

Graduating university:

Ministry of Education and Science of the Russian Federation

National Research Tomsk Polytechnic University

Institute of Physics and Technology

Department of Electronics and Automation of Nuclear Plants

Guiding firm: The Academy of Sciences of the Czech Republic

Nuclear Physics Institute

Nuclear Spectroscopy Department

## **Development of 8-channel readout and data analysis system of neutron fluence monitoring for PSD in CBM experiment**

By Viktor V. Opolskiy

A graduation work

Submitted in fulfillment of the  
graduation work requirements for  
the qualification of physical engineer.

Approved by:

Work chief (NPI): Dr. Vasilij Kushpil

Work consultant (NPI): Dr. Svetlana Kushpil

Science advisor (TPU): Prof. A.G. Goryunov

Řež near Prague, Tomsk – 2017

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Институт – Физико-технический  
Направление – Ядерная физика и технологии  
Кафедра – Электроника и автоматика физических установок  
Специальность – Электроника и автоматика физических установок

**ДИПЛОМНЫЙ ПРОЕКТ**

Тема работы
<b>РАЗРАБОТКА 8-КАНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ СЧИТЫВАНИЯ И АНАЛИЗА ДАННЫХ НЕЙТРОННОГО ФЛЮЕНСА ДЛЯ МОНИТОРИНГА PSD В ЭКСПЕРИМЕНТЕ СВМ</b>

УДК 004.67:539.125.52.08

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0712	Опольский В.В.		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Зав. лаб. ИЯФ АНЧР	Кушпиль В.В.	д-р техн. Наук		
Ст. науч. сотрудник	Кушпиль С.А.	д-р физ. мат. Наук		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Меньшикова Е.В.	канд. филос. наук, доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Акимов Д.В.			

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ЭАФУ	Горюнов А.Г.	д-р техн. наук, доцент		

Томск – 2017 г.

## ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<i>Универсальные компетенции</i>	
P1	Представлять современную картину мира на основе целостной системы естественнонаучных и математических знаний, а также культурных ценностей; понимать социальную значимость своей будущей профессии, обладать высокой мотивацией к выполнению профессиональной деятельности, защите интересов личности, общества и государства; быть готовым к анализу социально-значимых процессов и явлений, применять основные положения и методы гуманитарных, социальных и экономических наук при организации работы в организации, к осуществлению воспитательной и образовательной деятельности в сфере публичной и частной жизни.
P2	Обладать способностями: действовать в соответствии с Конституцией РФ, исполнять свой гражданский и профессиональный долг, руководствуясь принципами законности и патриотизма, правилами и положениями, установленные законами и другими нормативными правовыми актами; к логическому мышлению, обобщению, анализу, прогнозированию, постановке исследовательских задач и выбору путей их достижения; понимать основы национальной и военной безопасности РФ; работать в многонациональном коллективе; формировать цели команды, применять методы конструктивного разрешения конфликтных ситуаций; использовать на практике навыки и умения в организации

	научно-исследовательских и научно-производственных работ.
Р3	Самостоятельно, методически правильно применять методы самостоятельного физического воспитания для повышения адаптационных резервов организма и укрепления здоровья, готовностью к достижению и поддержанию должного уровня физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности.
Р4	Свободно владеть литературной и деловой письменной и устной речью на русском языке, навыками публичной и научной речи. Уметь создавать и редактировать тексты профессионального назначения, владеть одним из иностранных языков как средством делового общения.
Р5	Находить организационно-управленческие решения в нестандартных ситуациях и нести за них ответственность; быть готовым к принятию ответственности за свои решения в рамках профессиональной компетенции, принимать решения в нестандартных условиях обстановки и организовывать его выполнение, самостоятельно действовать в пределах предоставленных прав; самостоятельно применять методы и средства познания, обучения и самоконтроля для приобретения новых знаний и умений, в том числе в новых областях, непосредственно не связанных со сферой деятельности, развития социальных и профессиональных компетенций.
Р6	Применять основные законы естественнонаучных дисциплин, математический аппарат, вычислительную технику, современные методы исследований процессов и объектов для формализации, анализа и выработки решения профессиональных задач.

<i><b>Профессиональные компетенции</b></i>	
Р7	<p>Уметь самостоятельно повышать уровень знаний в области профессиональной деятельности, приобретать с помощью информационных технологий и использовать в практической деятельности новые знания и умения; использовать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт, методы научно-исследовательской и практической деятельности, современные компьютерные технологии и базы данных в своей предметной области; работать с информацией в глобальных компьютерных сетях; оценивать перспективы развития АСУ и АСНИ физических установок (вооружения и техники, процессов и аппаратов атомной промышленности и энергетики), использовать современные достижения в научно-исследовательских работах.</p>
Р8	<p>Применять знания о процессах в ядерных энергетических и физических установках, и о технологических процессах ядерного топливного цикла используя методы математического моделирования отдельных стадий и всего процесса для разработки АСУ ТП и АСНИ с применением пакетов автоматизированного проектирования и исследований.</p>
Р9	<p>Использовать знания о протекающих процессах в ядерных энергетических установках, аппаратах производств ядерного топливного цикла, теории и практики АСУ ТП, при проектировании, настройке, наладке, испытаниях и эксплуатации современного оборудования, информационного, организационного, математического и программного обеспечения, специальных технических средств, сооружений, объектов и их систем; организовать эксплуатацию физических</p>

	<p>установок (вооружения и техники, процессов и аппаратов атомной промышленности и энергетики), современного оборудования и приборов с учетом требований руководящих и нормативных документов; быть готовым к освоению новых образцов физических установок, составлению инструкций по эксплуатации оборудования и программ испытаний.</p>
P10	<p>Использовать технические средства и информационные технологии, проводить предварительное технико-экономического обоснования проектных расчетов устройств и узлов приборов и установок, расчет, концептуальную и проектную проработку программно-технических средств АСУ ТП и АСНИ, применять методы оптимизации, анализа вариантов, поиска решения многокритериальных задач с учетом неопределенностей объекта управления, разрабатывать способы применения программно-технических средств АСУ ТП и АСНИ, решать инженерно-физические и экономические задачи, применяя знания теории и практики АСУ, включающее математическое, информационное и техническое обеспечения, для проектирования, испытания, внедрения и эксплуатации АСУ ТП и АСНИ.</p>
P11	<p>Понимать сущность и значение информации в развитии современного общества, соблюдать основные требования безопасности и защиты государственной тайны; выполнять мероприятия по восстановлению работоспособности физических установок (вооружения и техники, процессов и аппаратов атомной промышленности и энергетики) при возникновении аварийных ситуаций, разрабатывать методы уменьшения риска их возникновения; проводить анализ и</p>

	оценку обстановки для принятия решения в случае возникновения аварийных ситуаций, экологическую безопасность, нормы и правило производственной санитарии, пожарной, радиационной и ядерной безопасности.
P12	Разрабатывать проекты нормативных и методических материалов, технических условий, стандартов и технических описаний средств АСУ ТП и АСНИ, регламентирующих работу в сфере профессиональной деятельности; осуществлять разработку технического задания, расчет, проектную проработку современных устройств и узлов приборов, установок (образцов вооружения, программно-технических средств АСУ ТП и АСНИ), использовать знания методов анализа эколого-экономической эффективности при проектировании и реализации проектов.
P13	Использовать в профессиональной деятельности нормативные правовые акты в области защиты государственной тайны, интеллектуальной собственности, авторского права и в других областях; осуществлять поиск, изучение, обобщение и систематизацию научно-технической информации, нормативных и методических материалов в сфере своей профессиональной деятельности.
P14	Проявлять и активно применять способность к организации и управлению работой коллектива, в том числе: находить и принять управленческие решения в сфере профессиональной деятельности; разрабатывать планы работы коллективов; контролировать соблюдение технологической дисциплины, обслуживания, технического оснащения, размещения технологического оборудования; организовывать учет и

	<p>сохранность физических установок (вооружения и техники), соблюдение требований безопасности при эксплуатации; использовать основные методы защиты персонала и населения от возможных последствий аварий, катастроф, стихийных бедствий.</p>
<p>P15</p>	<p>Демонстрировать способность к осуществлению и анализу научно-исследовательских, технологических и пуско-наладочных работ, разработке планов и программ их проведения, включая ядерно-физические эксперименты, выбору методов и средств решения новых задач с применением современных электронных устройств, представлению результатов исследований и формулированию практических рекомендаций их использования в формах научно-технических отчетов, обзоров, публикаций по результатам выполненных работ; выполнять полный объем работ, связанных с техническим обслуживанием физических установок с учетом требований руководящих и нормативных документов.</p>

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Институт – Физико-технический  
Направление – Ядерные физика и технологии  
Кафедра – Электроника и автоматика физических установок  
Специальность – Электроника и автоматика физических установок

**УТВЕРЖДАЮ**  
Зав. кафедрой ЭАФУ ФТИ  
\_\_\_\_\_ А.Г. Горюнов  
«08» сентября 2016 г.

**ЗАДАНИЕ**  
на выполнение выпускной квалификационной работы

**В форме:**

Дипломного проекта
--------------------

**Студенту:**

Группа	ФИО
0712	Опольский В.В.

**Тема работы:**

<b>РАЗРАБОТКА 8-КАНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ СЧИТЫВАНИЯ И АНАЛИЗА ДАННЫХ НЕЙТРОННОГО ФЛЮЕНСА ДЛЯ МОНИТОРИНГА PSD В ЭКСПЕРИМЕНТЕ СВМ</b>
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<b>Утверждена приказом директора ФТИ</b>	от 31.10.2016 № 9286/с
------------------------------------------	------------------------

<b>Дата сдачи студентом выполненной работы</b>	23 января 2017 г.
------------------------------------------------	-------------------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<b>Исходные данные к работе</b>	Система считывания и анализа данных флюенса нейтронов должна включать PIN-фотодиод в качестве чувствительного элемента. Измерение проводится двумя методами: измерением заряда переключения и напряжения прямого включения. Данные должны отображаться в реальном времени;
---------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>	Аналитический обзор литературных источников с целью обоснования актуальности дипломной работы; аналитическое и экспериментальное исследование зависимости параметров PIN-фотодиода BPW34 от флюенса нейтронов и температуры; разработка методов измерения флюенса нейтронов с помощью PIN-фотодиода BPW34; разработка прототипа системы считывания и анализа данных флюенса нейтронов. проверка работоспособности разработки;
<b>Перечень графического материала</b>	Принципиальная электрическая схема, перечень элементов, функциональная электрическая схема
<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	доцент, канд. филос. наук Меньшикова Е.В.
Социальная ответственность	ассистент, Акимов Д.В.

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	03 октября 2016 г.
-------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Зав. лаб. ИЯФ АНЧР	Кушпиль В.В.			03.10.16

**Задание принял к исполнению студент**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0712	Опольский В.В.		03.10.16

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 113 с., 35 рис., 19 табл., 24 источника, 4 прил., 17 л. графич. материала.

ЭКСПЕРИМЕНТ СВМ, PSD, АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ФЛЮЕНСА НЕЙТРОНОВ, ПАРАМЕТРЫ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ, PSOC, ЗАРЯД ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ, НАПРЯЖЕНИЕ ПРЯМОГО ВКЛЮЧЕНИЯ, МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Объектом исследования и разработок являются PIN-фотодиод BPW34 и автоматическая 8-канальная система сбора и анализа данных.

Цель работы – Разработать 8-канальную систему считывания и анализа данных нейтронного флюенса, обеспечивающую контроль заданных параметров в реальном времени.

В процессе выполнения работы проводилось аналитическое и экспериментальное исследование параметров PIN-фотодиода BPW34, и влияние на него нейтронного флюенса. Для создания системы считывания параметров была разработана функциональная схема устройства, был осуществлен выбор элементной базы, разработана принципиальная электрическая схема прототипа. Прототип измерительной части разработанного устройства был собран на макетной плате и протестирован в лабораторных условиях.

Результаты дипломного проекта будут использованы для дальнейших разработок и внедрения в реальное использование.

Выпускная квалификационная работа выполнена с использованием пакета программ Microsoft Office 2007. Разработанные физико-математические модели реализованы в пакетах MatLab, Octave и CERN Root. Для разработки прикладного программного обеспечения использовалась среда разработки PSoC Creator 3.2. Для разработки принципиальной схемы устройства использовалась программа sPlan 7.0.

## **ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ, НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ**

В данной работе использованы ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 2.702–75 Единая система конструкторской документации.  
Правила выполнения электрических схем.

ГОСТ 2.728–74 Единая система конструкторской документации.  
Обозначения условные графические в схемах. Резисторы, конденсаторы.

ГОСТ 2.730–73 Единая система конструкторской документации.  
Обозначения условные графические на схемах. Приборы полупроводниковые.

ГОСТ 12.2.032–78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя.  
Общие эргономические требования

НПБ 105–03 Определение категорий помещений, зданий и наружных  
установок по взрывопожарной и пожарной опасности

СНиП 23–05–95 Естественное и искусственное освещение

СП 2.2.1.1312–03 Гигиенические требования к проектированию вновь  
строящихся и реконструируемых промышленных предприятий.

ГОСТ 12.0.003-74. Опасные и вредные производственные  
факторы.

ГОСТ 12.1.003-83. ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.

НРБ-99/2009. СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной  
безопасности. Санитарные правила и нормативы.

В данной работе применены следующие обозначения и сокращения:

Projectile Spectator Detector; PSD.

Compressed Baryonic Matter; CBM.

Programmable System on Chip; PSoC.

Аналого-цифровой преобразователь; АЦП.

Universal asynchronous receiver-transceiver; UART

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	16
1 Аналитический обзор.....	18
1.1 Описание экспериментов по исследованию вещества с высокой плотностью .....	18
1.2 PSD детектор в составе эксперимента СВМ .....	21
1.3 Радиационная стойкость детектора.....	22
1.4 Использование PIN-диода в качестве детектора флюенса нейтронов .....	28
1.5 Заряд переключения PIN-диода, как функция флюенса нейтронов .....	32
2 Экспериментальная часть.....	38
2.1 Постановка задач для проведения эксперимента на циклотроне U-120М	38
2.2 Описание циклотрона U-120М .....	39
2.3 Экспериментальная установка.....	40
2.4 Монтаж и установка .....	42
2.5 Проведение измерений .....	43
2.6 Обработка результатов эксперимента .....	45
2.7 Повторный эксперимент на циклотроне .....	47
2.8 Измерение температурных зависимостей .....	51
2.9 Описание экспериментальной установки.....	51
2.10 Обработка результатов эксперимента .....	52
3 Разработка функциональной схемы устройства .....	55
3.1 Разработка схемы электрической функциональной.....	55
3.2 Выбор элементной базы .....	56
3.2.1 Выбор управляющего блока .....	56
3.2.2 Выбор датчика температуры .....	56
3.2.3 Выбор операционного усилителя.....	57
3.2.4 Выбор PIN-диода .....	58
3.2.5 Выбор преобразователя отрицательного напряжения .....	59
	13

3.3	Разработка схемы электрической принципиальной .....	60
3.3.1	Разработка схемы измерения заряда переключения .....	60
3.3.2	Моделирование схемы измерения заряда переключения.....	62
3.4	Тестирование канала измерения заряда переключения на прототипе ....	65
3.4.1	Разработка программного обеспечения для PSoC5.....	66
4.	Социальная ответственность .....	68
4.1	Введение.....	68
4.2	Характеристика вредных и опасных факторов, имеющих место в лаборатории .....	70
4.3	Организация мероприятий по электробезопасности.....	70
4.4	Требования безопасности при работе видеотерминалов и ПЭВМ .....	73
4.4.1	Эргономика и организация рабочего места.....	73
4.4.2	Мероприятия по выполнению норм естественного и искусственного освещения .....	74
4.4.3	Мероприятия по борьбе с производственным шумом .....	76
4.4.4	Мероприятия по радиационной безопасности.....	77
4.4.5	Мероприятия по выполнению норм вентиляции и отопления.....	79
4.4.6	Мероприятия по пожарной безопасности .....	79
5	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение .....	81
5.1	Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения .....	81
5.2	SWOT-анализ.....	84
5.3	Оценка готовности проекта к коммерциализации.....	86
5.4	Инициация проекта .....	89
5.5	План проекта.....	92
5.6	Бюджет научного исследования.....	94
5.6.1	Расчёт стоимости материальных затрат .....	94
5.6.2	Расчёт стоимости затрат на специальное оборудование .....	95
5.6.3	Расчёт заработной платы работников.....	96

5.6.4 Расчёт отчислений на социальные нужды .....	99
5.6.5 Расчёт потребляемой электроэнергии .....	100
5.6.6 Группировка затрат по статьям .....	100
5.6.7 Оценка сравнительной эффективности исследования.....	103
Заключение.....	107
Список использованных источников.....	108
Приложение А: Функциональная схема измеряющей части	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
Приложение Б: Структурная схема системы считывания	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
Приложение В: Блок схема обработчика прерываний	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
Приложение Г: Текст программы обработчика прерываний	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время различные сферы экспериментальной и ядерной физики, в частности эксплуатация ядерных установок и ускорителей, ставят задачи по измерению флюенса нейтронов.

Одними из первых способов измерения флюенса тепловых нейтронов были детектор с применением пропорциональных счетчиков и ионизационных камер. Развитие полупроводниковых технологий позволяет снизить габариты детекторов и расходы на их производство. Также современные модули позволяют определять координаты нейтронного взаимодействия частиц с детектором в реальном времени и сохранять большие объемы данных.

С другой стороны, параметры полупроводников существенно изменяются в зависимости от условий окружающей среды. Вследствие этого необходимо исследовать влияние сторонних возмущений, и, в случае их существенности, произвести коррекцию. Вследствие возможного разброса параметров полупроводниковых приборов, требуется производить калибровку чувствительных элементов.

В разрабатываемом детекторе основным чувствительным элементом является PIN-диод серии ВРW34. Основные параметры, зависящие от дозы нейтронов – это заряд переключения и напряжение прямого включения. Основным фактором, вносящим систематическую ошибку, является температура PIN-диода.

Целью данной работы является разработка 8-канальной системы считывания и анализа данных нейтронного флюенса, обеспечивающей контроль заданных параметров в реальном времени. Таким образом можно выделить следующие решаемые задачи: аналитический обзор методов контроля

					<b>ФЮРА. 4 12126.018ПЗ</b>		
<i>Изм</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>			
<i>Разраб.</i>		<i>Опольский В.В.</i>					
<i>Провер.</i>		<i>Кушпиль В.В.</i>					
<i>Консул.</i>		<i>Кушпиль С.А.</i>					
<i>Н. конт.</i>		<i>Ефремов Е.В.</i>					
<i>Утв.</i>		<i>Горянов А.Г.</i>					
<b>Введение</b>					<i>Лит</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
					<b>ТПУ</b>	<b>ФТИ</b>	
					<b>Группа</b>	<b>0712</b>	

нейтронного флюенса, основанных на измерении параметров PIN-фотодиода; экспериментальные исследования зависимостей напряжения прямого включения и заряда переключения от флюенса нейтронов и температуры; обработка и анализ результатов экспериментов; калибровка параметров детектора; симуляция, разработка и тестирование электрической схемы канала измерения на основе программируемой системы на кристалле (PSoC).

Результаты разработок впоследствии будут использованы при создании реальной системы сбора и анализа данных.

# 1 Аналитический обзор

## 1.1 Описание экспериментов по исследованию вещества с высокой плотностью

В настоящее время в ядерной физике проводятся масштабные теоретические и экспериментальные исследования вещества со сверхвысокой плотностью. Существование такого вещества в земных условиях маловероятно, но его существование предсказывается теоретически, как состояние нейтронов в процессе взрыва сверхновой звезды и нейтронных звездах. Такое состояние кварк-глюонной плазмы может быть получено в лабораторных условиях с помощью столкновений тяжелых релятивистских частиц, что позволяет проводить исследования, используя косвенные методы. Главная цель проводимых исследований – изучить законы сильного взаимодействия, а также проверить описывающие его теории. Плотность барионов, достигнутая в результате столкновений, зависит от энергии пучка. Другими словами, изменяя энергию пучка в определенных пределах, можно произвести различные состояния и фазы сильновзаимодействующей материи.

Фазы состояния материи [1] в зависимости от плотности и температуры схематически представлены на рисунке 1.1.

					<b>ФЮРА. 4 12126.018ПЗ</b>			
<i>Изм</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		<i>Опольский В.В.</i>			<b>Аналитический обзор</b>	<i>Лит</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>		<i>Кушпиль В.В.</i>						
<i>Консул.</i>		<i>Кушпиль С.А.</i>						
<i>Н. конт.</i>		<i>Ефремов Е.В.</i>						
<i>Утв.</i>		<i>Горюнов А.Г.</i>						
						<b>ТПУ</b>	<b>ФТИ</b>	
						<b>Группа</b>	<b>0712</b>	

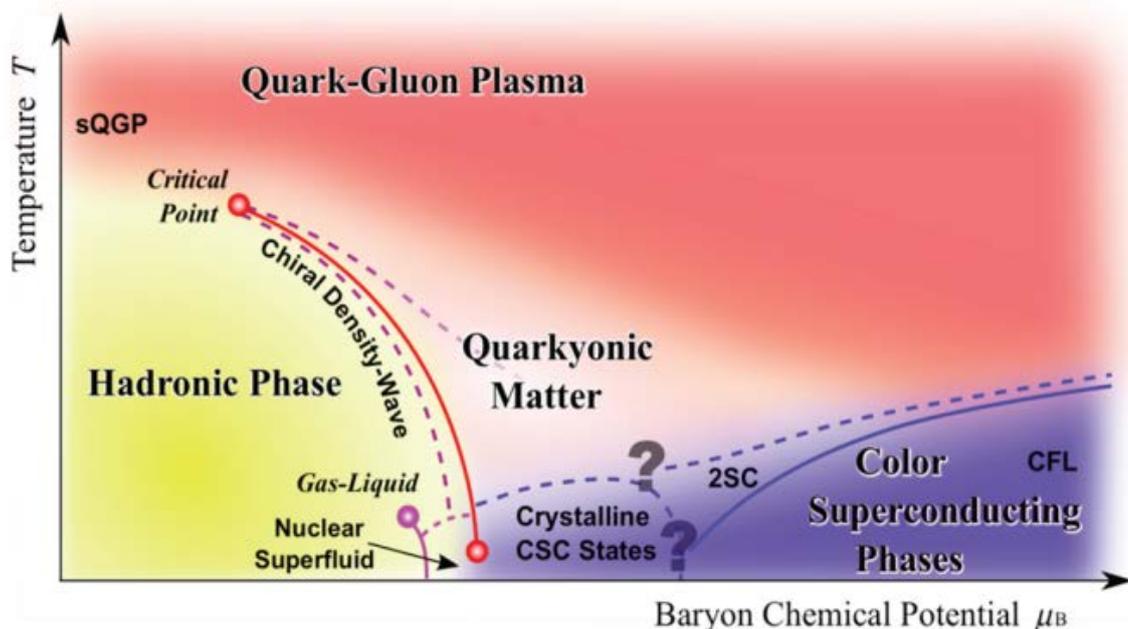


Рисунок 1.1 – Фазовая диаграмма квантовой хромодинамики

Жидкая фаза реализуется в веществе при нулевой температуре и плотности вещества 300 миллионов тонн на кубический сантиметр. При малых плотностях вещество ведет себя как газ. По мере того как температура и плотность поднимаются, нуклоны возбуждаются в "барионные резонансы", которые впоследствии распадаются на пионы и нуклоны. Эта смесь нуклонов, барионных резонансов и мезонов называется адронной материей. Эта адронная фаза представлена белой областью на рисунке 1.1. При очень высоких температурах адроны распадаются на составные части, кварки и глюоны, образуя новую фазу материи, называемую кварк-глюонной плазмой. Данное состояние сильно взаимодействующей материи представляет собой освобожденные цветные кварки и глюоны, образующие непрерывную среду. Этот фазовый переход от адронной к кварк-глюонной материи происходит при температуре около 170 МэВ, которая в 130 тысяч раз выше, чем внутри Солнца. Такие условия существовали в ранней Вселенной несколько микросекунд после Большого Взрыва и могут быть воссозданы с помощью столкновений тяжелых

ионов при ультрарелятивистских энергиях, как это возможно осуществить в коллайдере релятивистских ионов (RHIC) в Брукхейвенской национальной лаборатории и Большом адронном коллайдере (БАК) в ЦЕРН. С высокой степенью сжатия холодной ядерной материи, такой, как в недрах нейтронных звезд, барионы также теряют свою идентичность и растворяются в кварки и глюоны. Критическая плотность, при которой происходит этот переход, однако, не известна. То же самое верно для всей области фазовой диаграммы с высокой плотностью.

