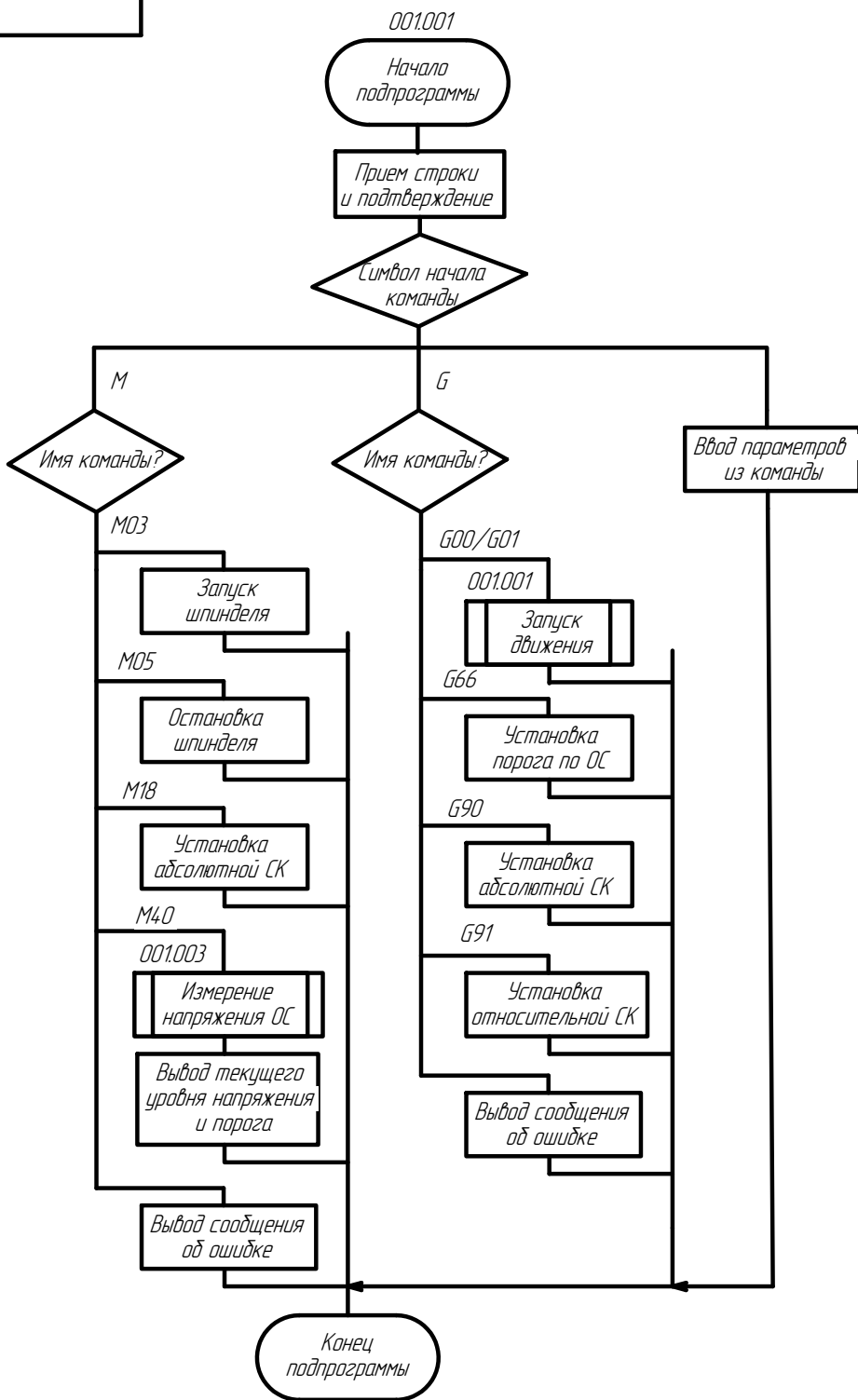
1. *Collaboration S.* Technical Design Report of the Spin Physics Detector at NICA // Natural Science Review. — 2025. — Т. 1, № 1. — С. 1. — Corrected: 5 February 2025 (the surname of one of the authors was initially misspelled (M. Bolsunovskya), the correct spelling is M. Bolsunovskaya). 23 April 2025 (the surname of one of the authors was initially misspelled (A. Seleznev), the correct spelling is A. Selezenev).
2. *Хоровиц П., Хилл У.* Искусство схемотехники. Т. 1 / пер. Б. Н. Бронин [и др.]. — 3-е, стер. — М. : Мир, 1986. — С. 600.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Лист. 001002
 Справ. №
 Вид. № докум.
 Разр. Чекмаев
 Лист. 1 / Листов. 2
 Имя. № подл.
 Подп. и дата



Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Лит.	Масса	Масштаб
							1:1
Разр.	Чекмаев				Лист. 1	Листов. 2	
Лист.							
Имя.	№ подл.						
Подп.	и дата						



Имя, № подл. Лист и дата. Имя, № докум. Лист и дата. Имя, № докум. Лист и дата.