Фазовая диаграмма квантовой хромодинамики мало изучена в области высоких плотностей барионов и умеренных температур. Самые высокие чистые плотности барионов при ядерных столкновениях находятся в диапазоне энергий пучка от 10 до 40 ГэВ. Диапазон энергий до 15 ГэВ был впервые получен на AGS в Брукхейвенской национальной лаборатории. В эксперименте второго поколения диапазон энергий от 10 до 40 ГэВ должен быть достигнут для поиска:

- средних модификаций адронов в плотном веществе;
- признаков фазового перехода при высоких плотностях барионов;
- критической точки, предоставляющей прямые доказательства для границы раздела фаз;
- нетипичных состояний вещества, таких как конденсаты странных частиц (элементарных частиц, имеющие в своём составе s-кварк).

Эксперимент CBM (Compressed Baryonic Matter) будет одним из главных научных основ будущего комплекса ионных и антипротонных исследований (FAIR) в г. Дармштадт, Германия. Подход данного эксперимента к достижению этих целей – это одновременное измерение наблюдаемых частиц, которые чувствительны к воздействию высокой плотности, и фазовых переходов.

В частности, программа исследований сосредоточена на:

- короткоживущих легких векторных мезонов (например,  $\rho$ -мезон), которые распадаются на электрон-позитронные пары.
- странные частицы, в частности барионы (антибарионы), содержащие более одного странного (антистранного) кварка, так называемые многоуровневые гипероны ( $\Lambda$ ,  $\Xi$ ,  $\Omega$ );
- мезоны, содержащие очаровательные или анти-очарование кварки ( $D$ ,  $J/\Psi$ );
- суммарный поток всех наблюдаемых частиц.

В эксперименте CBM будут определяться множественности частиц и распределения фазового пространства, центральности столкновения и плоскости реакции. Например, изучение коллективного потока очаровательных и мультистранных гиперонов прольет свет на производство и распространение редких частиц в плотной барионной материи.

Одновременное измерение различных частиц позволяет исследовать кросскорреляций. Этот эффект открывает новые перспективы для экспериментального исследования ядерной материи в экстремальных условиях.

## **1.2 PSD детектор в составе эксперимента CBM**

Projectile Spectator Detector (PSD) будет использован в эксперименте CBM, главная задача которого состоит в экспериментальном измерении центральности и плоскости соударений тяжелых ионов. Точная оценка параметров наблюдаемых частиц имеет решающее значение для исследования многих физических явлений, которое должно выполняться CBM-коллаборацией.

PSD – это компенсирующий сцинтиллирующий калориметр, выполненный из свинца и предназначенный для измерения распределения энергии осколков сталкивающихся ядер и направленных частиц, образованных

вблизи пучка. Основные требования к конструкции PSD это большой радиус покрытия и достаточное разрешение по энергии, чтобы обеспечить точное определение центральности соударений и количество участвующих нуклонов, а так же зернистость в плоскости, перпендикулярной к направлению пучка. Предлагаемая конструкция состоит из 44 модулей PSD и охватывает большую площадь поперечного положения луча таким образом, что большая часть частиц засекается детектором.

### 1.3 Радиационная стойкость детектора

Высокоинтенсивные пучки тяжелых ионов, используемые в эксперименте CBM, создают проблему радиационной стойкости адронного калориметра. Возможное ухудшение основных характеристик калориметра после облучения следует рассматривать отдельно для PSD модулей и для фотодетекторов. Общая доза облучения в PSD и нейтронный флюенс моделировались в программном пакете FLUKA с использованием реальной геометрии колец SIS100 и SIS300, как показано на рисунке 1.2.

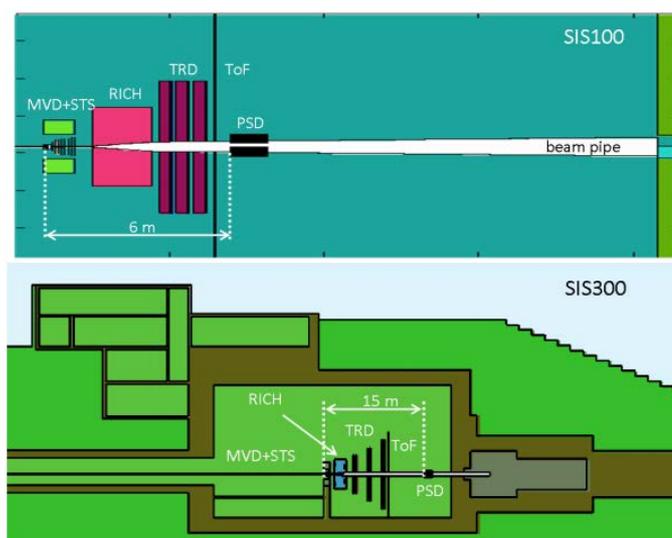


Рисунок 1.2 – Геометрия SIS100 и SIS300, построенная в FLUKA

Распределения дозы и потока нейтронов были рассчитаны для PSD, расположенном на расстоянии 8 м (SIS100) и 15 м (SIS300) от мишени. Падающий пучок ионов, отклоняющийся магнитом, проходит через отверстие диаметром 60 мм в центре модуля PSD. Доза и поток нейтронов были рассчитаны для скорости пучка в 108 ионов в секунду (скорость реакции 106 в секунду) для реакции Au+Au в 2, 10 и 35 ГэВ. Расчеты были проведены в течение 2-х месяцев непрерывной подачи пучка. Распределения доз вдоль модулей калориметра в радиусе 10, 20 и 50 см, показаны на рисунке 1.3 для 2 ГэВ (слева), 10 ГэВ (в центре) и 35 ГэВ (справа), соответственно. Распределения доз отражают продольный профиль адронного потока в калориметре. Можно видеть, что максимальная доза облучения составляет около 700 Гр на 35 ГэВ вблизи отверстия и не имеет решающего значения для сцинтилляторов.

Наиболее важным эффектом является деградация фотодетекторов, вызванная потоком нейтронов через заднюю сторону PSD калориметра. Согласно FLUKA-моделированию (рис. 1.4), флюенс вблизи отверстия может достигать около  $5 \cdot 10^{12}$  нейтронов на  $\text{см}^2$  или энергии 35 ГэВ через 2 месяца непрерывного облучения, работающий со скоростью пучка 108 ионов в секунду. Поэтому вопрос исследования радиационной стойкости элементов детектора PSD и контроля суммарного потока нейтронов в реальном времени является очень важным.

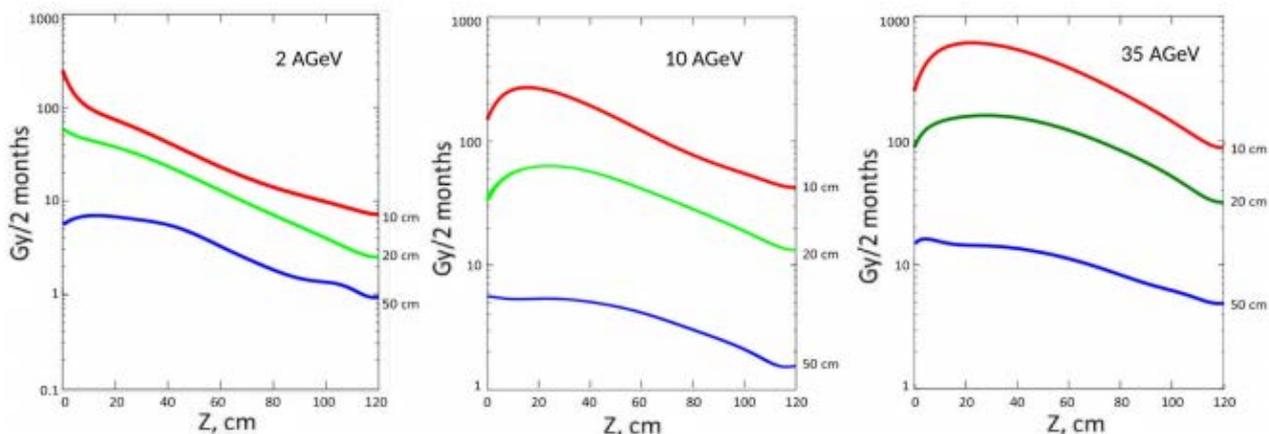


Рисунок 1.3 – Продольное распределение средней дозы вдоль PSD на расстоянии 10, 20 и 30 см от оси пучка для энергии 2 и 10 ГэВ, и на расстоянии 8 м и 35 ГэВ (левый, средний и правый график соответственно)

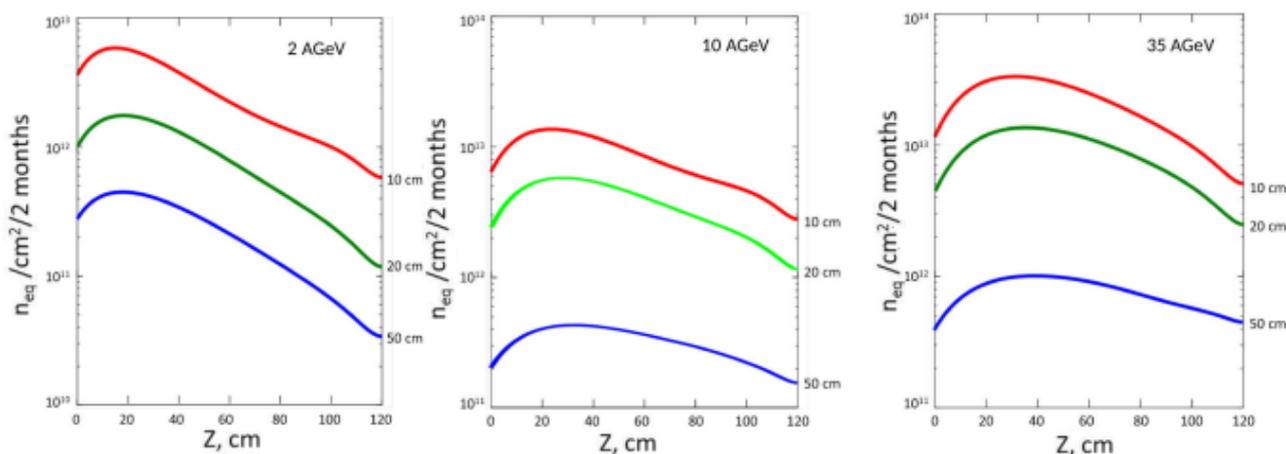


Рисунок 1.4 – Распределение потока нейтронов ( $\text{см}^2/\text{с}$ ) через PSD калориметр на энергии 2 ГэВ (слева), 10 ГэВ (в центре) и 35 ГэВ (справа).

При облучении кремниевых лавинных фотодиодов нейтронами ухудшаются такие параметры, как темновой ток и коэффициент усиления, а при превышении критической поглощенной дозы фотодиоды выйдут из строя. Участники проекта CMS [6] (ЦЕРН) и Ю. Мусиенко (Институт Ядерных Исследований, Москва) провели исследования влияния флюенса нейтронов на

основные параметры кремниевых ЛФД MAPD-A, произведённых компанией Zecotek [7].

В качестве исследуемых параметров были выбраны коэффициент усиления ЛФД при постоянном напряжении смещения и темновой ток ЛФД (рисунок 1.5 и 1.6 соответственно).

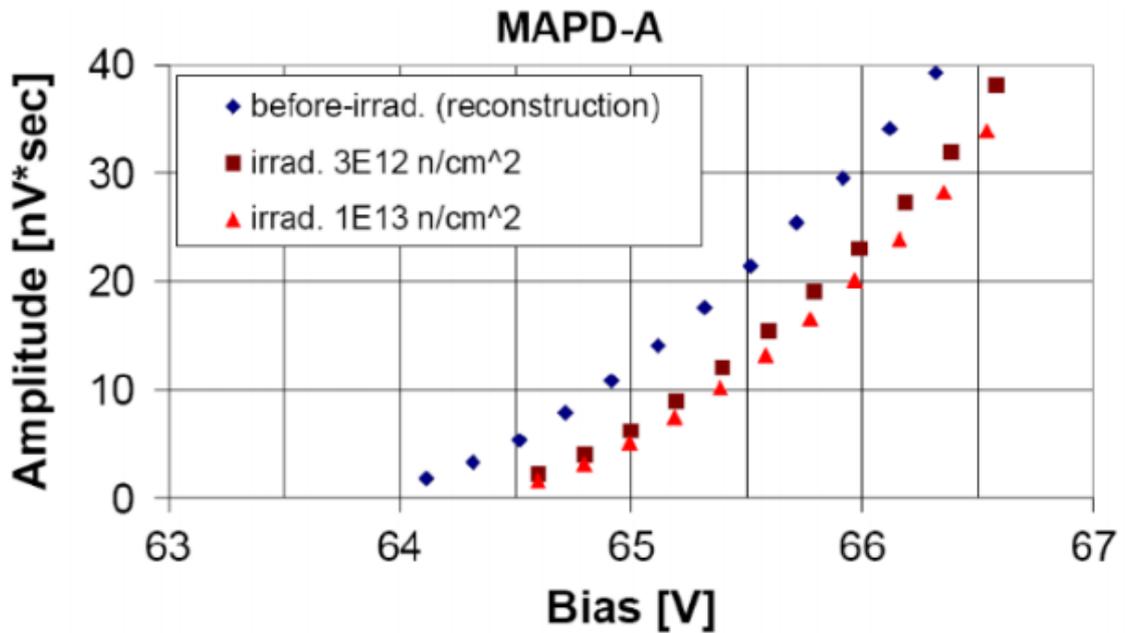


Рисунок 1.5 – Влияние нейтронного потока на коэффициент усиления ЛФД фирмы Zecotek

На графике 1.5 можно видеть, что при суммарном потоке нейтронов  $3 \cdot 10^{12}$  н/см<sup>2</sup> происходит снижение коэффициента усиления на 30%. При дальнейшем увеличении дозы спад имеет более плавный характер. Результаты измерений для темнового тока ЛФД представлены на рисунке 1.6.

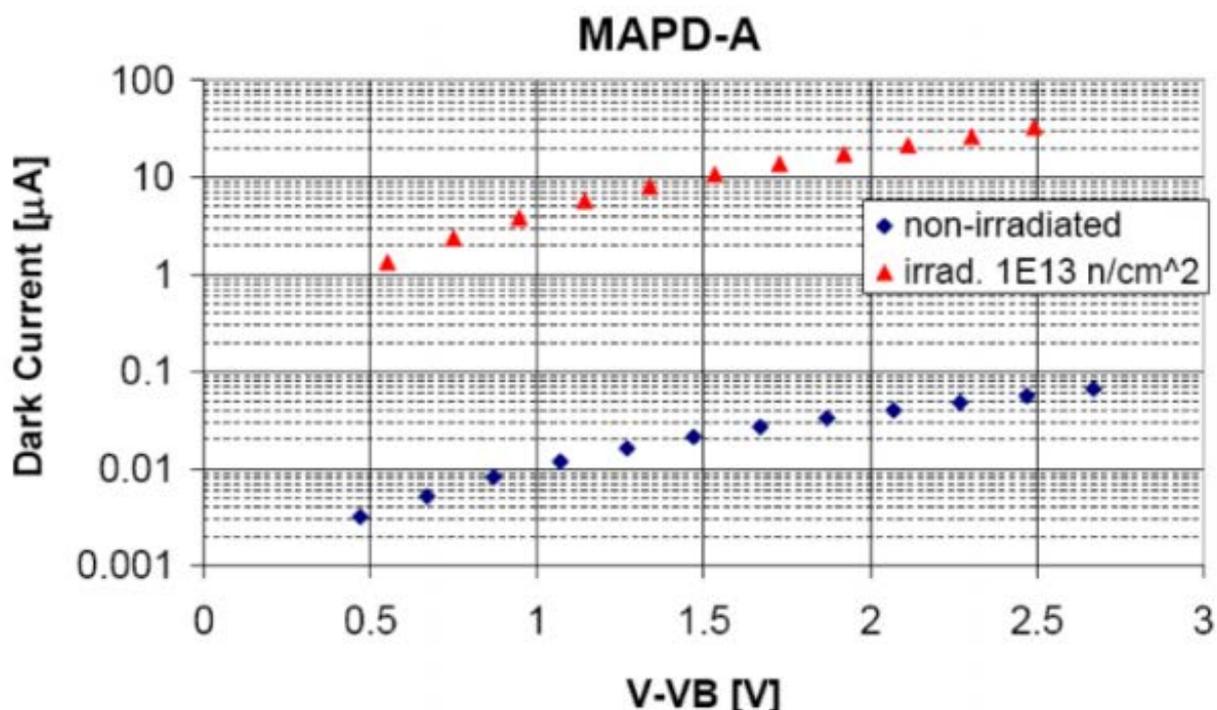


Рисунок 1.6 – Влияние нейтронного потока на темновой ток ЛФД фирмы Zecotec

При достижении нейтронного флюенса порядка  $10^{13}$  н/см<sup>2</sup> темновой ток увеличивается почти на 3 порядка. Эта величина не является критической для фотодетектора, но для его точной калибровки необходимо совместно с коэффициентом усиления отслеживать изменения данного параметра.

Исследования В. Кушпиль (Институт ядерной физики Чешской Академии наук, г. Ржеж) показали, что под воздействием облучения нейтронами также повышается уровень собственного шума фотодетекторов, лежащего в полосе частот 200 МГц [7]. Результаты исследований представлены на рисунке 1.7.

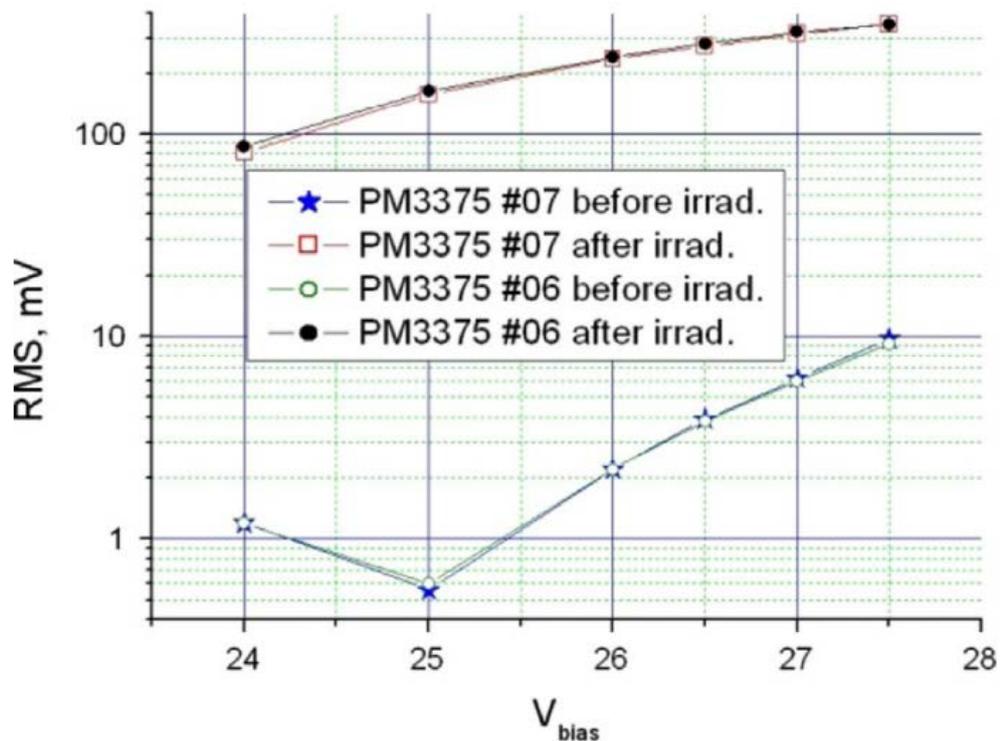


Рисунок 1.7 – Влияние нейтронного потока на уровень собственного шума ЛФД фирмы Ketek

График 1.7 показывает изменения уровня собственного шума в диапазоне частот до 200 МГц ЛФД PM3375 фирмы Ketek при поглощенной дозе нейтронов, равной  $2,5 \cdot 10^{12}$  экв. н/см<sup>2</sup>. Как видно из графика, после облучения уровень шума возрастает на 2–3 порядка в зависимости от рабочего напряжения смещения ЛФД. Из-за повышения уровня шума после облучения становится невозможной регистрация единичных фотонов детекторами. Это существенно ухудшает разрешающую способность детектора. В настоящий момент для детектора PSD разрабатывается система контроля поглощенной дозы для ЛФД, поэтому вопрос обеспечения их надежной работы в условиях постоянного радиационного воздействия является актуальным.

## 1.4 Использование PIN-диода в качестве детектора флюенса нейтронов

С 1959 года PIN-диоды используются в качестве устройства для измерения дозы от быстрых нейтронов и заряженных частиц [9,14]. Для точного измерения поглощенной дозы необходимо контролировать несколько важных параметров: температура, интервал времени после облучения диода, а также параметры тестового сигнала (амплитуды тока и длительности импульса).

Принцип использования PIN-диода для измерения поглощенной дозы описан в работах [10, 11]. Общее прямое напряжение может быть представлено как в уравнении (1.1), где  $V_{fw}$  - это общее прямое напряжение,  $V_{pn}$  напряжение перехода, и  $V_{rb}$  напряжение на сопротивлении кремния с собственной проводимостью:

$$V_{fw} = V_{pn} + V_{rb}. \quad (1.1)$$

Согласно работе [11], можно разложить зависимость каждого компонента на общее напряжение, используя параметры полупроводников, как указано в уравнении (1.2):

$$V_{fw} = \varphi_T \cdot \ln \left[ \frac{I(t) \cdot N_d(\Phi)}{e \cdot S \cdot N_i^2 \cdot \sqrt{D_n \cdot \tau_n}} \right] + \varphi_T \cdot \ln \left[ \frac{I(t) + B(N_t[\Phi])}{A(N_d(\Phi)) + B(N_t(\Phi))} \right], \quad (1.2)$$

где  $N_d$  - концентрация доноров в I-области кремния,  $D_n$  и  $\tau_n$  - это длина диффузии и время жизни основных носителей в I-области,  $I(t)$  - прямой ток в момент времени  $t$ ,  $S$  - площадь p-n перехода,  $N_i$  - собственная концентрация носителей для кремния,  $\varphi_T = k \cdot T / e$ ,  $e$  - заряд электрона,  $K$  - постоянная

Больцмана,  $T$  - температура PIN диода,  $K_{nd}$  и  $K_{nt}$  коэффициенты, описывающие зависимость концентрации основных носителей и ловушек с энергией 0,6 эВ от поглощенной дозы ( $N_{d0}$ ,  $N_{i0}$  являются концентрациями до облучения).

Зависимость времени жизни неосновных носителей и удельного сопротивления кремния от дозы нейтронов может быть получена из работы [4]. Окончательно, для функций А и В:

$$A(N_d(\Phi)) = e \cdot \sqrt{\frac{D_n}{\tau(\Phi)}} \cdot \frac{N_i^2}{N_{d0} \cdot \exp(-K_{nd} \cdot \Phi)}, \quad (1.3)$$

$$A(N_d(\Phi)) = e \cdot \frac{L}{2} \cdot N_i \cdot N_{i0} \cdot \exp(K_{nt} \cdot \Phi). \quad (1.4)$$

В статье [12] использованы данные коммерческого PIN-фотодиода BPW34 [13], чтобы оценить влияние дозы на каждую компоненту уравнения (1.1). Результаты расчета представлены на рисунке 1.8.

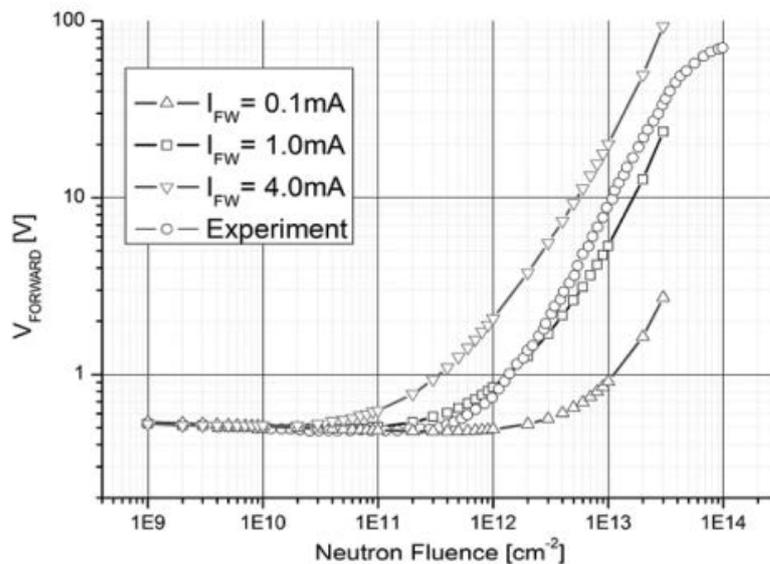


Рисунок 1.8: Моделирование зависимости напряжения прямого включения от плотности потока нейтронов для BPW34

В соответствии с работой [12], можно оценить температуру пассивной части диода для заданной ширины импульса при постоянном токе. Для упрощения мы предполагаем, что процесс охлаждения диода не играет важной роли, и что температура полного диода такая же, как температура пассивная часть диода (область I-типа). Дифференциальное уравнение, описывающее процесс нагрева диода в этом случае может быть представлено, как в уравнении (1.5):

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\rho_n(T)}{C \cdot p \cdot S^2} \cdot I^2(t), \quad (1.5)$$

где  $\rho_n(T)$  - удельное сопротивление кремния,  $C$  - удельная теплоемкость кремния,  $p$  - плотность кремния,  $I(t)$  - прямой ток диода как функция времени  $t$ ,  $L$  - длина пассивной части диода и  $S$  - площадь диода. Точное измерение  $V_{fw}$  возможно, если рассеяние энергии до облучения и после облучения одинаковы (то есть основная масса диода находится при одинаковой температуре). Если последовательное сопротивление области I-типа до облучения -  $R_{b0}$  и его удельного сопротивления после облучения и  $R_{bi} / R_{b0} = K$ , из равновесия рассеиваемой мощности можно получить соотношение для токов  $I_i = I_0 / K^{1/2}$ . Из экспериментальных данных получен верхний предел для  $K$  (для PIN-диода ВРW34  $K$  меньше 60). В случае, если  $K=49$ , рассеивание энергии при токе 1 мА в течение 60 мс будет таким же, как при токе 7 мА в течение длительности импульса 20 мс.

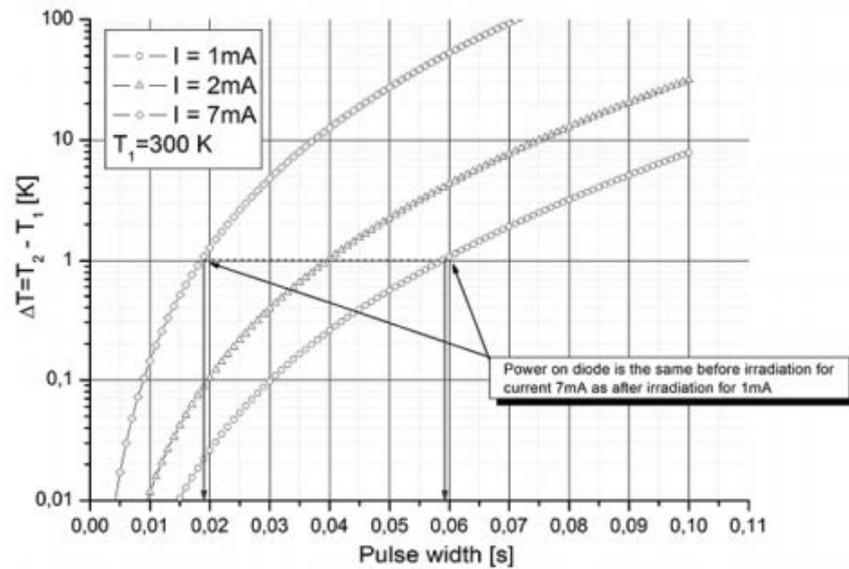


Рисунок 1.9: Повышение температуры BPW34 PIN-фотодиода, как функция длительности импульса для различных токов прямого включения

Результаты моделирования показаны на рисунках 1.8 и 1.9. Моделирование зависимости прямого напряжения от дозы (рисунок 1.8) было получено с предположением, что при облучении в кремнии создается только один уровень ловушки с энергией в половину энергии запрещенной зоны кремния. Это могло бы объяснить большие неопределенности в расчетах по сравнению с экспериментальными данными. Зависимости, представленные на рисунке 1.9, могут быть использованы для оценки длины импульса тока после облучения для диодов с известным удельным сопротивлением базы. Для калибровки PIN-диода необходимо использовать те же параметры тестового сигнала при одинаковой температуре окружающей среды.

Погрешность измерений будет возрастать с увеличением поглощенной дозы и с увеличением изменения температуры окружающей среды. Стабилизация температуры диода может быть выполнена тремя способами:

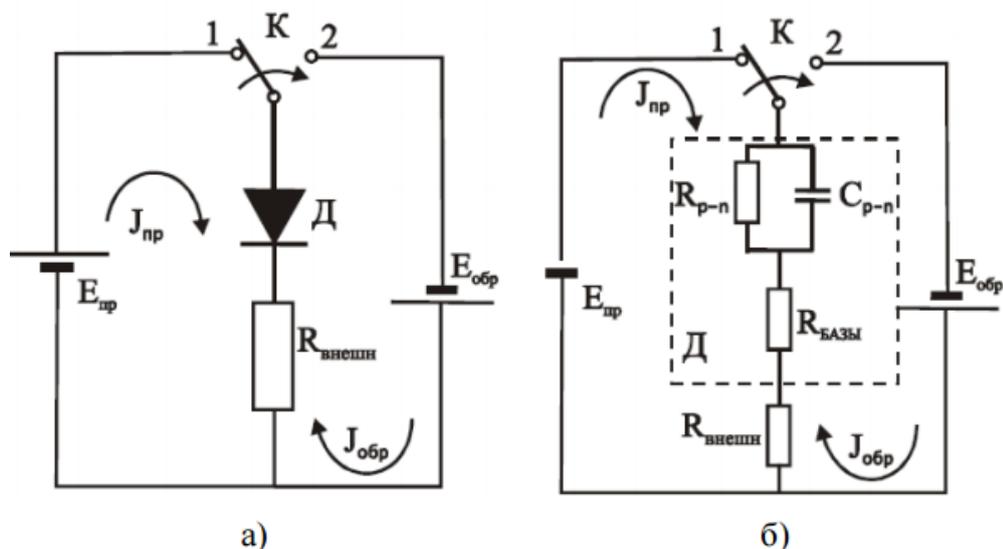
- уменьшение тока через диод во время облучения

- уменьшение длительности импульса для постоянной амплитуды тока
- программная температурная коррекция на основе полученных экспериментальных данных

Так как в данной работе используется мощный управляющий контроллер, третий способ выбран, как самый оптимальный.

### **1.5 Заряд переключения PIN-диода, как функция флюенса нейтронов**

Предлагаемым методом более чувствительного измерения флюенса нейтронов является контроль заряда переключения PIN-диода. Заряд переключения равен полному заряду, протекающему через диод во время переходного процесса при переключении направления тока с обратного на прямое. При облучении полупроводника происходит радиационная деградация кристаллической решетки, возникают ловушки, захватывающие носители заряда. Как следствие, уменьшается их время жизни и увеличивается внутреннее сопротивление материала, что приводит к изменению формы графика переходного процесса переключения и, соответственно, интегральной площади под графиком. Таким образом, заряд переключения может быть количественно определен, интегрируя функцию тока, протекающего через диод, от времени в течение переходного процесса.



а) схема переключения; б) замена диода эквивалентной схемой

Рисунок 1.9 – Схема переключения диода с прямого включения на обратное

Рассмотрим поведение диода в момент коммутации с точки зрения электротехники [15]. На рисунке 1.9а приведена схема коммутации, на 1.9б диод заменен эквивалентной схемой замещения. Уравнение тока в ветви с диодом для положения «1» ключа К1:

$$I_{\text{пр}} = \frac{E_{\text{пр}}}{R_{\text{внешн}} + R_{p-n}}, \quad (1.10)$$

где  $E_{\text{пр}}$  – ЭДС источника прямого напряжения;

$R_{p-n}$  – сопротивление области объемного заряда р-п-перехода

Таким образом, через диод течет прямой стационарный ток. Напряжение на барьерной емкости р-п-перехода  $C_{\text{бар}}$  равно  $U_{p-n}$ . Согласно второму закону коммутации, напряжение на конденсаторе в момент до коммутации равно напряжению во время коммутации и напряжению на конденсаторе в момент после коммутации, поэтому непосредственно после переключения ключа в положение «2» все внешнее напряжение будет падать на внешнем

сопротивлении  $R_{внеш}$ , включая сопротивления n- и p-областей. В таком случае в ветви с диодом будет протекать ток  $I_{обр}$  (рисунок 1.10), ограниченный только внешним сопротивлением:

$$I_{обр} = \frac{E_{обр} + U_{p-n}}{R_{внеш}}, \quad (1.11)$$

Направление тока  $I_{обр}$  такое, внешнее электрическое поле оттягивает основные носители заряда из в p- и n-областей перехода к омическим контактам диода, таким образом они попадают во внешнюю цепь, и начинается перезарядка барьерной емкости перехода. В результате данного переходного процесса увеличится область объемного заряда перехода, электрическое поле в нем и разность потенциалов на переходе. В конечном счете, все внешнее напряжение  $E_{обр}$  будет падать на расширившемся слое объемного заряда, после чего переход закроется и переходный процесс завершится. С точки зрения физики полупроводников, процесс перехода диода из открытого состояния в закрытое сводится к перезарядке барьерной емкости p-n-перехода.

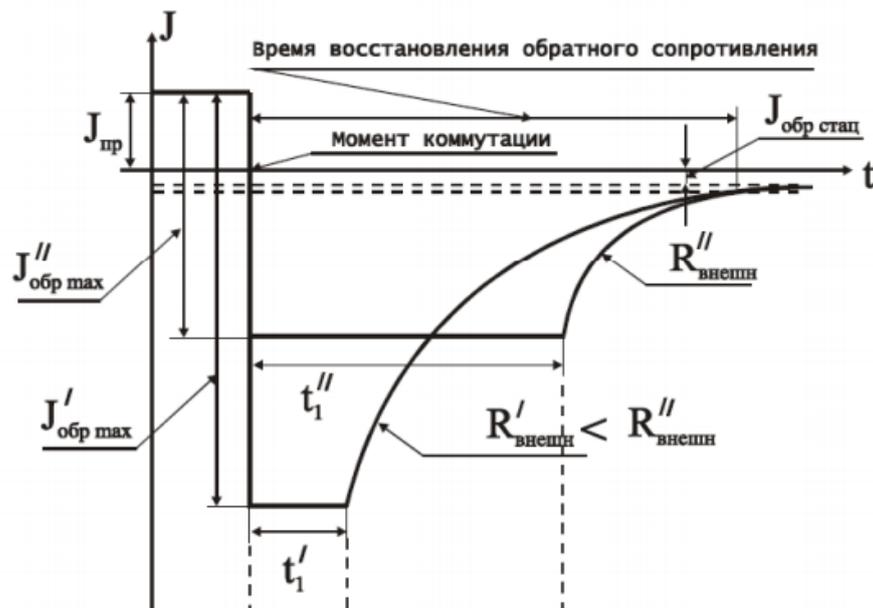
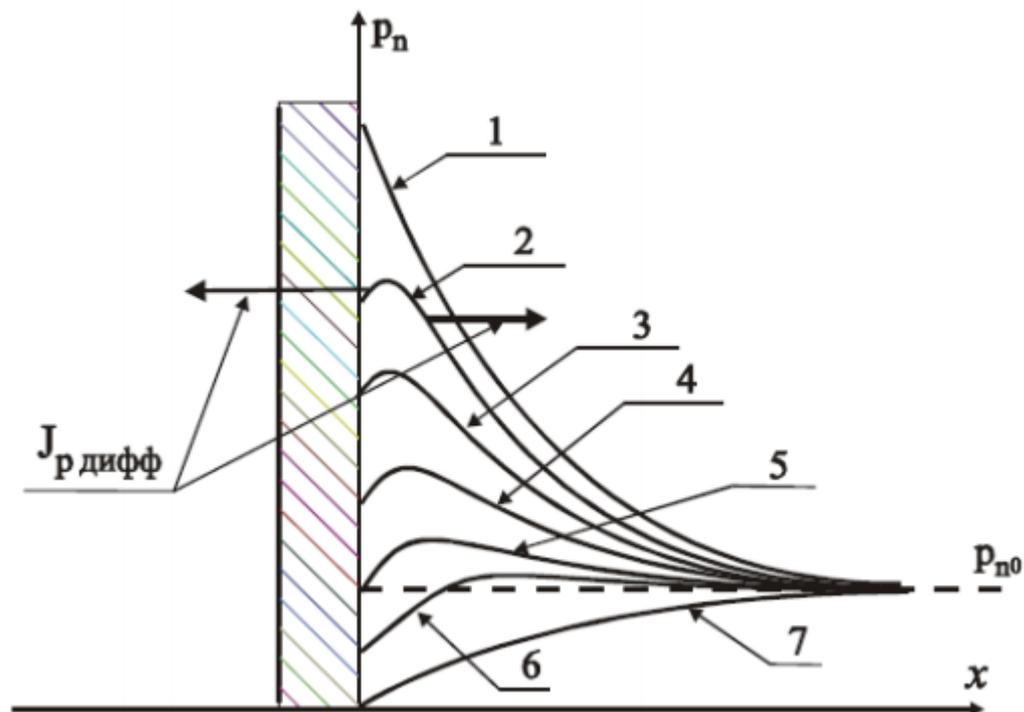


Рисунок 1.10 – Временная диаграмма переходного процесса переключения диода из проводящего состояния в запертое

Процесс перезарядки барьерной емкости р-п-перехода в случае с переключением состояний диода отличается от процесса перезарядки обычного конденсатора. На вышерассмотренный переходный процесс существенное влияние оказывают неосновные носители в п- и р-областях перехода в избыточных концентрациях. Данные носители заряда проходят через область объемного заряда, и замещают ушедшие основные носители, снижая скорость расширения объемного заряда.

В первый момент времени после переключения ключа в положение «2» напряжение на переходе остается таким же, как непосредственно до коммутации, следовательно, непосредственно после коммутации распределение по координате неосновных носителей заряда вблизи перехода остается прежним (рисунок 1.11). Поэтому диффузионные потоки данных носителей по величине и направлению одинаковы до и после переключения. Плюс ко всему, возникают направленные во внешнюю цепь через омические контакты дрейфовые потоки основных носителей в р- и п- областях перехода благодаря внешнему электрическому полю. Поэтому ток, как отрицательных, так и положительных носителей заряда по обе стороны от перехода в момент коммутации имеет разное направление и величину. Уход основных носителей из р- и п-областей за счет дрейфа во внешнюю цепь заряжает области зарядом, противоположным заряду основных носителей. Таким образом, процесс перезарядки барьерной емкости – это изменение потенциалов р- и п-областей вследствие изменения их зарядов, что приводит к увеличению потенциального барьера на р-п-переходе.



1 – при стационарном прямом включении; 2–7 – изменение во времени при смене включения на обратное

Рисунок 1.11 – Распределение по координате положительных носителей в донорной области р-п-перехода

При этом изменение соотношения диффузионных потоков неосновных и основных носителей заряда через р-п-переход является следствием незначительного увеличения барьера. К примеру, диффузионный поток электронов из п- в р-область станет меньше, а встречный диффузионный поток электронов останется неизменным, пока не изменится концентрация отрицательных носителей в р-области. Теперь поток электронов из п- в р-область становится меньше, чем поток электронов из р- в п-область на величину электронной составляющей обратного тока. Приоритетный переход электронов из р- в п-область препятствует нарастанию положительного заряда в п-области, то есть увеличивает время перезарядки барьерной емкости. Пока избыточные электроны в р-области на границе слоя объемного заряда будут

существовать, на переходе будет сохраняться отрицательное смещение. Длительность этой фазы определяется временем жизни неосновных носителей заряда. Чем дольше длительность интервала  $t_I$ , тем дольше через диод протекает ток  $I_{обр}$  и, соответственно, тем больше суммарный заряд переключения диода.

С увеличением удельного сопротивления диода в процессе радиационной деградации максимальный ток  $I_{обр}$  через диод уменьшается вследствие появления ловушек, которые уменьшают время жизни носителей заряда, что вызывает уменьшение величины заряда переключения.

Время жизни носителей заряда в диоде и его внутреннее сопротивление также зависят от температуры, поэтому необходимо учитывать ее влияние на величину заряда переключения для его последующей компенсации.

## 2 Экспериментальная часть

### 2.1 Постановка задач для проведения эксперимента на циклотроне U-120M

В настоящее время экспериментальное и теоретическое исследование параметров полупроводников в радиационных условиях является важной задачей не только для изучения эффектов, возникающих в результате радиационной деградации, но и для разработки методов количественного определения числа частиц, вступивших во взаимодействие с полупроводником. На сегодняшний день одним из перспективных направлений в этой области остается использование PIN-фотодиода. Исследование изменений параметров PIN-фотодиода при облучении его пучком нейтронов позволит получить необходимые данные для использования его в качестве датчика флюенса нейтронов. Таковыми параметрами являются заряд переключения и напряжение прямого включения.

Все элементы, кроме фотодиодов, резистора и резистивного датчика температуры будут вынесены из активной зоны для минимизации повреждений схем измерения. Для минимизации воздействия электрических наводок подключение будет производиться коаксиальными проводами.

В эксперименте использованы высокоточные измерительные приборы для отслеживания сигналов в реальном времени, чтобы исключить возможность неправильной работы разрабатываемых схем измерения.

Таким образом, данные, полученные в ходе эксперимента, позволят оценить влияние плотности потока нейтронов на изменение свойств фотодиода и произвести его калибровку датчика.

					<b>ФЮРА. 4 12126.018ПЗ</b>			
<i>Изм</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		<i>Опольский В.В.</i>			<i>Экспериментальная часть</i>	<i>Лит</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>		<i>Кушпиль В.В.</i>						
<i>Консул.</i>		<i>Кушпиль С.А.</i>						
<i>Н. конт.</i>		<i>Ефремов Е.В.</i>						
<i>Утв.</i>		<i>Горюнов А.Г.</i>						
						<i>ТПУ Группа</i>	<i>ФТИ 0712</i>	

## 2.2 Описание циклотрона U-120M

Изохронный циклотрон U-120M [16] – одна из основных экспериментальных установок в Институте Ядерной Физики академии наук Чешской Республики. Введен в эксплуатацию с 1977 года. Благодаря его параметрам, таким как широкий диапазон рабочих энергий и высокое качество пучка, он используется как для фундаментальных, так и для прикладных исследований, удовлетворяя требованиям и нуждам экспериментальных групп из ИЯФ АН ЧР, а так же чешских и словацких коммерческих компаний. Выходной пучок показан на рисунке 2.1.

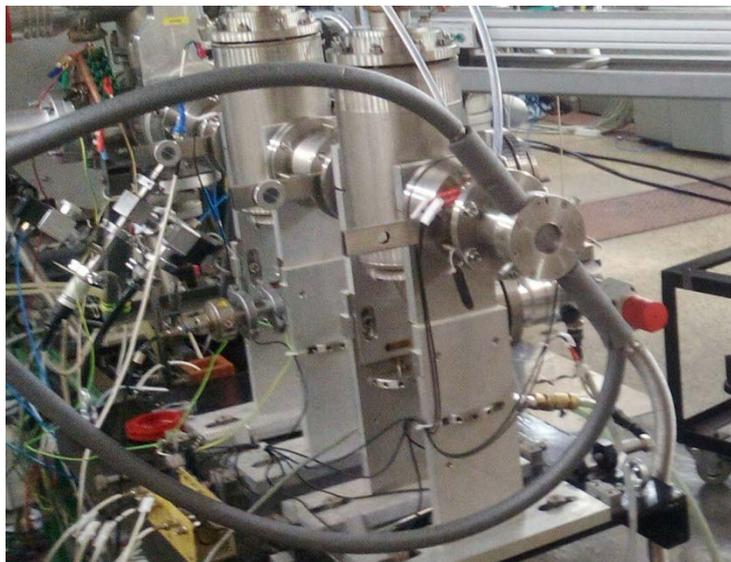


Рисунок 2.1 – Выходной пучок циклотрона U-120M

Циклотрон U-120M [16] может ускорять ионы в диапазоне отношения массы к заряду до  $A/q=(1\div 2.8)$ . Современный внутренний источник ионов подходит для ускорения положительных ионов гелия и дейтерия. Максимальная энергия протонов – 36 МэВ, и максимальная энергия  $40 q^2/A$  МэВ. Токи внутренних пучков могут достигать 100 мкА, а внешних – 5 мкА. Частица извлекаются из камеры циклотрона с помощью трехсекционной

электростатической системы отклонения к выходу пучка. Данная система переносит и распределяет извлеченные частицы к экспериментальным мишеням и камерам. Анализирующий магнит минимизирует рассеивание энергии пучка, что необходимо для физических экспериментов. На рисунке 2.2 показан схематический вид размещения изохронного циклотрона.

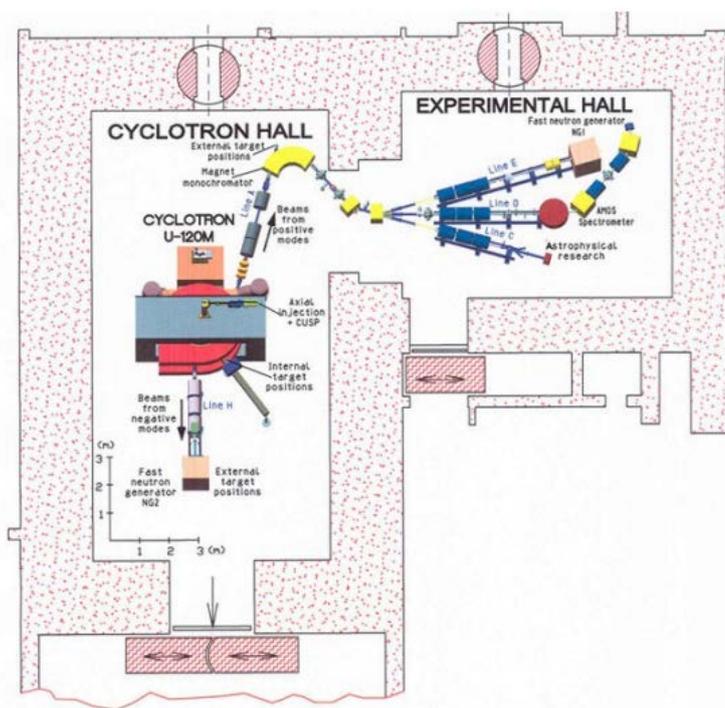


Рисунок 2.2 – Схематический вид размещения изохронного циклотрона

В настоящее время ускоритель был обновлен и дальнейшая модернизация проводится с целью расширить экспериментальные возможности для фундаментальных исследований.

### 2.3 Экспериментальная установка

Первый эксперимент был проведен в 21 сентября 2016 года. На этапе планирования была разработана экспериментальная установка. В качестве

источника нейтронов использовалась мишень из литиевой фольги. На оси пучка нейтронов на расстоянии 2 метра от мишени были установлены два исследуемых образца PIN-фотодиода BPW34, помещенные в металлический корпус для защиты от электромагнитного излучения. Данное расстояние было выбрано в связи с тем, что значения флюенса в данной точке были ранее экспериментально определены.

На рисунке 2.3 представлена экспериментальная установка. Контуром обведены элементы, помещенные в металлический корпус. Заряд переключения измерялся на диоде *VD1*. Для переключения полярностей напряжения использовался генератор НИОКИ 7075, выдающий на выход прямоугольные импульсы от -1 до 5 В. Осциллограф RTO 1024 измерял выходной сигнал с резистора на общей между резистором и диодом точке. В функции осциллографа входят расширенные возможности математических действий, в том числе и интегрирование заданного участка. Таким участком являлась положительная полуволна. На экране осциллографа можно отслеживать изменение интегрированного значения в реальном времени.

С диода *VD2* снималось напряжение прямого смещения с помощью измерительного прибора RM002, разработанного и изготовленного в ИЯФ АН ЧР. На рисунке 2.3 представлена упрощенная схема измерения: источник тока подает кратковременный сигнал в 10 мА, который регистрируется 24-битным АЦП.

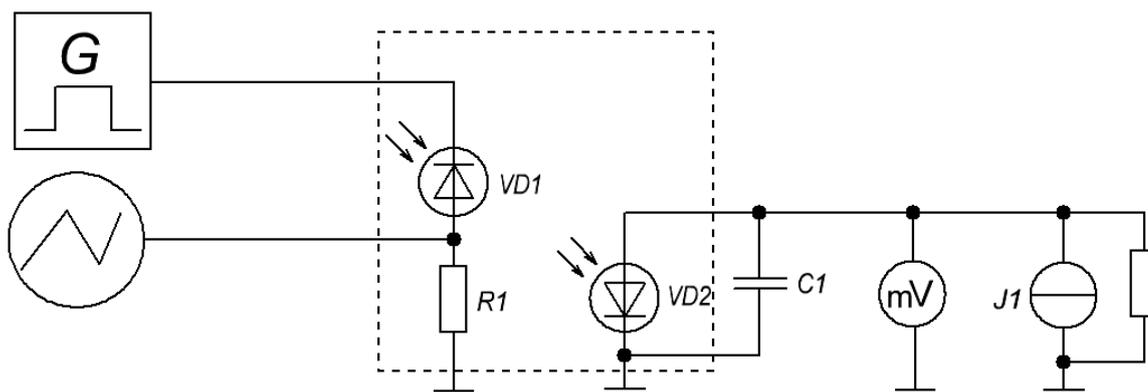


Рисунок 2.3 – Упрощенная схема экспериментальной установки

## 2.4 Монтаж и установка

На рисунке 2.4 представлена фотография экспериментальной установки. На расстоянии 2 метра от мишени был установлен металлический корпус с двумя диодами, резистором и конденсатором. Данное решение обосновано, так как металл незначительно изменяет свои свойства при воздействии потока нейтронов. Корпус установлен на вертикальной поверхности на той же высоте, что и пучок нейтронов. В корпус вмонтированы разъемы по обеим сторонам, к которым подключены коаксиальные провода, проведенные из активной зоны до лаборатории с измерительным оборудованием.



Рисунок 2.4 – Фотография экспериментальной установки

## 2.5 Проведение измерений

Все оборудование, необходимое для управления экспериментом на циклотроне и отслеживания необходимых параметров, было размещено в безопасном помещении с низким радиационным фоном (рисунок 2.5).



Рисунок 2.5 – Фотография лабораторного оборудования

Для измерений параметров исследуемых PIN-фотодиодов в режиме реального времени использовался цифровой осциллограф R&S RTM1052 и измерительный прибор RM20, подключенный к персональному компьютеру по интерфейсу RS-232 (рисунок 2.6). Для подачи импульсов на диод был использован генератор НИОКИ.

Данные об измеренном напряжении прямого смещения PIN-диода передавались на ЭВМ для обработки, записи в файл и графического отображения на мониторе. Снимок работающего окна программы представлен на рисунке 2.7. В верхней части показывается текущее напряжение прямого включения. Верхний график отображает напряжение за всё время измерений, а

нижний – температуру. Из основных функций программы можно выделить усреднение, циклическое измерение и запись в файл.

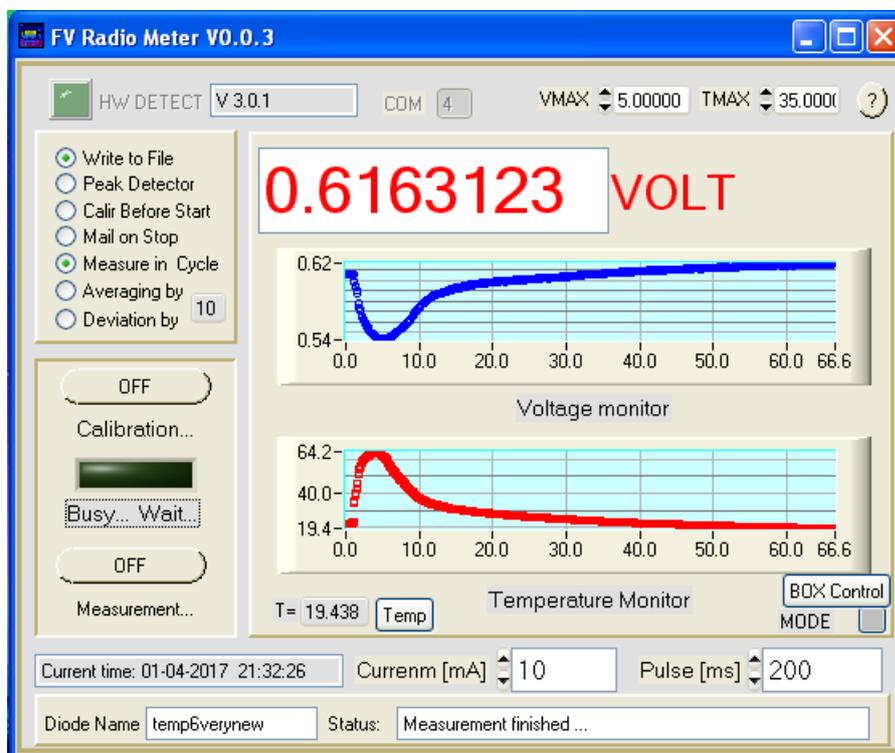


Рисунок 2.6 – Снимок окна программы FV Radio Meter

На рисунке 2.7 можно видеть снимок экрана осциллографа. В верхней части отслеживается временная диаграмма напряжения, снимаемого с фотодиода. Окном выделена интегрируемая часть.

В нижней части можно наблюдать изменение величины, пропорциональной заряду переключения диода. Снимок был сделан при работающем источнике нейтронов, таким образом можно видеть уменьшение значения заряда переключения.

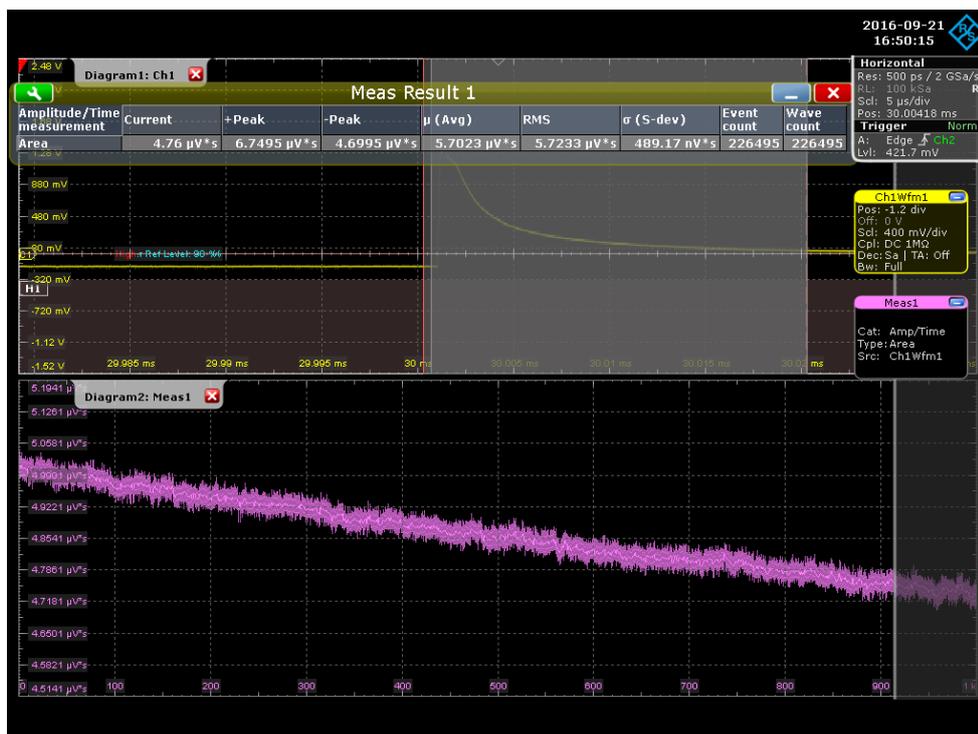


Рисунок 2.7 – Снимок экрана осциллографа

Таким образом, во время проведения эксперимента на циклотроне были получены экспериментальные данные о зависимости напряжения прямого смещения и заряда переключения PIN-фотодиода BPW34.

## 2.6 Обработка результатов эксперимента

Данные, полученные с осциллографа, обработаны в пакете MatLab. График представлен на рисунке 2.8. Зеленым цветом выделен ток протонов, синим – данные, сохраненные непосредственно осциллографом, красным – восстановленные по снимкам экрана данные. Легко видеть, что при ненулевом токе протонов заряд переключения понижается.

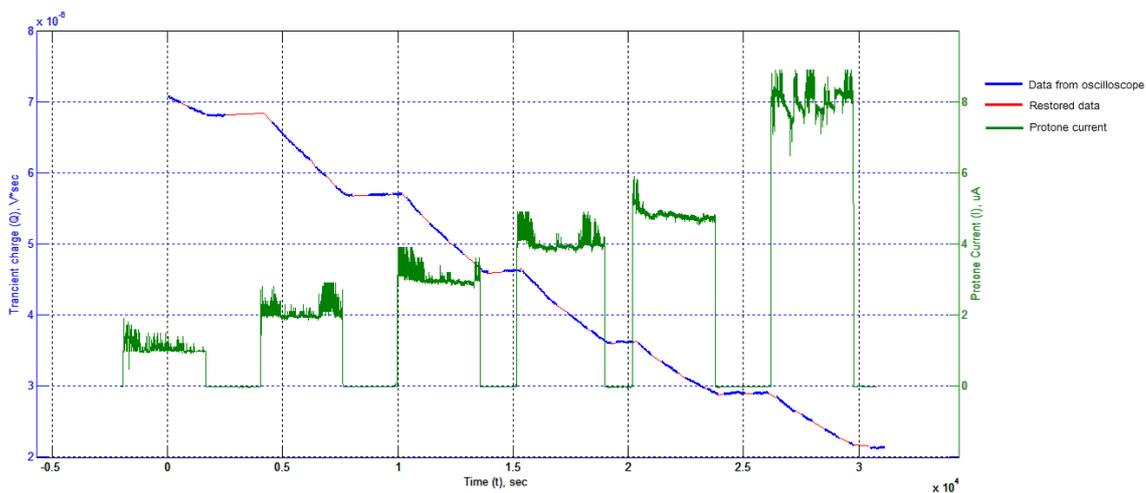


Рисунок 2.8 – График зависимости заряда переключения диода и тока протонов от времени.

С помощью линейной аппроксимации каждого наклонного участка, был получен коэффициент наклона, зависящий от тока протонов (Таблица 2.1). Так как скорость изменения заряда переключения снижается с уменьшением самого заряда, в таблице нельзя увидеть корреляцию коэффициента наклона и тока протонов.

Таблица 2.1 – Зависимость коэффициента наклона от тока протонов

Ток протонов, мкА	Коэффициент наклона, $V \cdot 10^{-11}$
1	-15,12
2	-34,27
3	-29,29
4	-32,86
5	-16,82
8	-27,38

## 2.7 Повторный эксперимент на циклотроне

Главными задачами повторного эксперимента от 23 ноября 2016 года были: определение самоотжига PIN-фотодиода, проверка постоянства температуры в активной зоне и повторное измерение зависимостей параметров фотодиода от тока протонов. Единственное изменение в конструкции экспериментальной установки – подключение платинового терморезистора для измерения температуры. Данное нововведение позволило определить, что в ходе эксперимента температурный диапазон был менее 5 градусов Цельсия, поэтому температурная коррекция не производилась. Результаты измерений представлены на рисунках 2.9 и 2.10.

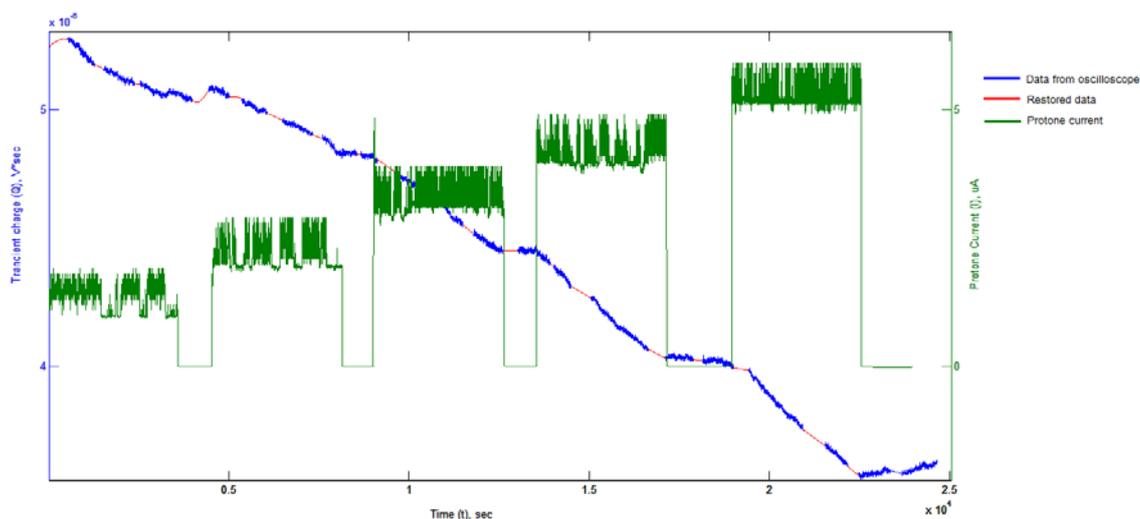


Рисунок 2.9 – Зависимость заряда переключения от тока протонов

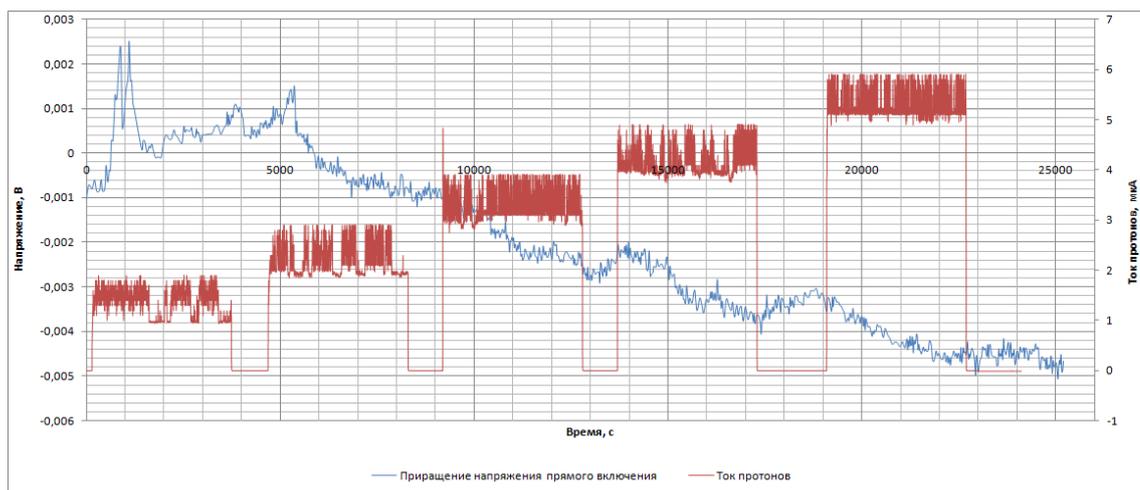


Рисунок 2.10 – Зависимость приращения напряжения прямого включения от тока протонов

В эксперименте присутствовали те же самые диоды и использованы те же самые настройки, что и в первом эксперименте. Изменение заряда переключения за 68 дней составило от  $2,14 \cdot 10^{-6}$  до  $5,28 \cdot 10^{-6}$ . Как и в первом эксперименте, была получена зависимость коэффициента наклона от тока протонов (таблица 2.2). Из таблицы можно видеть, что со временем наклон уменьшается, что свидетельствует о нелинейности зависимости заряда переключения от флюенса нейтронов. Данный эффект можно объяснить независимостью таких процессов, как самоотжиг полупроводника и деградация кристаллической решетки. Во время облучения полупроводника нейтронами возрастает количество дефектов, но в то же время, благодаря самоотжигу, происходит их восстановление.

К тому же, на рисунке 2.11 приведена зависимость времени жизни носителей заряда от суммарного потока нейтронов. Можно видеть, что данная зависимость нелинейна.

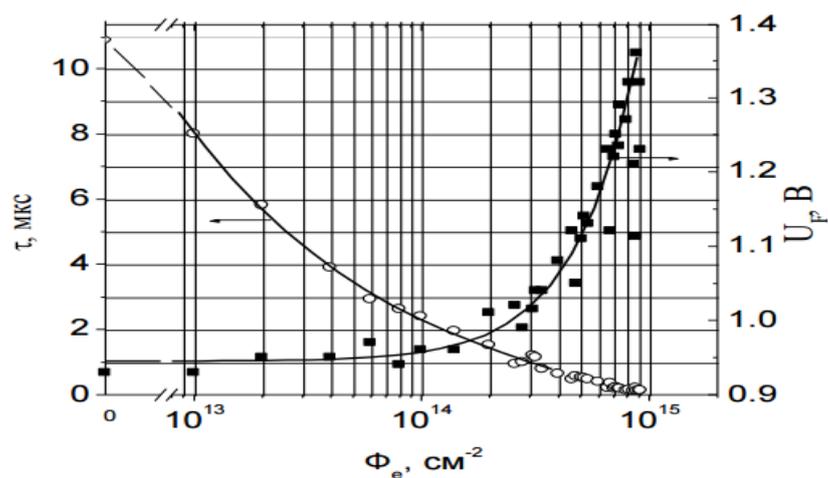


Рисунок 2.12 - Зависимость времени жизни носителей заряда от флюенса нейтронов

Таблица 2.2 – Зависимость коэффициента наклона от тока протонов

Ток протонов, мкА	Коэффициент наклона, $B \cdot 10^{-11}$
1	-7,2442
2	-6,601
3	-9,302
4	-11,714
5	-13,047

Так флюенс нейтронов был заранее известен, можно вывести зависимость заряда переключения от флюенса нейтронов (таблица 2.3) и построить калибровочную кривую (рисунок 2.12).

Таблица 2.3 – зависимость заряда переключения от флюенса нейтронов

Эксперимент от	Заряд переключения, $V \cdot c \cdot 10^{-6}$	Флюенс нейтронов, $10^{10} \cdot n/cm^2$
21.09.2016	7,24	0
	6,81	0,506
	5,69	1,52
	4,62	3,03
	3,59	5,05
	2,88	7,57
	Эксперимент от 23.11.2016	5,27
5,03		0,506
4,83		1,52
4,45		3,03
4,03		5,05
3,56		7,57

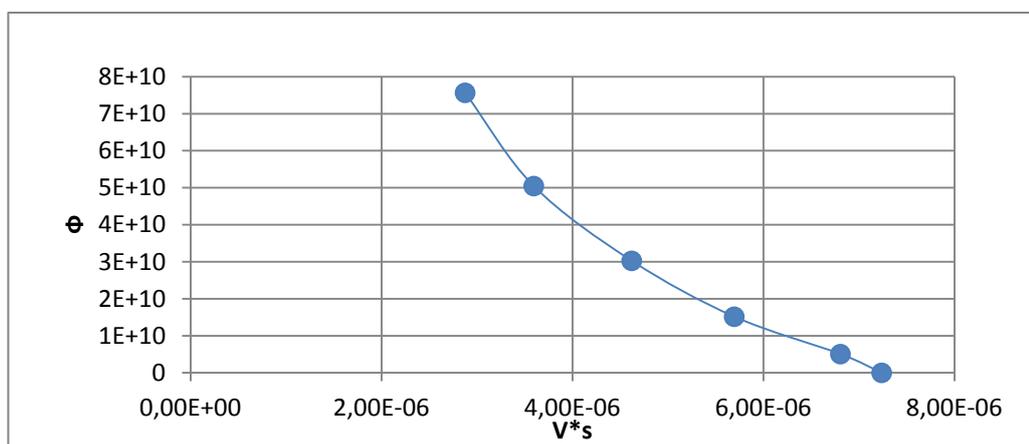


Рисунок 2.12 – Калибровочная кривая

Следует отметить, что кривая построена исключительно по результатам первого эксперимента, так как во втором использовался тот же самый диод, поэтому такие эффекты, как самоотжиг значительно повлияли на его свойства. Данный метод измерения флюенса требует дальнейшего изучения.

## **2.8 Измерение температурных зависимостей**

Параметры полупроводниковых приборов зависят от множества факторов, в том числе от температуры. Для исследования значимости влияния температуры необходимо измерить параметры PIN-фотодиода при изменяющейся температуре. Для этого необходимо поместить чувствительный элемент в контейнер для термоизоляции от окружающей среды, нагреть воздух до определенной температуры и измерять заряд переключения и напряжение прямого смещения по мере охлаждения воздуха. Таким образом, все элементы установки будут равномерно остывать, и разница температуры терморезистора и PIN-фотодиода будет минимальной. Для получения более широкого диапазона температур было принято решение использовать лед. В ходе эксперимента будут использованы как облученные фотодиоды, так и диоды, неподверженные радиационным воздействиям.

## **2.9 Описание экспериментальной установки**

В пенопластовый закрытый контейнер был помещен металлический корпус, использовавшийся ранее в экспериментах на циклотроне. В данный корпус был вмонтирован датчик температуры, подключенный к радиометру RM002. Сверху были поставлены высокоомощные резисторы, служащие нагревательными элементами. В качестве источника напряжения был использован лабораторный источник питания. Подключение к измерительным

приборам было произведено так же, как в ходе экспериментов на циклотроне. Контейнер не был герметично запечатан, что способствовало более быстрому изменению температуры.

При приближении температуры внутри контейнера к установившемуся значению в контейнер был помещен лед, что способствовало охлаждению элементов до 4 °С.

Результатов эксперимента показывают нелинейность на участке от 4 °С до 30 °С в обоих случаях. Исходя из предположения, что лед охлаждает элементы достаточно быстро, вследствие чего возникает неравномерность охлаждения датчика температуры и PIN-диода, было принято решение повторно провести эксперимент, увеличив расстояние между льдом и металлическим корпусом.

## **2.10 Обработка результатов эксперимента**

Так как измерение проводилось с помощью независимых друг от друга осциллографа и ЭВМ, было необходимо синхронизировать время. Далее, с помощью скрипта на языке Python была произведена обработка данных с радиометра. Результаты экспериментов совмещены вручную и построены зависимости заряда переключения и напряжения прямого смещения от температуры. Графики приведены на рисунках 2.11 и 2.12.

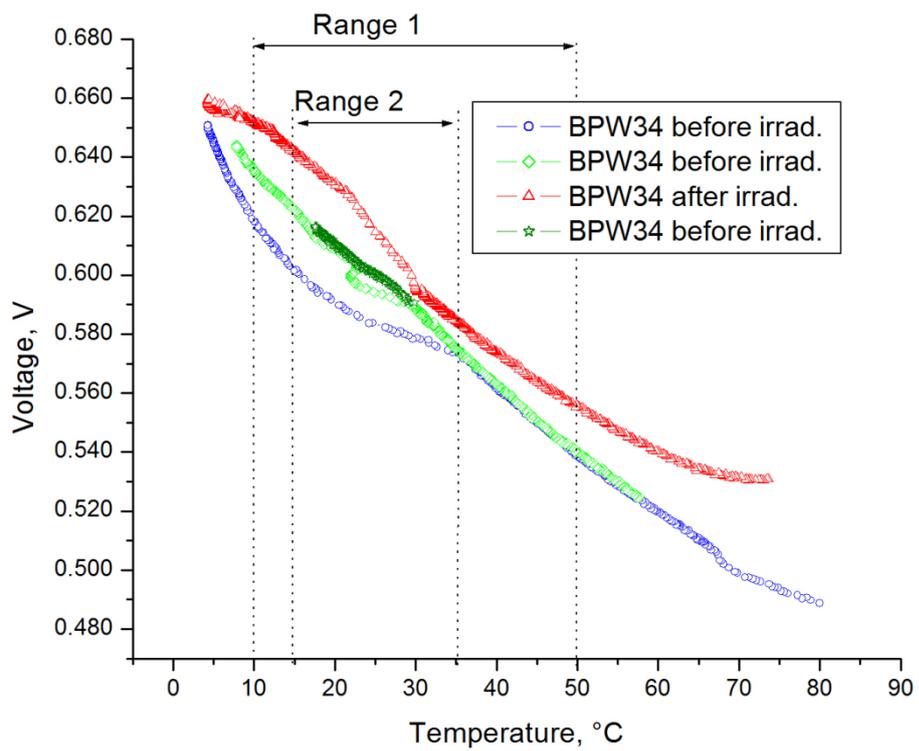


Рисунок 2.11 – Зависимость напряжения прямого смещения от температуры

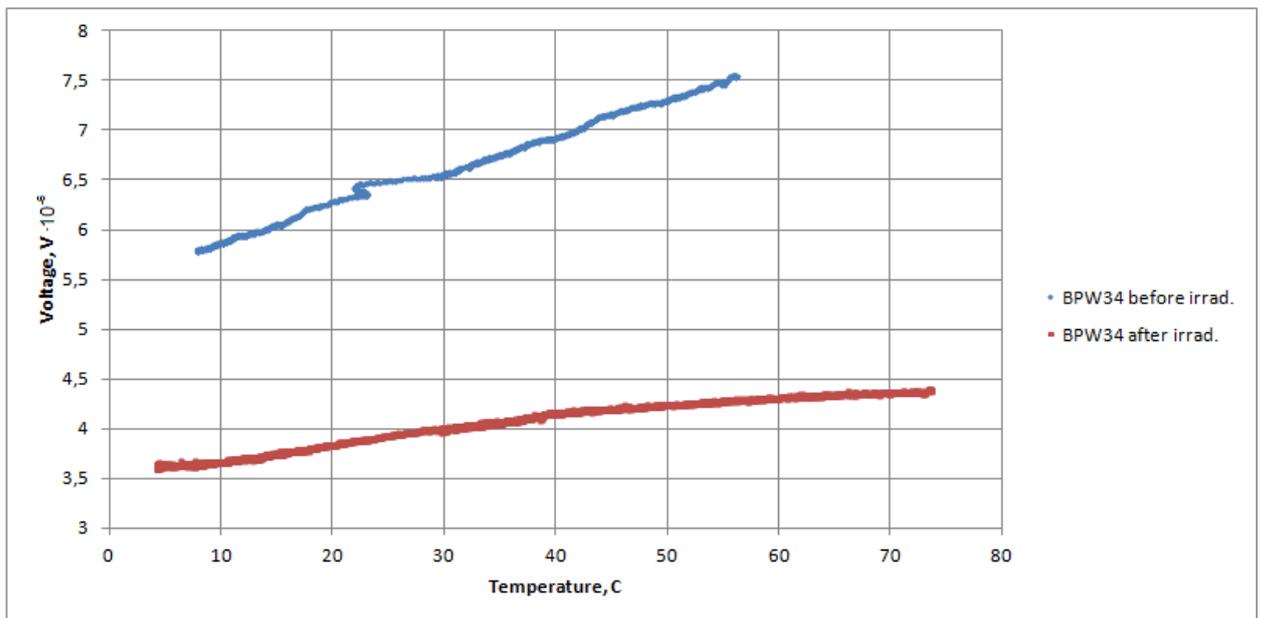


Рисунок 2.12 – Зависимость заряда переключения от температуры

На рисунке 2.11 можно видеть три зависимости напряжения от температуры. Окружностями обозначен график первого эксперимента, в результате которого была получена нелинейность. При температуре 45 °С в контейнер был помещен лед, что привело к быстрому и неравномерному охлаждению чувствительных элементов. При повторном эксперименте (график обозначен ромбами) лед был помещен на более короткий промежуток времени и находился в непосредственном контакте с корпусом. График подтверждает, что нелинейность вызвана именно этим фактором. В третьем эксперименте лед был положен на большом расстоянии от корпуса и, можно видеть, что в таком случае нелинейность отсутствует.

Таким образом, можно аппроксимировать нелинейные участки прямыми во всех случаях. Следует отметить, что рабочий диапазон детектора не выходит за пределы от 15 °С до 35 °С, поэтому аппроксимация и последующая температурная коррекция будет проводиться именно на этих участках. В таблице 2.3 представлены коэффициенты температурной коррекции.

Таблица 2.3 – коэффициенты температурной коррекции

	$\frac{\Delta V_f}{\Delta T^\circ}$ , В·с·10 <sup>-6</sup> /°С	$\frac{\Delta Q_t}{\Delta T^\circ}$ , В/°С
До облучения	0,0313	0,00243
После облучения	0,0159	0,00225

### 3 Разработка функциональной схемы устройства

#### 3.1 Разработка схемы электрической функциональной

Согласно заданию, требуется разработать 8-канальную систему измерения флюенса нейтронов. В качестве чувствительного элемента использован PIN-диод. Для измерения нейтронного флюенса будут использованы два метода:

- Измерение заряда переключения для диапазона ( $10^5 \div 10^{11}$ ) н/см<sup>2</sup>
- Измерение напряжения прямого включения для диапазона от  $10^{11}$  н/см<sup>2</sup>

Первый метод требует наличие интегрирующей части, выполненной на операционных усилителях. В качестве источника отрицательного питания используется преобразователь на интегральной схеме. Для измерения прямого напряжения потребуется источник тока, питаемый напряжением 40 В. Переключение режимов осуществляет механическое реле. Для обеспечения программной коррекции температуры будет использован терморезистор, к которому необходимо подключить маломощный источник тока. Таким образом, потребуется 3 канала АЦП.

В качестве управляющего блока будет использована отладочная плата с PSoC-контроллером. Количество выводов у данной платы достаточно для измерения параметров 4 PIN-диодов. Таким образом, на 8-канальную систему приходится два управляющих блока. Далее, собранные данные передаются по интерфейсу RS232 на ЭВМ.

Функциональная и структурная схемы устройства приведены в приложениях А и Б соответственно.

					<b>ФЮРА. 4 12126.018ПЗ</b>			
<i>Изм</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		<i>Опольский В.В.</i>			<i>Разработка функциональной схемы устройства</i>	<i>Лит</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>		<i>Кушпиль В.В.</i>						
<i>Консул.</i>		<i>Кушпиль С.А.</i>						
<i>Н. конт.</i>		<i>Ефремов Е.В.</i>						
<i>Утв.</i>		<i>Горюнов А.Г.</i>						
						<b>ТПУ</b>	<b>ФТИ</b>	
						<b>Группа</b>	<b>0712</b>	

## **3.2 Выбор элементной базы**

### **3.2.1 Выбор управляющего блока**

В качестве управляющего элемента будет использована программируемая система на кристалле PSoC 5LP с ядром ARM Cortex-M3 фирмы Cypress [17]. Главными критериями выбора являлись необходимые функциональные возможности, стоимость и максимально эффективное использования. Ниже указаны основные характеристики и функции системы PSoC 5LP:

- наличие аналоговых программируемых блоков;
- программируемый источник тока;
- энергонезависимая память программ и данных;
- четыре 16-разрядных таймера/счетчика с отдельным предварительным делителем, режимом сравнения, ШИМ выходом;
- программируемый последовательный UART;
- последовательный интерфейс SPI;
- внутренние и внешние источники прерываний;
- 38 программируемых линий ввода/вывода;
- встроенные 16-разрядные дельта-сигма АЦП;
- рабочий диапазон напряжения питания 4,5–5,5 В;
- рабочая частота до 80 МГц.

### **3.2.2 Выбор датчика температуры**

Так как PSoC имеет встроенный источник тока, было принято решение использовать в качестве датчика температуры платиновый терморезистор PT100. Главным критерием выбора является отсутствие интегральных

компонентов внутри датчика, что повышает его радиационную стойкость.

Основные характеристики датчика:

- высокая радиационная стойкость;
- линейность в рабочем диапазоне 10-40 °С
- высокая точность измерений

### 3.2.3 Выбор операционного усилителя

Основным элементом в схеме интегрирования является операционный усилитель. Чтобы обеспечить высокую точность, потребуется ОУ с малым искажением, шумом и широкой полосой рабочих частот. Производитель Maxim Integrated заявляет, что микросхема MAX4477 подходит по заданным параметрам. АЧХ и ФЧХ данного операционного усилителя приведены на рисунке 3.1. Так как импульсы на PIN-диод будут подаваться с частотой не более 100 Гц, MAX4477 подходит для схемы интегрирования.

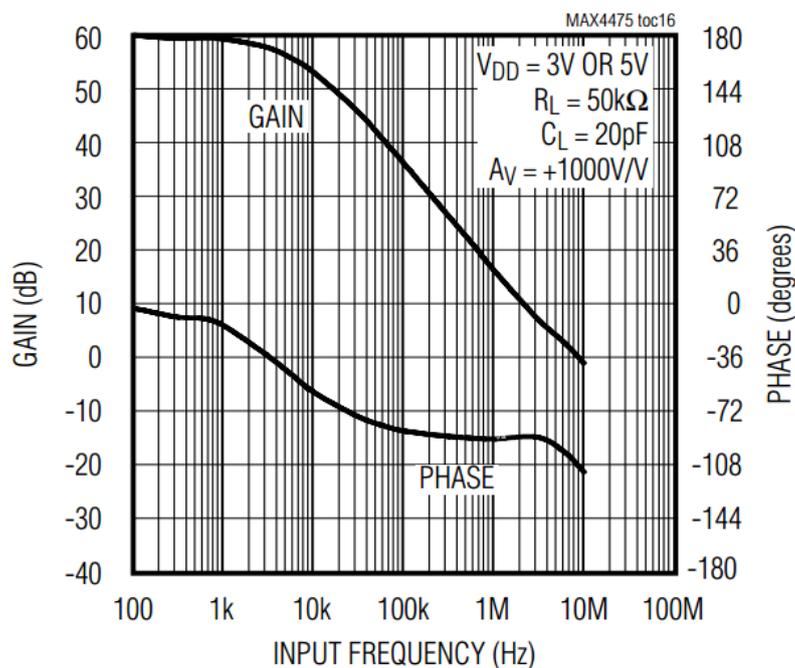


Рисунок 3.1 – АЧХ и ФЧХ MAX4477

### 3.2.4 Выбор PIN-диода

В разделе 1 было описан PIN-диод ВРW34. В настоящее время существует множество исследований данной модели фотодиода, что подтверждает его пригодность для измерения флюенса, соответственно известно множество его характеристик, том числе радиационных. Также, в разделе 2 произведены дополнительные измерения параметров, что позволит произвести более точную калибровку. Более того, эти приборы коммерчески доступны в больших количествах при относительно низкой стоимости, что делает возможность их использования в качестве чувствительного элемента приемлемой перспективой.

Фотодиоды ВРW34 выпускаются несколькими производителями и применяются в основном, как фотопрерыватели и пульты дистанционного управления. Список типичных электрических и оптических характеристик для данного устройства можно найти в [13]. В соответствии с электронной номенклатурой, марка ВРW34 означает следующее: В - это материал, используемый для активной области прибора (кремний), Р – чувствительный к радиации, а W34 - серийный номер. На рисунке 3.2 показаны геометрические характеристики ВРW34. Как видно на рисунке, его чувствительная область составляет 3 мм.

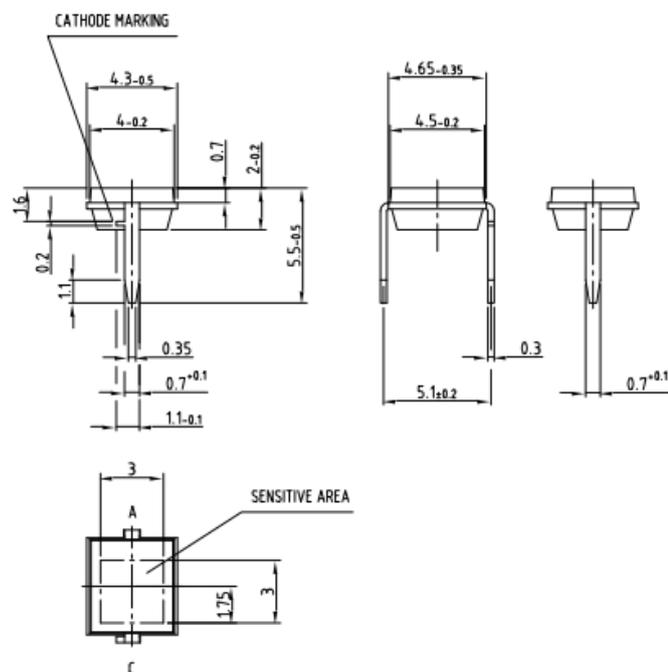


Рисунок 3.2 - Геометрические характеристики VPW34

### 3.2.5 Выбор преобразователя отрицательного напряжения

В качестве преобразователя отрицательного напряжения будет использована микросхема МАХ4660. Принцип работы данного устройства основан на удвоителе напряжения.

Основными преимуществами МАХ4660 являются:

- эффективность питания – 98%
- минимум внешних компонентов
- напряжение питания – до 10 В

Источник отрицательного напряжения будет собран по стандартной схеме, указанной в документации (рисунок 3.3)

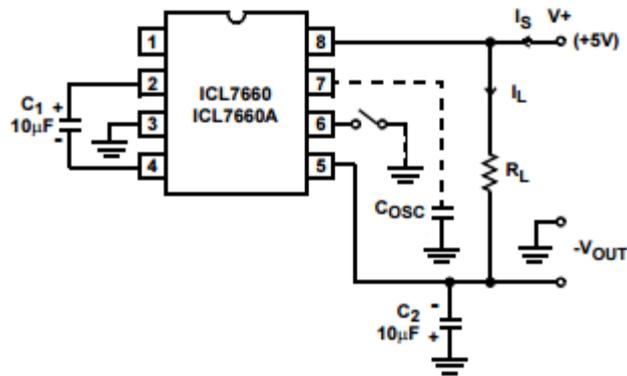


Рисунок 3.3 Схема источника отрицательного напряжения

### 3.3 Разработка схемы электрической принципиальной

Большая часть устройства выполнена на готовых интегральных схемах, не нуждающихся в подстройке, так как рекомендации даны непосредственно в документах.

Устройство будет состоять из управляющей платы с системой PSoC, разъемами, цифровыми ИС с малой интеграцией для уменьшения загрузки контроллера и преобразователей напряжения. К данному устройству будут подключены 4 модуля считывания, включающие в себя АЦП, преобразователи сигналов, источник тока, механическое реле и схему интегрирования.

#### 3.3.1 Разработка схемы измерения заряда переключения

На рисунке 3.5 представлена схема измерения заряда переключения PIN-диода. Сигнал с резистора R5, включенного параллельно диоду VD1, пропорционален току через диод и является характеристикой заряда переключения. Так как данный имеет малую длительность, измерить его характеристики – достаточно проблематичная задача. Для упрощения измерений в схему добавлена интегрирующая часть на операционном

усилителе DA2.1. В качестве схемы интегрирования был использован Deboo integrator, преимуществом которого является однополярное питание. Для корректной работы интегратора производитель рекомендует использовать цифровой электрически управляемый ключ, выполненный на интегральной микросхеме MAX4624 (рисунок 3.4).

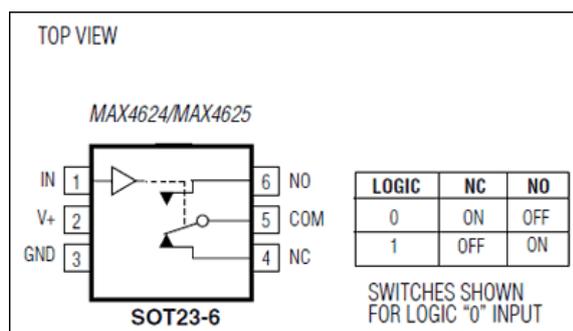


Рисунок 3.4 - Электрически управляемый ключ MAX4624/MAX4625

Схема выполнена на четырех операционных усилителях, первый из которых является преобразователем цифрового сигнала (0÷5 В) в сигнал, переключающий диод из прямого включения в обратное (-1÷5 В). Данные импульсы поступают на PIN-диод, сигнал снимается с общей между диодом и резистором точки. Далее, для согласования нагрузок используется повторитель. Сигнал с интегратора подается на дифференциальный усилитель для согласования с АЦП. Расчет первого каскада выполнен по стандартной формуле для дифференциального усилителя:

$$U_a = U_{\text{ВХ}} \left( \frac{(R_1 + R_2)R_4}{(R_4 + R_3)R_2} \right) - U_{+5B} \left( \frac{R_1}{R_2} \right), \quad (3.1)$$

где  $U_a$  – выходное напряжение с первого каскада,  $U_{+5B}$  – напряжение питания.

Полученные номиналы, с учетом ряда E24:

$$R1 = 20 \text{ кОм}$$

$$R2 = 16 \text{ кОм}$$

$$R3 = 24 \text{ кОм}$$

$$R4 = 20 \text{ кОм}$$

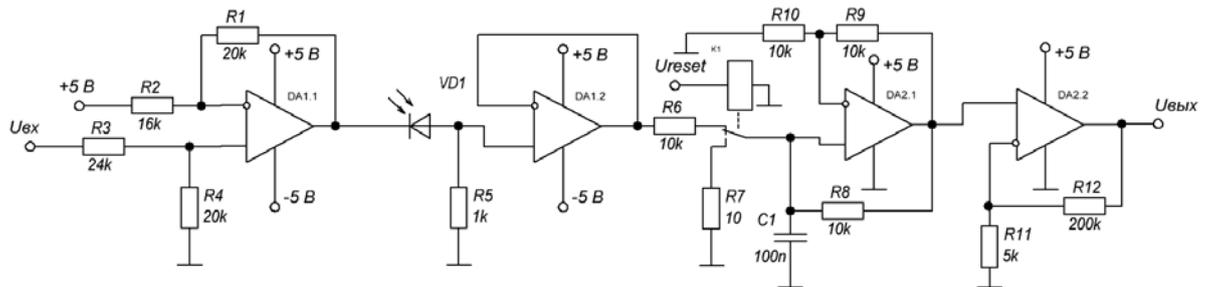


Рисунок 3.5 - Схема измерения заряда переключения

Номиналы резисторов в интеграторе оставлены такими же, как в руководстве Maxim Integrated. Дальнейшее преобразование сигнала выполняет неинвертирующий усилитель на операционном усилителе DA2.2. Номиналы подобраны в ходе моделирования схемы в программном пакете LTSpice.

### 3.3.2 Моделирование схемы измерения заряда переключения

Разработанная схема была промоделирована в программном пакете LTSpice. В качестве модели PIN-диода была использована схема замещения параллельно соединенного резистора и диода с параметрами, соответствующими технической документации BPW34. В качестве электронного ключа были использованы электрически-управляемые ключи с параметрами, соответствующими технической документации MAX4624.

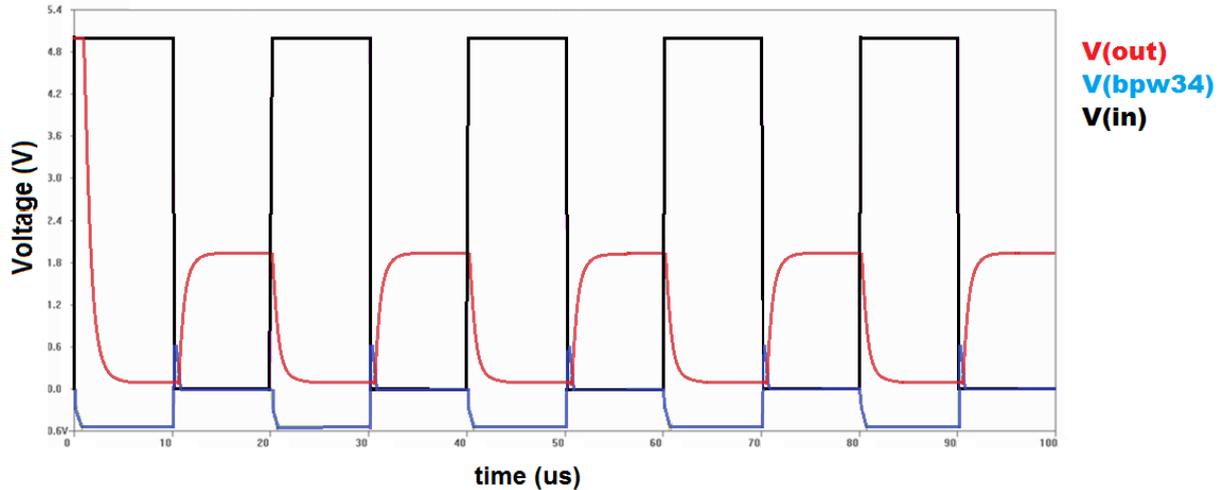


Рисунок 3.6 - Результат моделирования схемы

На рисунке 3.6 изображены входное напряжение, напряжение, снимаемое с резистора, последовательно включенного фотодиоду и входной сигнал. Из данной диаграммы можно сделать вывод, что схема работает корректно. Так же стоит отметить, что интегрирующий каскад выбран верно, так как интегрируется только положительная полуволна сигнала.

Следующим шагом была замена идеальных операционных усилителей на модели реальных, MAX4477, и сравнение результатов моделирования.

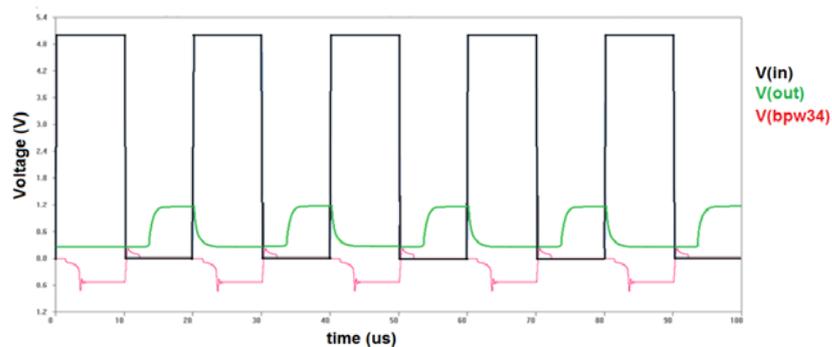


Рисунок 3.7 - Результаты моделирования схемы с реальным операционным усилителем

И рисунка 3.7 видно, что параметры схемы ухудшились: появились колебания и запаздывание, увеличилась инерционность. Следует провести дополнительное моделирование интегрирующего каскада на реальном операционном усилителе, чтобы подтвердить, что конечные значения выходного напряжения линейны при линейном изменении длины импульса. Для этого на языке Python был написан скрипт, генерирующий входной прямоугольный сигнал, далее воспроизведенный в LTSpice.

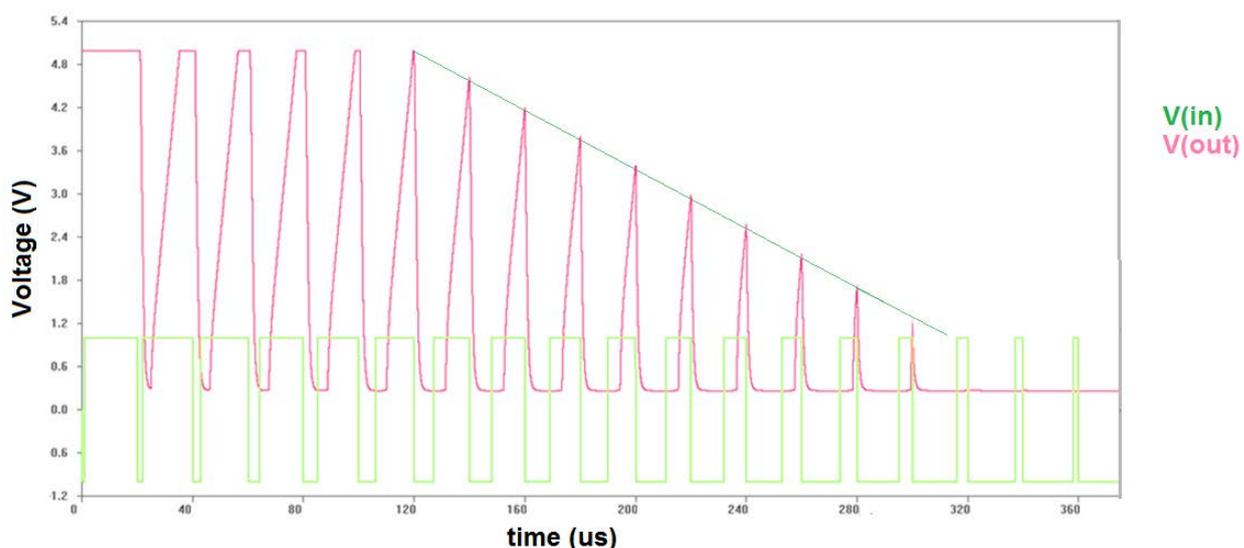


Рисунок 3.8 - сигнал с интегратора при различной длине импульсов.

При подаче широких импульсов выходной сигнал увеличивается до напряжения уходит в насыщения. Далее можно видеть линейное изменение сигнала. Когда длина сигнала становится меньше, чем запаздывание выходного напряжения, на выходе сигнала не наблюдается. (рисунок 3.8). На рисунке 3.9 представлена зависимость выходного напряжения от длины импульса.

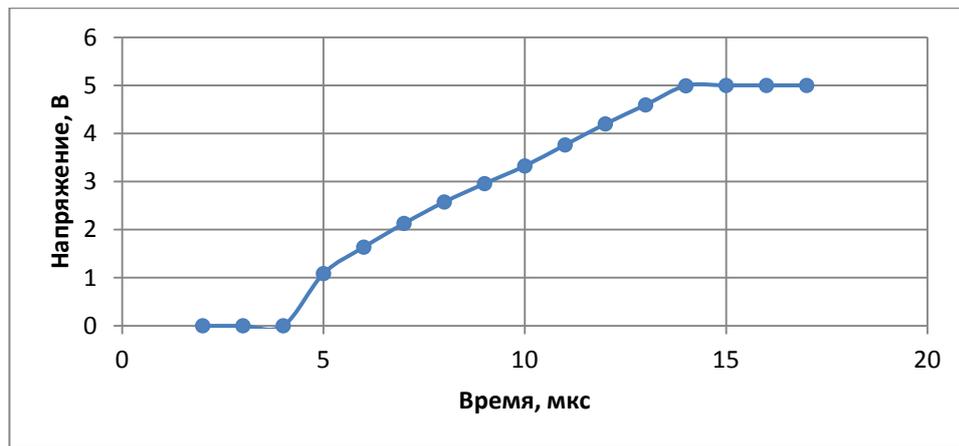


Рисунок 3.9 - Зависимость выходного напряжения от длины импульса

Исходя из результатов моделирования, можно сделать вывод, что данная схема на операционных усилителях MAX4477 подходит для поставленных задач.

### 3.4 Тестирование канала измерения заряда переключения на прототипе

Тест схемы интегрирования был проведен с помощью прототипа, выполненного на макетной плате (рисунок 3.10). Снимки экрана осциллографа (рисунок 3.11) показывают, что формы сигналов прототипа и модели совпадают.

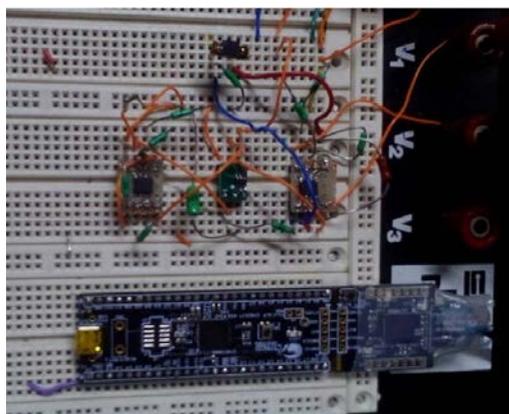
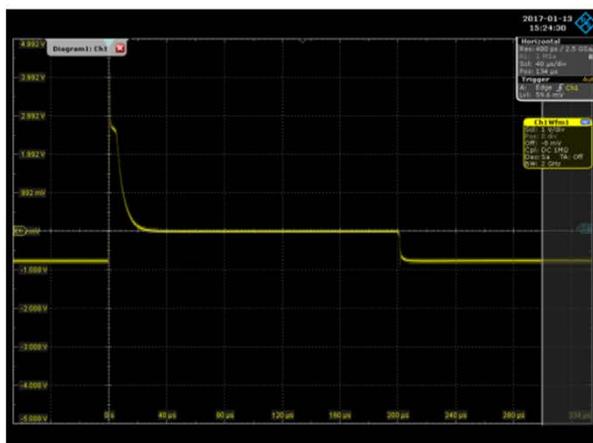
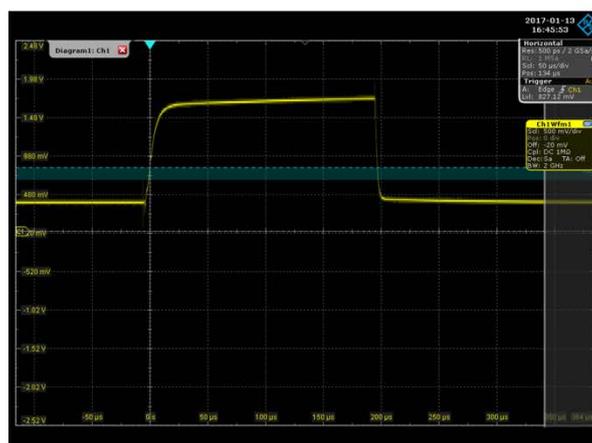


Рис 3.10 – Внешний вид прототипа



а)



б)

Рисунок 3.11 – снимки экранов осциллографа  
а – сигнал с BPW34; б – выходной сигнал прототипа

### 3.4.1 Разработка программного обеспечения для PSoC5

Управляющим элементом аналоговой части является отладочная плата CY8CKIT-059. Задачами данного элемента являются:

- подача управляющих сигналов
- считывание аналоговых значений с выхода интегрирующей части и терморезистора
- усреднение и перевод считанных значений в физические величины
- передача данных по последовательному интерфейсу на ЭВМ

На рисунке 3.12 представлена структура PSoC-дизайна. ШИМ-контроллер PWM\_1 генерирует импульсы на вход аналоговой части и синхроимпульсы для АЦП. Мультиплексор AMuxHw\_1 поочередно подключает к АЦП либо выход аналоговой части, либо выход датчика температуры. Делитель частоты с коэффициентом 2 управляет мультиплексором, а так же подает сигналы на статус-регистр, который хранит текущий режим измерения. При переключении логического уровня с низкого

на высокий на входе «soc» блока ADC\_DelSig\_1 АЦП начинает преобразование сигнала. По окончании преобразования выход «eoc» подает сигнал на блок прерывания isr\_trans. Так же в схеме использован источник тока 1 мА для управления терморезистором и блок UART\_1 связи с ЭВМ.

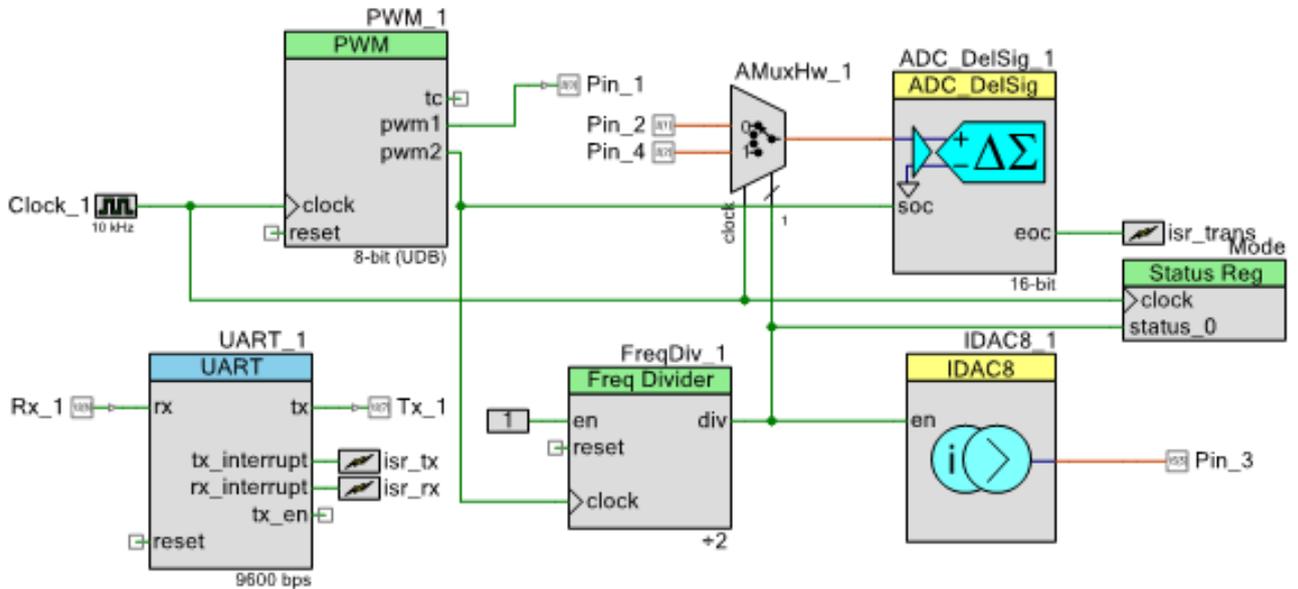


Рис. 3.12 – структура PSoC-дизайна

Основная часть алгоритма реализована в обработчике прерываний isr\_trans. Для преобразования сигнала с термодатчика в градусы Цельсия использована зависимость сопротивления от температуры для PT100. Блок-схема алгоритма приведена в приложении В. Код обработчика прерываний приведен в приложении Г.

Таким образом, разработана и протестирована основная часть системы считывания данных. Увеличения числа каналов измерения достигается путем увеличения числа входов мультиплексора и разрядности статус-регистра. В таком случае алгоритм не будет существенно изменен.

## 4. Социальная ответственность

### 4.1 Введение

Охрана труда — это система сохранения жизни и здоровья работников в процессе трудовой деятельности, включающая в себя правовые, социально-экономические, организационно-технические, санитарно-гигиенические, лечебно-профилактические, реабилитационные и иные мероприятия (статья № 1 Федерального закона «Об основах охраны труда в Российской Федерации», 17.07.1999 г. №181-ФЗ), образующие механизм реализации конституционного права граждан на труд (ст. 37 Конституции РФ) в условиях, отвечающих требованиям безопасности и гигиены. Это право закреплено также в ст. 7 международного пакта об экономических, социальных и культурных правах.

Конституция Российской Федерации 37 статьёй гарантирует свободу труда, а также право на труд в условиях, отвечающих требованиям безопасности и гигиены. Из пункта 5 указанной статьи следует, что «каждый имеет право на отдых». Таким образом, понятие охраны труда своим первоисточником имеет Конституцию Российской Федерации.

Федеральным органом исполнительной власти, осуществляющим функции по контролю и надзору в сфере труда, является Федеральная служба по труду и занятости Министерства здравоохранения и социального развития Правительства Российской Федерации. Федеральная служба по труду и занятости руководствуется в своей деятельности Конституцией РФ, федеральными конституционными законами, ФЗ, указами Президента РФ и актами Правительства РФ, международными договорами РФ, нормативными правовыми актами Министерства здравоохранения и социального развития РФ, а также Трудовым кодексом РФ.

Основными задачами трудового законодательства являются создание

					<b>ФЮРА. 4 12126.018ПЗ</b>		
<i>Изм</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>			
<i>Разраб.</i>		<i>Опольский В.В.</i>			<i>Социальная ответственность</i>		
<i>Провер.</i>		<i>Кушпиль В.В.</i>					
<i>Консул.</i>		<i>Акимов Д.В.</i>					
<i>Н. конт.</i>		<i>Ефремов Е.В.</i>					
<i>Утв.</i>		<i>Горюнов А.Г.</i>					
					<i>Лит</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
					<i>ТПУ</i>		<i>ФТИ</i>
					<i>Группа</i>		<i>0712</i>

необходимых правовых условий для достижения оптимального согласования интересов сторон трудовых отношений, интересов государства, а также правовое регулирование трудовых отношений и иных непосредственно связанных с ними отношений.

Обязанности по обеспечению безопасных условий и охраны труда, согласно ст. 212 ТК РФ, возлагаются на работодателя. Последний, руководствуясь указанной статьей, обязан обеспечить безопасность работников при эксплуатации зданий, сооружений, оборудования, осуществлении технологических процессов, а также применяемых в производстве инструментов, сырья и материалов. Кроме того, работодатель обязан обеспечить, соответствующие требованиям охраны труда, условия труда на каждом рабочем месте; режим труда и отдыха работников в соответствии с трудовым законодательством, и иными нормативными правовыми актами, содержащими нормы трудового права. Работодатель обязан информировать работников об условиях охраны труда на рабочих местах, о риске повреждения здоровья и полагающихся им компенсациях и средствах индивидуальной защиты.

Помимо обеспечения безопасных условий труда гражданина, законодательство налагает ответственность на каждого за состояние окружающей природной среды. Так Конституция Российской Федерации статьей 58 обязывает каждого «сохранять природу и окружающую среду, бережно относиться к природным богатствам».

Во исполнение указанных положений, а также положений других нормативных документов в области охраны труда и окружающей природной среды (№52-ФЗ «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения») соответствующими ведомствами, были разработаны требования, инструкции, нормы и стандарты, согласно которым необходимо обеспечивать требования законодательства в указанной области [17, 18].

## **4.2 Характеристика вредных и опасных факторов, имеющих место в лаборатории**

Работа в лаборатории № 104 1-го физического корпуса Института ядерной физики г. Ржеж сопряжена со следующими видами вредных и опасных факторов для здоровья сотрудников[20]:

- опасность поражения электрическим током;
- опасность вредного воздействия электромагнитного излучения;
- опасность вредного воздействия шума;
- опасность возникновения пожара;
- опасность радиационного поражения.

Во избежание возможности поражения или вредного воздействия одного или нескольких из указанных факторов обязательным является исполнение всеми сотрудниками лаборатории мер по охране труда и нижеследующих санитарно-гигиенических норм:

- норм естественного и искусственного освещения;
- норм на микроклимат, вентиляцию и отопление;
- норм на наличие в воздухе вредных веществ;
- норм радиационного контроля.

## **4.3 Организация мероприятий по электробезопасности**

Электропитание лаборатории № 104 1-го физического корпуса Института Ядерной Физики г. Ржеж осуществляется от силового распределительного щита однофазного переменного тока с действующим значением напряжения 220 В. Таким образом, в соответствии с Правилами устройства электроустановок (ПУЭ), все электроприборы, используемые в лаборатории, относятся к низковольтным с напряжением питания до 1000 В.

Все электроприемники относятся к электроприемникам III категории. Лаборатория, согласно классификации ПУЭ [19], является сухим помещением без повышенной опасности.

Электробезопасность в лаборатории должна обеспечиваться следующими мероприятиями:

- для защиты от напряжения прикосновения все токоведущие части должны быть изолированы; запрещается использовать кабели и провода с поврежденной или потерявшей защитные свойства изоляцией; неизолированные токоведущие части должны быть оборудованы защитными ограждениями или расположены в недоступном для прикосновения месте; запрещается пользоваться поврежденными розетками, распределительными коробками, рубильниками и другими электроустановочными приборами; устройство и эксплуатация временных электросетей не допускается;

- для защиты от поражения электрическим током путем возникновения потенциала на проводящих корпусах электроприборов необходимо наличие защитного заземления; согласно ПУЭ сопротивление заземляющего устройства в любое время года должно быть не более 4 Ом, при этом сечение заземляющей жилы должно быть не менее 4 мм<sup>2</sup> для медных проводников, не менее 6 мм<sup>2</sup> – для алюминиевых и не менее 20 мм<sup>2</sup> – для стальных;

- для защиты от токов короткого замыкания необходимо наличие быстродействующих устройств защиты; электрическая сеть должна иметь защиту от токов короткого замыкания, обеспечивающую по возможности наименьшее время отключения и требования селективности; в качестве аппаратов защиты должны применяться автоматические выключатели или предохранители.

При работе в лаборатории, с целью обеспечения электробезопасности пользователей компьютеров, должны выполняться следующие требования:

- все узлы одного персонального компьютера и подключенное к нему периферийное оборудование должны питаться от одной фазы электросети;

- корпуса системного блока и внешних устройств должны быть заземлены радиально с одной общей точкой;

- для аварийного отключения компьютерного оборудования должен использоваться отдельный щит с автоматами защиты и общим рубильником;

- все соединения ПЭВМ и внешнего оборудования должны производиться при отключенном электропитании.

Для предотвращения электротравматизма большое значение имеет правильная организация обслуживания ПЭВМ, проведение ремонтных, монтажных и профилактических работ.

Ремонт, разборку и сборку, наладку электротехнологического оборудования может выполнять только подготовленный персонал, имеющий необходимую для данных работ группу допуска по электробезопасности.

Каждому необходимо знать меры медицинской помощи при поражении электрическим током. В любом рабочем помещении необходимо иметь медицинскую аптечку для оказания первой медицинской помощи.

Поражение электрическим током чаще всего наступает при небрежном обращении с приборами, при неисправности электроустановок или при их повреждении.

Для освобождения пострадавшего от токоведущих частей необходимо использовать непроводящие материалы. Если после освобождения пострадавшего из-под напряжения он не дышит, или дыхание слабое, необходимо вызвать бригаду скорой медицинской помощи и оказать пострадавшему доврачебную медицинскую помощь:

- обеспечить доступ свежего воздуха (снять с пострадавшего стесняющую одежду, расстегнуть ворот);

- очистить дыхательные пути;

- приступить к искусственной вентиляции легких (искусственное дыхание);

- в случае необходимости приступить к непрямому массажу сердца.

Любой электроприбор должен быть немедленно обесточен в случае:

- возникновения угрозы жизни или здоровью человека;
- появления запаха, характерного для горячей изоляции или пластмассы;
- появления дыма или огня;
- появления искрения;
- обнаружения видимого повреждения силовых кабелей или коммутационных устройств.

При возгорании, возникновении пожара, необходимо отключить электроприбор от электросети (если это сделать невозможно, то необходимо отключить питающую сеть автоматическим или пакетным выключателем, или рубильником на лабораторном или силовом щите), вызвать пожарную команду и приступить к тушению пожара имеющимися средствами пожаротушения. Следует помнить, что для тушения пожара на установках находящихся под напряжением, можно пользоваться только углекислотным или порошковыми огнетушителями. При сильном возгорании, пожаре необходимо срочно вызвать электрика и обесточить помещение, после чего для тушения пожара можно использовать пенные огнетушители и воду [19].

#### **4.4 Требования безопасности при работе видеотерминалов и ПЭВМ**

##### **4.4.1 Эргономика и организация рабочего места**

Эргономика – соответствие труда физиологическим и психическим возможностям человека, обеспечение наиболее эффективной работы, не создающей угрозы здоровью человека и выполняемой при минимальной затрате биологических ресурсов. Эргономическая оценка рабочих мест в производственных условиях проводится комплексно согласно методическим рекомендациям Минздрава: «Основные принципы и методы эргономической

оценки рабочих мест для выполнения сидя и стоя (ГОСТ 12.2.032–78 ССГТ «Рабочее место при выполнении работ сидя», «Общие эргономические требования», ГОСТ 12.2.048–80 «ССБТ. Оборудование производственное. Общие эргономические требования»).

#### **4.4.2 Мероприятия по выполнению норм естественного и искусственного освещения**

В соответствии с СП 2.2.1.1312–03 системы естественного, искусственного и комбинированного освещения следует проектировать с учетом необходимости обеспечения на рабочих местах (постоянных и непостоянных) нормируемых показателей: коэффициент естественной освещенности (КЕО), освещенность рабочей поверхности, показатель ослеплённости, отраженная блескость, коэффициент пульсации, яркость, неравномерность распределения яркости.

В лаборатории № 104 1-го физического корпуса Института Ядерной Физики г. Ржеж нормальная освещенность достигается в дневное время за счет естественного света, проникающего через 2 оконных проема размером 1,2 м на 1,5 м, а в утренние и вечерние часы – за счет искусственного освещения люминесцентными лампами. Поэтому следует рассчитать два вида освещенностей:

- естественной;
- искусственной.

Определим искусственную освещенность рабочего места за счет общего освещения. Общее освещение осуществляется светильниками ЛСП-02. Они расположены в 2 ряда по 4 светильника, в каждом из которых установлены две лампы ЛД-40.

Помещение имеет прямоугольную форму размерами 5 м на 4,5 м и высотой 3,5 м. При расчете общего освещения используем метод светового потока. Необходимая освещенность рассчитывается по следующей формуле:

$$E = \frac{F * N * \eta}{S * z * k}, \quad (4.1)$$

где  $E$  – нормированная минимальная освещенность, лк;

$F = 1340$  лм – световой поток для ЛД-40;

$N$  – число ламп в помещении;

$S$  – площадь освещаемого помещения;

$z$  – отношение средней освещенности к минимальной (обычно принимается равным 1,1–1,2; зададимся  $z = 1,15$ );

$k = 1,5$  – коэффициент запаса, учитывающий уменьшение светового потока лампы в результате загрязнения светильников в процессе эксплуатации;

$\eta$  – коэффициент использования светового потока, зависит от коэффициента отражения потолка  $\rho_{\text{п}}$  и стен  $\rho_{\text{с}}$ , высоты размещения светильников  $H$  и размеров помещения  $A$  на  $B$ .

Определим индекс помещения:

$$I = \frac{A * B}{H * (A + B)} = \frac{4 * 4,5}{3,5 * (4 + 4,5)} = 0,605. \quad (4.2)$$

Для  $\rho_{\text{п}} = 70 \%$ ,  $\rho_{\text{с}} = 50 \%$ ,  $\rho_{\text{п}} = 20 \%$ ,  $I = 0,605$  коэффициент использования светового потока соответственно равен  $\eta = 0,37$ .

Подставим результаты в формулу (4.1) для освещенности и получим:

$$E = \frac{1340 * 16 * 0,37}{4 * 4,5 * 1,15 * 1,5} = 255,48. \quad (4.3)$$

В соответствии с санитарными нормами СНиП 23-05-95 рекомендуемая искусственная освещенность для помещений данного типа для работ высокой точности на светлом фоне при большом контрасте, составляет 200 лк.

Приведённый расчет естественного освещения произведём по световому коэффициенту:

$$k_{\text{свет}} = \frac{F_{\text{окон}}}{F_{\text{пола}}} * 100, \quad (4.4)$$

где  $F_{\text{окон}} = 3,6 \text{ м}^2$  – площадь окон;

$F_{\text{пола}} = 18 \text{ м}^2$  – площадь пола.

Таким образом, по формуле (4.4) рассчитаем световой коэффициент:

$$k_{\text{свет}} = \frac{3,6}{18} * 100 = 20. \quad (4.5)$$

Рекомендуемый коэффициент естественной освещенности для помещения данного типа и работ высокой точности на светлом фоне при большом контрасте равен от 16 до 20 %. Следовательно, освещенность рабочего места находится в допустимых пределах.

#### **4.4.3 Мероприятия по борьбе с производственным шумом**

В соответствии с классификацией, введенной СН 2.2.4/2.1.8.562–96, шум, имеющий место в лаборатории № 104 1-го физического корпуса Института Ядерной Физики г. Ржеж, является постоянным, широкополосным.

Характеристикой постоянного шума на рабочих местах являются уровни звукового давления в децибелах в октавных полосах со среднегеометрическими частотами 31,5; 63; 125; 250; 500; 1000; 2000; 4000; 8000 Гц, определяемые по

формуле:

$$W(L) = 20 \lg \left( \frac{P}{P_0} \right), \quad (4.6)$$

где  $P$  – среднеквадратичная величина звукового давления, Па;

$P_0 = 2 \cdot 10^{-5}$  Па – исходное значение звукового давления в воздухе.

Шум от работающего компьютера создает  $P = 0,05$  Па. Таким образом,  $W(L) = 68$  дБ.

Согласно пункту 5.3.1 СН 2.2.4/2.1.8.562–96 для рабочих мест в помещениях «... проектно-конструкторских бюро, расчетчиков, программистов вычислительных машин, в лабораториях для теоретических работ и обработки данных...» предельно допустимый уровень звукового давления составляет  $L_{max} = 75$  дБ. Иными словами, шум, создаваемый работой компьютеров, по своим характеристикам удовлетворяет санитарным нормам [21].

#### **4.4.4 Мероприятия по радиационной безопасности**

Любой электровакуумный прибор, работающий при высоких напряжениях на электродах, является источником рентгеновского излучения. Поверхность дисплея компьютера, в электронно-лучевой трубке которого применяется ускоряющее напряжение порядка 30 кВ, можно отнести к группе II источников мягкого рентгеновского излучения. Для источников группы II мощность экспозиционной дозы на расстоянии 510 мм от поверхности не должна превышать 0,28 мР/ч (0,08 мкР/с) [23].

Согласно спецификации производителя – фирмы СТХ, монитор которой используются в составе ЭВМ в лаборатории № 104, модель монитора Screen Pro с электронно-лучевой трубкой соответствует стандарту ТСО-92 Шведского государственного департамента охраны труда. Этот стандарт предусматривает нормирование не только мягкого рентгеновского излучения, но и всех видов

электромагнитного излучения мониторов для видов работ связанных с постоянной работой за компьютером. В настоящее время стандарт ТСО-92 признан самым строгим стандартом в мире, нормирующим вредные факторы при работе с ЭВМ, и, следовательно, монитор, удовлетворяющий его требованиям, будет полностью удовлетворять требованиям стандартов.

Для проведения измерений в ходе выполнения выпускной квалификационной работы использовалось оборудование, расположенное в лаборатории по исследованию полупроводниковых детекторов и электроники 1-го физического корпуса Института ядерной физики. Для обеспечения радиационной безопасности активность всех источников ионизирующего излучения, находящихся в этой лаборатории, предварительно измеряется дозиметристами, а их хранение осуществляется согласно стандартам, установленным законом Чехии № 18/1997 о мировом использовании ядерной энергии и ионизирующего излучения. Зона повышенного контроля удовлетворяет спецификациям № 307/2002 Государственного Института по Ядерной безопасности Чехии.

При проведении эксперимента на циклотроне U-120M осуществлялся индивидуальный дозиметрический контроль полученной эквивалентной дозы персоналом с помощью плечных дозиметров (0,05 мЗв–2 Зв) и персональных дозиметров RAD-50 (1–10 Зв). Также осуществлялся контроль эквивалентной дозы на рабочем месте при помощи стационарной сети мониторинга MS-2000. Сеть мониторинга предназначена для контроля уровней эквивалентной дозы в разных местах в режиме реального времени и передачи измеренных значений в центр управления. При превышении критического уровня дозы передается сигнал, который может быть обработан другими модулями сигнализации. Стационарная сеть MS-2000 состоит из следующих элементов:

GMS3 – датчик гамма-излучения с энергетическим диапазоном 50 КэВ–1,3 МэВ;

VRS2 – водонепроницаемый датчик гамма-излучения с энергетическим диапазоном 50 кэВ–1,3 МэВ;

ZP16 – панель индикации состояний 16 каналов, обеспечивающая акустическую и световую сигнализацию;

ZP1 – статус-дисплей для одного канала, обеспечивает индикацию превышения предельного уровня дозы для каждого из каналов;

ZP1D – портативный дисплей, имеет функцию индикации состояний всех каналов, а также возможность измерения дозы выбранного канала.

На рисунке 4.1 изображено схематическое размещение элементов сети мониторинга MS-2000.

#### **4.4.5 Мероприятия по выполнению норм вентиляции и отопления**

В лаборатории осуществляется естественная вентиляция с кратностью обмена воздуха за час от 0,6 до 0,8 зимой, от 0,8 до 1,9 летом.

Площадь помещения составляет 33 м<sup>2</sup>. В помещении постоянно находятся 2 человека, на каждого работающего приходится 9 м<sup>2</sup> пола, 31,5 м<sup>3</sup> воздуха, при норме 4,5 м<sup>2</sup> и 15 м<sup>3</sup> соответственно.

Температура в помещении поддерживается за счет водяного отопления.

Согласно [22] лаборатория № 104 относится к помещению без повышенного тепловыделения, а по категории работ к легким, поэтому температура и относительная влажность должны быть:

- в летний период:  $t = 22\text{--}25\text{ }^{\circ}\text{C}$  ,  $\varphi = 60\text{--}40\text{ }%$ ;
- в зимний и переходные периоды:  $t = 16\text{--}22\text{ }^{\circ}\text{C}$  ,  $\varphi = 60\text{--}40\text{ }%$ .

#### **4.4.6 Мероприятия по пожарной безопасности**

В соответствии с правилами определения категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности, регламентируемыми НПБ 105 – 03, лаборатория № 104 1-го физического корпуса Института Ядерной Физики г. Ржеж относится к категории В, так как в помещении наличествуют твердые горючие и трудногорючие вещества и материалы, а также вещества и материала, способные при взаимодействии с кислородом воздуха гореть. К горючим материалам относятся шкафы, столы, стулья и документация.

Для предотвращения пожара принимаются следующие меры:

- из лаборатории необходимо удалить неиспользуемые нагревательные приборы;

- паяльник установить на несгораемую основу вдали от легко воспламеняющихся предметов;

- корпуса рубильников и розеток разместить на несгораемых основах;

- нагревательные приборы расположить на асбестовых ковриках и прокладках;

- работы с легко воспламеняющимися веществами должны проводиться вне лаборатории;

- курение в лаборатории строго запрещено.

В соответствии с требованиями пожарной безопасности разрабатывается план эвакуации, эвакуационная карта и инструкция «О порядке проведения эвакуации людей и оборудования в случае пожара».

Лаборатория должна быть оборудована средствами пожаротушения, которыми в данном случае являются углекислотные огнетушители типа ОУ [19].

## **5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

В настоящее время перспективность научного исследования определяется не столько масштабом открытия, оценить которое на первых этапах жизненного цикла высокотехнологического и ресурсоэффективного продукта бывает достаточно трудно, сколько коммерческой ценностью разработки. Оценка коммерческой ценности разработки является необходимым условием при поиске источников финансирования для проведения научного исследования и коммерциализации его результатов.

Целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является определение перспективности и успешности научно-исследовательского проекта, разработка механизма управления и сопровождения конкретных проектных решений на этапе реализации.

### **5.1 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения**

Анализ конкурирующих разработок, которые представлены на рынке, необходимо проводить, так как рынки находятся в постоянном движении. Такой анализ важен, так как проводится оценка сравнительной эффективности научной разработки, и определяются направления для ее будущего повышения.

Стоит сказать, что на данный момент у разработанного решения очень много конкурентов на рынке.

Объектами анализа стали детекторы нейтронного излучения. В рамках ВКР была проведена оценка сильных и слабых сторон разработок конкурентов, в

					<b>ФЮРА. 4 12126.018ПЗ</b>			
<i>Изм</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		<i>Опольский В.В.</i>			<b>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</b>	<i>Лит</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>		<i>Кушпиль В.В.</i>						
<i>Консул.</i>		<i>Меньшикова Е.В.</i>				<b>ТПУ</b>		<b>ФТИ</b>
<i>Н. конт.</i>		<i>Ефремов Е.В.</i>				<b>Группа</b>		<b>0712</b>
<i>Утв.</i>		<i>Горюнов А.Г.</i>						

ходе анализа были рассмотрены конкурентные решения в области детектирования нейтронов крупных компаний Polimaster (K1) и RAE Systems (K2). Для рассмотрения, в соответствии с методическими указаниями [], был подобран ряд критериев для оценки выполняемого в ВКР проекта с точек зрения его ресурсоэффективности и экономической эффективности, результаты сравнения представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конк. сп-ть		
		Бф	Бк1	Бк2	Кф	Кк1	Кк2
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Достоверность измерений	0,11	4	5	5	0,44	0,55	0,55
2. Функциональность	0,1	3	4	4	0,3	0,4	0,4
3. Диапазон измерения	0,11	4	5	5	0,44	0,55	0,55
4. Возможность замены чувствительного элемента	0,12	5	2	2	0,6	0,24	0,24
5. Простота в эксплуатации	0,08	4	4	3	0,32	0,32	0,24
6. Надежность	0,07	4	5	4	0,28	0,35	0,28
7. Портативность	0,06	4	5	5	0,24	0,3	0,3
8. Срок службы	0,07	3	4	4	0,21	0,28	0,28

Продолжение таблицы 5.1

9. Возможность подключения к ЭВМ	0,07	5	3	4	0,35	0,21	0,28
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Уровень проникновения на рынок	0,09	4	4	5	0,36	0,36	0,45
2. Послепродажная поддержка	0,03	2	2	2	0,06	0,06	0,06
3. Цена продукта	0,09	5	2	2	0,45	0,18	0,18
Итого	1	47	45	45	4,05	3,8	3,81

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле 5.1:

$$K = \sum V_i \cdot B_i \quad (5.1)$$

где  $K$  – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

$V_i$  – вес показателя (в долях единицы);

$B_i$  – балл  $i$ -го показателя.

Как видно из таблицы, наиболее значимыми критериями являются достоверность измерений, возможность замены чувствительного элемента и диапазон измерения. Высокие оценки по перечисленным выше показателям просто необходимы для создания конкурентоспособного продукта в области нейтронного детектирования.

Уникальность разработки заключается в том, что разрабатываемое решение предоставляет широкий возможность замены чувствительного элемента, имеющего, ко всему прочему, низкую стоимость. Решение ориентируется на научные исследования и промышленность. Дальнейшее развитие разработки позволит применять решение в других областях.

По результатам проведенного сравнения можно утверждать, что разрабатываемое решение является конкурентоспособным по отношению к имеющимся аналогам на рынке.

## 5.2 SWOT-анализ

Для объективного оценивания конкурентоспособности и перспектив развития разработки необходимо проанализировать сильные и слабые стороны, а также угрозы и возможности, которые могут повлиять на разработку. SWOT-анализ позволит сформировать направление, в котором необходимо работать, чтобы повысить конкурентоспособность научной разработки.

Таблица 5.2 – Итоговая матрица SWOT-анализа

	<p>Сильные стороны разработки:</p> <p>С1. Актуальность работы.</p> <p>С2. Возможность замены чувствительного элемента</p> <p>С3. Достоверность полученных данных.</p> <p>С4. Простота использования.</p> <p>С5. Уникальные технические решения.</p> <p>С6. Более низкая стоимость реализации по сравнению с аналогами.</p>	<p>Слабые стороны разработки:</p> <p>Сл1. Большой срок разработки.</p> <p>Сл2. Необходимость дальнейших научных исследований.</p> <p>Сл3. Отсутствие опыта разработки и поддержания проектов подобного рода у разработчиков.</p> <p>Сл4. Ограниченное время использования в интенсивных полях</p>
--	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Продолжение таблицы 5.2

<p>Возможности:</p> <p>В1. Использование современной вычислительной техники.</p> <p>В2. Применение образца в промышленности.</p> <p>В3. Политика государства направленная на развитие научно-технического прогресса.</p> <p>В4. Появление спроса на новый продукт (наличие свободных ниш на рынке).</p> <p>В5. Высокая потребность в подобных разработках.</p>	<p>Проект может получить серьезное развитие, итогами которого станут обширное внедрение разработки в наукоемких производствах, расширение функционала, технических возможностей.</p>	<p>Проект может использовать разработки других ведущих ВУЗов, для компенсации зависимости от дополнительных исследований.</p> <p>Использование спонсорской поддержки на компенсацию расходов, связанную с разработкой и поддержанием проекта.</p>
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Продолжение таблицы 5.2

<p>Угрозы:</p> <p>У1. Появление новых конкурентных разработок.</p> <p>У2. Увеличение срока выхода на рынок.</p> <p>У3. Стремительное развитие технологий в области разработки.</p> <p>У4. Устаревание программно-технических решений заложенных в основу разработки.</p>	<p>Проект претерпит изменения в технической и программной части, чтобы оставаться конкурентоспособным или будет заморожен до лучших времен.</p> <p>Возможно слияние с другим проектом или продажа текущих разработок конкурентам.</p>	<p>В таком случае потребуется усовершенствование функциональности, а также изменение технологий, лежащих в основе решения.</p>
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

По итогам SWOT-анализа можно судить, что, несмотря на наличие слабостей и угроз для проекта, существуют стратегии, которые позволяют сохранить коммерческую ценность. Так же установлено, что выявленные сильные стороны проекта и возможности позволяют разработать стратегии, при которых возможно увеличение коммерческой ценности проекта ВКР.

### 5.3 Оценка готовности проекта к коммерциализации

На любой стадии жизненного цикла проекта полезно оценивать степень его готовности к коммерциализации. Для этого необходимо оценить степень проработанности научного проекта и уровень имеющихся знаний у разработчика (таблица 5.3).

Таблица 5.3 – Бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации

№ п/п	Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
1.	Определен имеющийся научно-технический задел	3	2
2.	Определены перспективные направления коммерциализации задела	3	2
3.	Определены отрасли и технологии для предложения на рынке	3	2
4.	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	3	2
5.	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	3	3
6.	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	3	2
7.	Проведены маркетинговые	2	2

	исследования рынков сбыта		
--	---------------------------	--	--

Продолжение таблицы 5.3

8.	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	1	2
9.	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	1	1
10.	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	3	2
11.	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	1	1
12.	Проработаны вопросы инфраструктуры поддержки, получения льгот	3	1
13.	Проработаны вопросы финансирования научной разработки	1	1
14.	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	1	1
15.	Проработан механизм реализации научного проекта	3	3

	ИТОГО БАЛЛОВ	34	27
--	--------------	----	----

Исходя из оценок степени готовности проекта к коммерциализации видно, что проект имеет среднюю степень готовности. По вопросам маркетинговых исследований, финансирования коммерциализации, необходимо привлечение в команду проекта специалистов из данных областей.

В качестве метода коммерциализации будет использоваться инжиниринг – то есть, на основе договора с консультантом предоставляется комплекс инженерно-технических услуг заказчику, которые связаны с проектированием, разработкой и вводом в эксплуатацию нейтронных детекторов.

#### 5.4 Инициация проекта

Инициация проекта состоит из процессов, которые выполняются для нового проекта или новой стадии проекта. Для этого определяются начальные цели, содержание, фиксируются ресурсы. Также определяются внутренние и внешние заинтересованные стороны проекта. Заинтересованные стороны проекта отображены в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
Национальный исследовательский Томский политехнический университет	Развитие и поддержание научной деятельности в области нейтронного детектирования. Создание и коммерческая реализация перспективной научной разработки; написание научных статей, с целью публикации в известных научных журналах для поднятия

	рейтинга ВУЗа. Поддержка связи с институтом ядерной физики академии наук Чешской Республики.
--	----------------------------------------------------------------------------------------------

Продолжение таблицы 5.4

Институт ядерной физики академии наук Чешской Республики	Развитие и поддержание научной деятельности в области нейтронного детектирования. Создание и коммерческая реализация перспективной научной разработки; написание научных статей, с целью публикации в известных научных журналах. Поддержка связи с национальным исследовательским Томским политехническим университетом.
----------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

В таблице 5.5 представлена информация о целях проекта, критериях достижения целей, а также требования к результатам проекта.

Таблица 5.5 – Цели и результаты проекта

Цели проекта	Разработка перспективного шестнадцатиканального детектора нейтронного излучения.
Ожидаемые результаты проекта	Разработанное устройство должно соответствовать предъявляемым требованиям в области нейтронного детектирования. Создание конкурентоспособного устройства для детектирования нейтронного флюэнса.

Критерии приемки результата проекта	Точность измерений, соответствие требованиям, предъявляемым к функционалу устройства.
-------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------

Продолжение таблицы 5.5

Требования к результату проекта	Разработанное устройство должно удовлетворять всем предъявляемым требованиям (высокая точность измерений, широкий функционал, возможность детектировать частицы в широком диапазоне энергий). Данные соответствия определяются по результатам проведения экспериментальных исследований нейтронного детектора.
---------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Рабочая группа проекта отображена в таблице 5.6.

Таблица 5.6 – Рабочая группа проекта

№ п/п	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудозатраты, ч.
1	Кушпиль В.В., кафедра спектроскопии, профессор	Руководитель проекта	Руководство процессом выполнения проекта. Техническая консультация	392

			исполнителя.	
2.	Опольский В.В., кафедра ЭАФУ ТПУ, студент	Исполнитель	Выполнение работ по теоретической проработке проекта. Практическая реализация проекта	512

Ограничения и допущения проекта приведены в таблице 5.7.

Таблица 5.7 – Ограничения проекта

Фактор	Ограничения/ допущения
Бюджет проекта, р.	290000
Источник финансирования	НИ ТПУ, ИЯФ АНЧР
Сроки проекта:	
Дата утверждения плана управления проектом	03.10.2016
Дата завершения проекта	25.01.2017

### 5.5 План проекта

В рамках планирования научного проекта необходимо построить календарный график проекта.

Календарный план в виде диаграммы Ганта представлен в таблице 5.8

Таблица 5.8 – Календарный план-график проведения проекта

Вид работы	Исполнители	Т <sub>к</sub> , кал. дн	Продолжительность выполнения работ, недели																							
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Составление ТЗ	Дипломник н.р.	1 4																								
Технико-экономическое обоснование	Дипломник н.р.	4 2																								
Изучение литературы	Дипломник	11																								
Анализ существующих решений	Дипломник н.р.	7 4																								
Разработка структуры устройства	Дипломник н.р.	12 4																								
Разработка алгоритмов работы устройства	Дипломник н.р.	18 3																								
Установка и настройка вспомогательного ПО	Дипломник	6																								
Разработка устройства	Дипломник н.р.	28 4																								
Проведение экспериментов	Дипломник н.р.	16 8																								
Оформление результатов	Дипломник н.р.	10 1																								

- Дипломник;      - Научный руководитель.

## 5.6 Бюджет научного исследования

При планировании бюджета научного исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов планируемых расходов, необходимых для его выполнения.

В данной научной разработке планируемыми расходами являются основная заработная плата, дополнительная заработная плата, отчисления на социальные нужды, а также расходы на электроэнергию при работе с компьютером.

### 5.6.1 Расчёт стоимости материальных затрат

Расчет стоимости материальных затрат производился по действующим прейскурантам или договорным ценам. В стоимость материальных затрат были также включены транспортно-заготовительные расходы. Результаты расчетов представлены в таблице 5.9.

Таблица 5.9 — Материальные затраты

Наименование	Марка, размер	Кол-во	Цена за ед., р	Сумма, р
Отладочная плата на базе PSoC	4	2	300	600
Одноплатный компьютер Raspberry Pi	Pi 2	1	2800	2800
Печатная плата	-	-	1500	1500
Аналогово-цифровой преобразователь	AD7793	8	580	4640
Диод PIN	BPW34	8	120	960
Электронные компоненты	-	-	5000	5000
Всего за материалы				15500
Транспортно-заготовительные расходы (3-5 %)				500
Итого по статье $C_M$				16000

## 5.6.2 Расчёт стоимости затрат на специальное оборудование

В статью «затраты на специальное оборудование для научных работ» включают все затраты, связанные с приобретением специального оборудования (приборов, контрольно-измерительной аппаратуры, стендов, устройств и механизмов), необходимого для проведения работ по конкретной теме. Определение стоимости спецоборудования производится по действующим прейскурантам, а в ряде случаев по договорной цене. В эту статью следует отнести персональный компьютер, который использовался непосредственно как средство разработки. При приобретении спецоборудования необходимо учесть затраты по его доставке и монтажу в размере 15 % от его цены. Стоимость оборудования, используемого при выполнении конкретного научного проекта и имеющегося в данной научно-технической организации, учитывается в виде амортизационных отчислений.

Для расчета амортизационных отчислений был выбран срок полезного использования  $n$  равный 5 лет. Тогда годовая норма амортизации  $a$  равна (формула (5.2)):

$$a = \frac{100}{n} = \frac{100}{5} = 20 \% \quad (5.2)$$

Зная норму амортизации можно найти сумму амортизации на время проекта для машин и оборудования  $A$  (формула (5.3)):

$$A = \frac{30000 \cdot 20 \cdot 178}{100 \cdot 365} = 2926 \text{ р.} \quad (5.3)$$

Поэтому общая стоимость оборудования будет складываться из суммы цены оборудования, затрат на доставку и монтаж и нормы амортизации. Расчеты по данной статье приведены в таблице 5.10.

Таблица 5.10 – Затраты на специальное оборудование для научных работ за время проекта

Наименование оборудования	Кол-во ед. оборудования	Цена ед. оборудования, р.	Общая стоимость амортизации оборудования, р.
Цифровой осциллограф R&S RTO1024	1	857 335	83620
Цифровой осциллограф NI PXI 5105	1	223 000	21750
Ноутбук HP 15	1	30 000	2926
Итого:	135370		

### 5.6.3 Расчёт заработной платы работников

В настоящий раздел включается заработная плата научных и инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по теме дипломного проекта. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы оплаты труда. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы.

Для определения действительного годового фонда рабочего времени сотрудников была составлена таблица 5.11.

Таблица 5.11 — Баланс рабочего времени сотрудников

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней	118	118
– выходные дни	104	104
– праздничные дни	14	14
Потери рабочих дней	33	38
– отпуск	28	28
–невыход по болезни	5	10
Действительный годовой фонд рабочего времени	214	209

Месячный должностной оклад руководителя:

$$Z_m = Z_o * (1 + k_{пр} + k_d) * k_p = 20000 * (1 + 0,3 + 0,2) * 1 = 30000, \quad (5.4)$$

где  $Z_o$  – базовый оклад, р.;

$k_{пр}$  – премиальный коэффициент;

$k_d$  – коэффициент доплат и надбавок;

$k_p$  – районный коэффициент.

Среднедневная заработная плата руководителя:

$$Z_{дн} = \frac{Z_m * M}{F_d} = \frac{30000 * 11,2}{214} = 1570, \quad (5.5)$$

где  $Z_m$  – месячный должностной оклад работника, р.;

$M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года;

$F_d$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала.

Основная заработная плата  $Z_{\text{осн}}$  руководителя рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} * T_p = 1570 * 30 = 47100, \quad (5.6)$$

где  $T_p$  – продолжительность работ, выполняемых руководителем (таблица 5.12);

$Z_{\text{дн}}$  – среднедневная заработная плата руководителя.

Дополнительная заработная плата  $Z_{\text{доп}}$  рассчитывается исходя из 10–15 % от основной заработной платы работников, непосредственно участвующих в выполнении дипломного проекта:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} * Z_{\text{осн}} = 0,1 * 47100 = 4710, \quad (5.7)$$

где  $k_{\text{доп}}$  – коэффициент дополнительной зарплаты.

Общая заработная плата руководителя  $C_{\text{зп}}$  включает основную и дополнительную заработную плату:

$$C_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}} = 47100 + 4710 = 51810. \quad (5.8)$$

Месячный должностной оклад дипломника:

$$Z_m = Z_o * (1 + k_{\text{пр}} + k_d) * k_p = 9000 * (1 + 0 + 0) * 1 = 9000. \quad (5.9)$$

Среднедневная заработная плата дипломника:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_m * M}{F_d} = \frac{9000 * 11,2}{209} = 482. \quad (5.10)$$

Основная заработная плата  $Z_{\text{осн}}$  дипломника:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} * T_{\text{р}} = 482 * 113 = 54466. \quad (5.11)$$

Дополнительная заработная плата  $Z_{\text{доп}}$  рассчитывается исходя из 10–15% от основной заработной платы работников, непосредственно участвующих в выполнении дипломного проекта:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} * Z_{\text{осн}} = 0,1 * 54466 = 5447. \quad (5.12)$$

Общая заработная плата дипломника включает основную и дополнительную заработную плату:

$$C_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}} = 54466 + 5447 = 59913. \quad (5.13)$$

Итоговые результаты представлены в таблице 5.12.

Таблица 5.12 — Заработная плата лиц, участвующих в дипломном проекте

<b>Заработная плата</b>	<b>Руководитель</b>	<b>Дипломник</b>
Основная зарплата, р	47100	54466
Дополнительная зарплата, р	4710	5447
Итого по статье $C_{\text{зп}}$	111723	

#### 5.6.4 Расчёт отчислений на социальные нужды

Затраты на отчисления во внебюджетные фонды рассчитывались по следующей формуле:

$$C_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} * C_{\text{зп}} = 0,27 * 47100 = 14040,5, \quad (5.14)$$

где  $k_{\text{внеб}}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды.

### 5.6.5 Расчёт потребляемой электроэнергии

Основным потребляемым сырьем в данной научной разработке является потребление электроэнергии компьютером. Для расчета стоимости потребляемой электроэнергии необходимо знать потребляемую мощность компьютером, время работы и текущий тариф на электроэнергию:

$$C_{\text{э}} = 8 * D * T * M = 8 * 113 * 5,8 / 1000 * 65 = 340,8, \quad (5.15)$$

где 8 – 8-часовой рабочий день;

D – продолжительность работ;

T – тариф на электроэнергию;

M – мощность, потребляемая ноутбуком.

По техническим характеристикам, ноутбук потребляет 65 Вт электроэнергии. Стоимость одного киловатт-часа электроэнергии составляет 5,8 рублей.

### 5.6.6 Группировка затрат по статьям

Группировка затрат по статьям отображена в таблице 5.13.

Весь бюджет исследования составил 278220,7 р.

Таблица 5.13 – Группировка затрат по статьям

Работник	Основна я з/п, р.	Доп. з/п, р.	Отчисления на соц. нужды, р (27,1%)	Затраты на спецоборудован ие, р.	Прочие прямые расходы, р	Итого себестоимость, р
н. р.	47100	4710	14040,5	135370	395,1	66245,6
Дипломник	54466	5446	16236,2		456,9	76605,1
					Итого	278220,7

Таблица 5.14 – Реестр рисков

№	Риск	Потенциальное воздействие	Вероятность наступления (1-5)	Влияние риска (1-5)	Уровень риска	Способы смягчения риска	Условия наступления
1	Деградация PIN-диода	Снижение точности измерений	4	4	средний	Снижения нейтронного воздействия	Высокий флюенс нейтронов
2	Вывод из строя интегральных микросхем	Неправильная работа устройства	2	3	низкий	Изоляция управляющей части от излучения	Облучение интегральных микросхем
3	Вывод из строя платы управления	Потеря работоспособности устройства	3	3	средний	Установка заземляющего контура	Статический разряд

### 5.6.7 Оценка сравнительной эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности  $I_{\Phi}^P$  и ресурсоэффективности  $I_m^P$ .

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают  $I_{\Phi}^P$  в ходе оценки бюджета затрат для вариантов исполнения научного исследования. Для разрабатываемого детектора флюенса затратами на разработку прототипа детектора, или 278220,7 рублей. В качестве аналога выступает промышленный детектор фирмы Polimaster, его рыночная цена составляет 300000 рублей. Из этого следует, что затраты на установку будут являться наибольшим интегральным показателем реализации технической задачи  $\Phi_{max}$ .

Интегральный финансовый показатель разработки  $I_{\Phi}^P$  определяется (формула (5.16)):

$$I_{\Phi}^P = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}} = \frac{278220,7}{300000} = 0,92 \quad (5.16)$$

Интегральный финансовый показатель аналога  $I_{\Phi}^A$  (формула (5.17)):

$$I_{\Phi}^A = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}} = \frac{300000}{300000} = 1 \quad (5.17)$$

Показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения определяется как сумма произведений балла критерия на его оценку. Интегральный показатель ресурсоэффективности рассчитан в таблице 5.15.

Таблица 5.15 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерий	Весовой коэффициент	Текущий проект	Аналог
1 Достоверность полученных экспериментальных данных	0,4	4	4
2 Программируемость событий работы	0,2	5	1
3 Гибкость структуры детектора	0,2	5	1
4 Простота использования	0,1	4	4
5 Проведение эксперимента в предельных режимах работы	0,05	4	2
6 Обслуживание при эксплуатации	0,05	4	3
Итого	1	26	15

Расчет интегральных показателей ресурсоэффективности разработки и аналога приведен в формулах (5.18) и (5.19).

$$I_{\text{финр}}^p = 4 \cdot 0,4 + 5 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,05 + 4 \cdot 0,05 = 4,4 \quad (5.18)$$

$$I_{\text{финр}}^a = 4 \cdot 0,4 + 1 \cdot 0,2 + 1 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,1 + 2 \cdot 0,05 + 3 \cdot 0,05 = 2,65 \quad (5.19)$$

Интегральный показатель эффективности разработки  $I_{\text{финр}}^p$  определяется по формуле (5.20).

$$I_{\text{финр}}^p = \frac{I_m^p}{I_{\phi}^p} = \frac{4,4}{0,92} = 4,78 \quad (5.20)$$

Интегральный показатель эффективности аналога  $I_{\text{финр}}^a$  определяется по формуле (5.21).

$$I_{\text{финр}}^a = \frac{I_m^a}{I_{\phi}^a} = \frac{1,75}{1} = 2,65 \quad (5.21)$$

Сравнение интегральных показателей эффективности текущего проекта и аналога позволяет определить сравнительную эффективность проекта  $\mathcal{E}_{\text{ср}}$  (формула (5.22)).

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{финр}}^p}{I_{\text{финр}}^a} = \frac{4,78}{2,65} = 1,8 \quad (5.22)$$

Результаты расчетов сравнительной эффективности проекта приведены в таблице 5.16.

Таблица 5.16 – Сравнительная эффективность проекта

Показатели	Аналог	Разработка
Интегральный финансовый показатель	1	0,92

Таблица 5.16 – Продолжение

Интегральный показатель ресурсоэффективности	2,65	4,4
Интегральный показатель эффективности	2,65	4,78
Сравнительная эффективность проекта	1,8	

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создание системы считывания и анализа данных нейтронного флюенса для мониторинга PSD в эксперименте СВМ позволит сопоставлять изменение параметров лавинных фотодиодов и накопленной дозы нейтронов, что позволит корректировать результаты измерений и производить своевременную замену элементов.

Разработанный и протестированный прототип канала измерения заряда переключения является основной частью системы считывания и анализа данных. Произведенная симуляция и сопоставление её результатов с реальным прототипом показали корректность выбранного технического решения. Так же данный прототип уже можно использовать для дальнейшего изучения характеристик PIN-фотодиода.

Результаты эксперимента показывают, что зависимость заряда переключения от флюенса нейтронов нелинейна и зависит от множества факторов. Эффекты деградации кристаллической решетки и самоотжига должны подвергнуться дальнейшему изучению. Оцененное влияние суммарного потока нейтронов до  $10^{11}$  н/см<sup>2</sup> на заряд переключения и построенная калибровочная кривая будут использоваться для оценки текущего суммарного потока нейтронов и сравнения изменения заряда переключения различных образцов.

Произведенная коррекция напряжения прямого включения и заряда переключения по температуре в рабочем диапазоне (15 ÷ 35) °С повысит точность отслеживания флюенса нейтронов в реальном времени и упростит дальнейшую обработку данных.

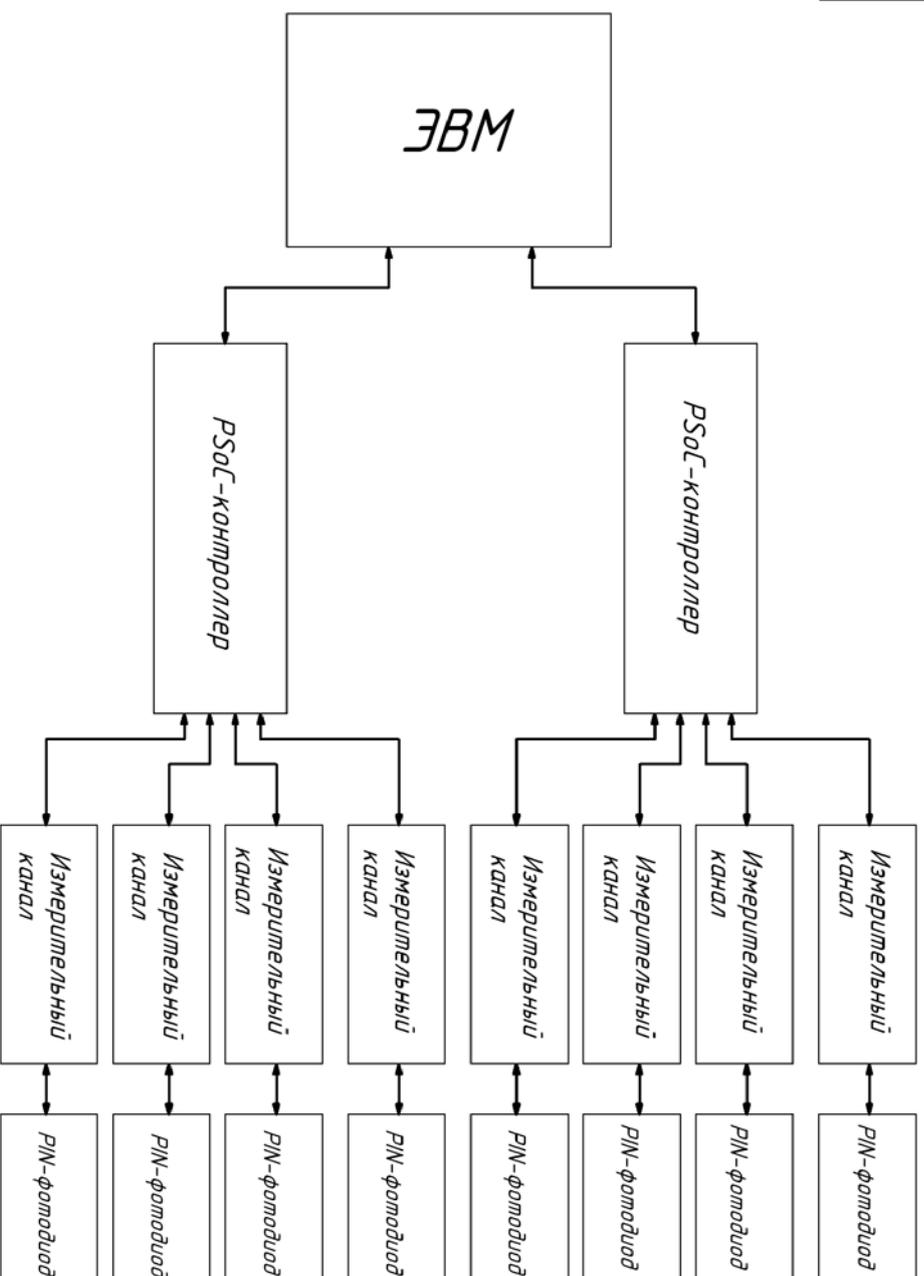
Разработанный алгоритм управления каналом измерения заряда универсален и имеет возможность увеличения количества каналов без существенных вмешательств в структуру программируемой системы.

					<i>ФЮРА. 4 12126.018ПЗ</i>			
<i>Изм</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		<i>Опольский В.В.</i>			<i>Заключение</i>	<i>Лит</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>		<i>Кушпиль В.В.</i>						
<i>Консул.</i>		<i>Кушпиль С.А.</i>						
<i>Н. кант.</i>		<i>Ефремов Е.В.</i>				<i>ТПУ</i>		<i>ФТИ</i>
<i>Утв.</i>		<i>Горюнов А.Г.</i>				<i>Группа</i>		<i>0712</i>

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Facility for Antiproton and Ion Research: CBM, 2016 from <http://www.fair-center.eu/for-users/experiments/cbm.html>
- 2 Relativistic Heavy Ion Collider, 2016 from <https://www.bnl.gov/rhic/>
- 3 Official CERN: NA61 experiment webpage. Retrieved October, 2015, from <http://shine.web.cern.ch/>
- 4 Facility for Antiproton and Ion Research: Introduction, 2016 from <http://www.fair-center.eu/for-users/experiments/cbm/introduction.html>
- 5 V. Mikhaylov, V. Kushpil, A. Kugler, S. Kushpil, V.P. Ladygin, O. Svoboda, P. Tlustý (2015) Study of Avalanche Photodiodes radiation hardness for the High Energy Physics Detectors,
- 6 Yuri Musienko. (2011) State of the art in SiPM's. Fermilab, Batavia and Institute for Nuclear Research, Moscow.
- 7 Vasilij Kushpil, Vasily Mikhaylov, Svetlana Kushpil, Pavel Tlustý, Ondrej Svoboda, Andrej Kugler. (2014) Radiation hardness investigation of avalanche photodiodes for the Projectile Spectator Detector readout at the Compressed Baryonic Matter experiment. Nuclear Physics Institute, Academy of Sciences of the Czech Republic, Řež, Czech Republic.
- 8 Zecotek Photonics, 2016 from <http://zecotek.com>
- 9 J. Mengali, E. Paskell, R. W. Beck, and C. S. Peet, Proceedings of the Second Conference on Nuclear Radiation Effects on Semiconductor Devices, Materials and Circuits, 1959.
- 10 John M. Swartz and Marlin O. Thurston, Analysis of the Effect of Fast-Neutron Bombardment on the Current-Voltage Characteristic of a Conductivity-Modulated p-i-n Diode, Journal of Applied Physics 37 (1966) 745-754
- 11 R. Korde, A. Ojha et al., The effect of neutron irradiation on silicon photodiodes, IEEE Transactions on Nuclear Science 36 (1989) 2169- 2175.

- 12 Ravotti T., et al., “BPW34 commercial p-i-n diodes for high-level 1 MeV neutron equivalent fluence monitoring”, in 9th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems, RADECS 2007, 10-14 September 2007.
- 13 Silicon PIN Photodiode (2015) <http://www.vishay.com/docs/81521/bpw34.pdf>
- 14 V. Kushpil, S. Kushpil and Z. Huna, (2012) A simple device for the measurement of kerma based on commercial PIN photo diodes
- 15 Вологдин Э.Н., Лысенко А.П. Радиационные эффекты в некоторых классах полупроводниковых приборов: Учебное пособие. – М.: Московский государственный институт электроники и математики, 2001. – 70 с.
- 16 Isochronous Cyclotron U-120M article at NPI Řež website. Retrieved October 10, 2015, from <http://mx.ujf.cas.cz/institute/expr1.html>
- 17 Конституция РФ. – М.: Юридическая литература, 1993. – 64 с
- 18 Трудовой кодекс РФ. Официальный текст. – М.: Бинном, 2002. – 207 с
- 19 Правила пожарной безопасности в РФ (с приложениями) — М.: Эксмо, 2010.
- 20 ГОСТ 12.0.003-74. Опасные и вредные производственные факторы.
- 21 ГОСТ 12.1.003-83. ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.
- 22 СП 2.2.1.1312-03. Гигиенические требования к проектированию вновь строящихся и реконструируемых промышленных предприятий.
- 23 НРБ-99/2009. СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности. Санитарные правила и нормативы.
- 24 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие / Н.А. Гаврикова, Л.Р. Тухватулина, И.Г. Видяев, Г.Н. Серикова, Н.В. Шаповалова; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 73 с.

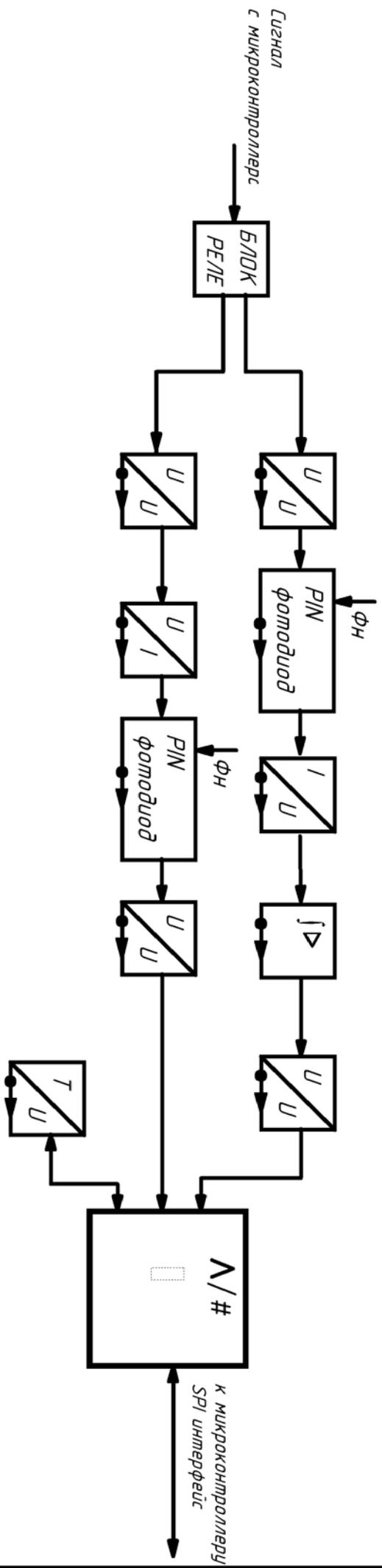


Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.	Дьяковский В.В.			
Пров.	Кушпиль В.В.			
Консульнт.	Кушпиль С.А.			
Н.контр.	Ефремов Е.В.			
Умберд.	Горюнов А.Г.			

ФЮРА.4.12126.018ЭЭ

Приложение Б  
Структурная схема  
системы считывания

Лист	Масса	Масшт.
Лист 1		
Листов 1		
ТПУ	ФТИ	
Группа	0712	



ФЮРА.412126.018ЭЭ

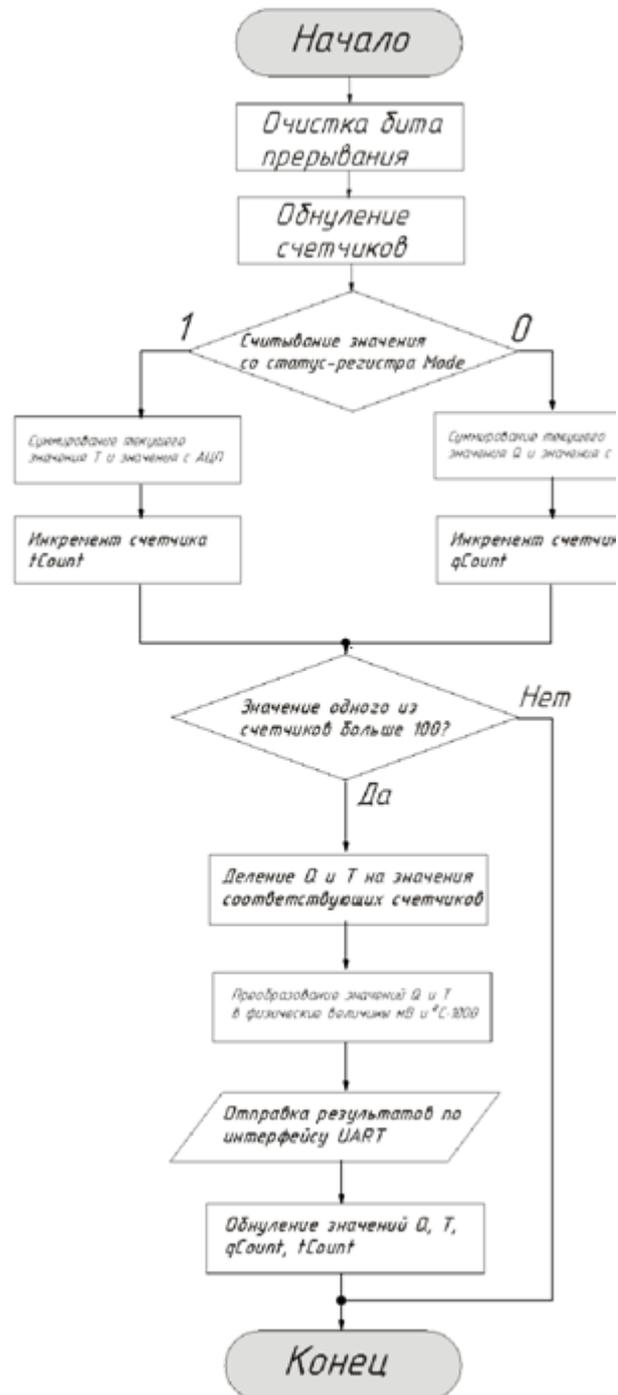
Приложение А  
 функциональная схема  
 узмеряющей части  
 системы считывания

Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.	Опольский В.В.			
Пров.	Кушиль В.В.			
Консульт.	Кушиль С.А.			
Н.контр.	Ефремов Е.В.			
Утверд.	Горюнов А.Г.			

Лит.	Масса	Масшт.
Лист 1	Листов 1	
ТПУ		ФТИ
Группа		0712

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

### Блок схема обработчика прерываний



## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

### Текст программы обработчика прерываний

```
CY_ISR(isr_trans_Interrupt)
{
    /* Place your Interrupt code here. */
    /* `#START isr_trans_Interrupt` */
    isr_trans_ClearPending();
    uint16 Q,t,Tr;
    uint32 Qe,te;
    char8 result[20];
    static int qcount=0,tcount=0;
    if (Mode_Read())
    {
        t=ADC_DelSig_1_GetResult16();
        ad_t+=t;
        tcount++;
    }
    else
    {
        Q=ADC_DelSig_1_GetResult16();
        ad_Q+=Q;
        qcount++;
    }

    if (tcount>=100 || qcount>=100)
    {
        // Q=23.2;
        // t=34.2;
        te=ADC_DelSig_1_CountsTo_Volts(ad_t/tcount)*100000;
        Qe=ADC_DelSig_1_CountsTo_Volts(ad_Q/qcount)*1000;
        Tr=2.581*te-258.21;

        sprintf(result,"T=%d\nQ=%ld\n",Tr,Qe);
        UART_1_PutString(result);
        ad_t=0;
        ad_Q=0;
        qcount=0;
        tcount=0;
    }

    /* `#END` */
}
```

## Приложение Д

### **РАЗРАБОТКА 8-КАНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ СЧИТЫВАНИЯ И АНАЛИЗА ДАННЫХ НЕЙТРОННОГО ФЛЮЕНСА ДЛЯ МОНИТОРИНГА PSD В ЭКСПЕРИМЕНТЕ СВМ**

**Презентационный материал дипломного проекта**

Студент гр.

\_\_\_\_\_

**В.В. Опольский**

\_\_\_\_\_

Консультант

доц., канд. техн. наук

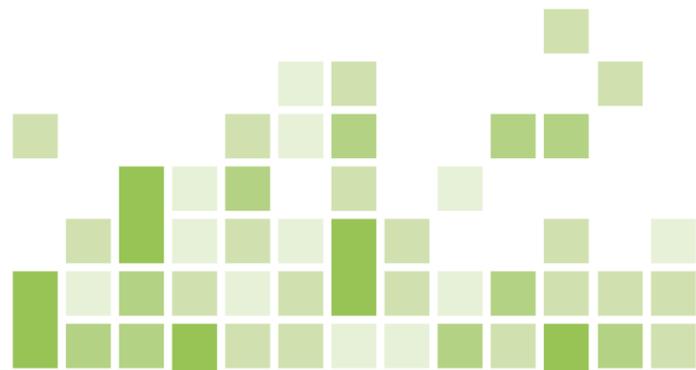
\_\_\_\_\_

**Н.В. Ливенцова**

\_\_\_\_\_



ТОМСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ



# РАЗРАБОТКА 8-КАНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ СЧИТЫВАНИЯ И АНАЛИЗА ДАННЫХ НЕЙТРОННОГО ФЛЮЕНСА ДЛЯ МОНИТОРИНГА PSD В ЭКСПЕРИМЕНТЕ СВМ

Исполнитель:

**Опольский В.В.**

Студент гр. 0712

Руководитель:

**Кушпиль В.В.**

Доктор технических наук

- В эксперименте CBM используется адронный калориметр PSD, чувствительными элементами которого являются лавинные фотодиоды;
- Фотодиоды выполнены из кремния, который подвержен воздействию нейтронного излучения;
- Моделирование показывает [1], что за два месяца непрерывного облучения детектора пучком ионов золота, в детекторе накапливается флюенс до  $10^{13}$  н/см<sup>2</sup>
- Нейтронный поток может вывести фотодиоды из строя, а так же ухудшить их параметры
- Поэтому необходимо отслеживать флюенс в реальном времени, чтобы верно определить причину неправильной работы PSD - детектора



**Цель:** Разработать 8-канальную систему считывания и анализа данных нейтронного флюенса, обеспечивающую контроль заданных параметров в реальном времени.

## Задачи:

- Аналитический обзор методов контроля нейтронного флюенса, основанных на измерении параметров PIN-фотодиода
- Экспериментальные исследования зависимостей напряжения прямого включения и заряда переключения от флюенса нейтронов и температуры
- Обработка и анализ результатов экспериментов
- Калибровка параметров детектора
- Симуляция, разработка и тестирование электрической схемы канала измерения на основе программируемой системы на кристалле (PSoC)



- **Первое применение PIN-диода** в качестве **нейтронного детектора** осуществлено в 1959 году[2]
- **BPW34** – модель коммерческого PIN-диода, для которой существует множество исследований, **подтверждающих его пригодность**, как детектора нейтронного флюенса
- В настоящее время широко **распространен метод измерения напряжения прямого включения ( $V_f$ )**
- В данной работе так же будет использоваться **метод измерения заряда переключения (Q)**



Рис. 1 - PIN-фотодиод BPW34  
В – материал изготовления (кремний)  
Р – подвержен радиации  
W34 - модель фотодиода

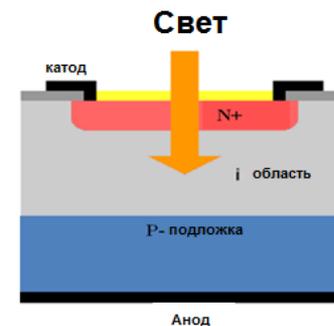


Рис. 2 – Упрощенная структура PIN-фотодиода

[2] - J. Mengali, E. Paskell, R. W. Beck, and C. S. Peet, Proceedings of the Second Conference on Nuclear Radiation Effects on Semiconductor Devices, Materials and Circuits, Sept. 1959.



Измерение напряжения прямого включения и заряда переключения

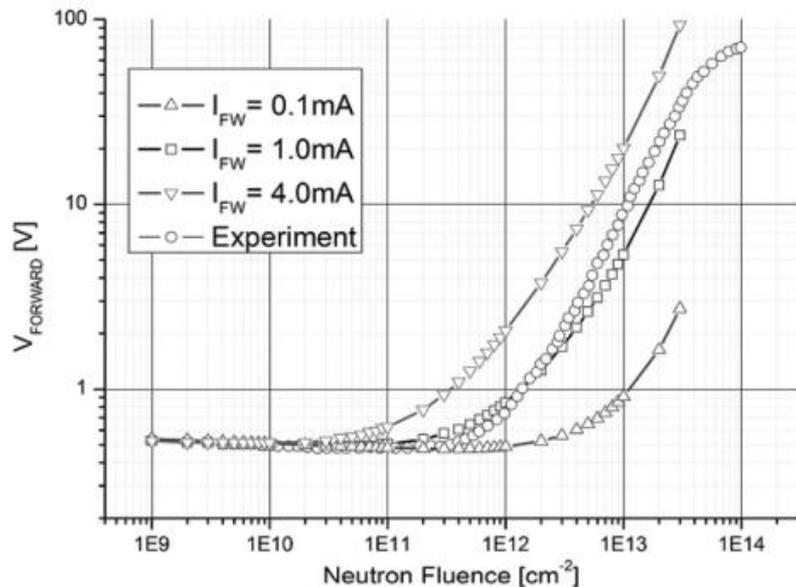


Рис. 3 - Зависимость  $V_f$  от флюенса нейтронов[3]

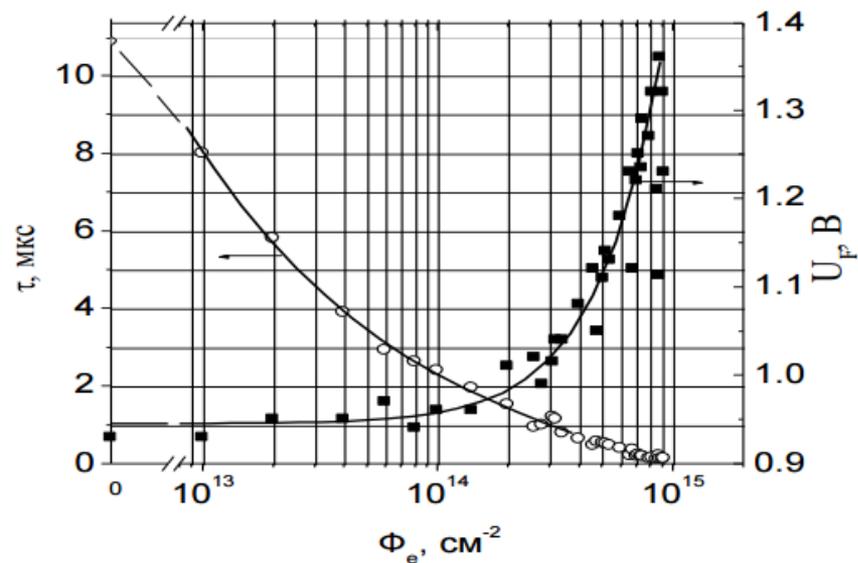


Рис. 4 - Зависимость времени жизни носителей заряда от флюенса нейтронов

[3] - V. Kushpil, S. Kushpil and Z. Huna A simple device for the measurement of kerma based on commercial PIN photo diodes



- Было проведено два эксперимента на **циклотроне U-120M**: 21.09.2016 и 23.11.2016
- Задачи экспериментов: получить зависимость  $Q$  и  $V_f$  от флюенса нейтронов
- Определить самоотжиг фотодиода
- Проанализировать результаты, выполнить калибровку

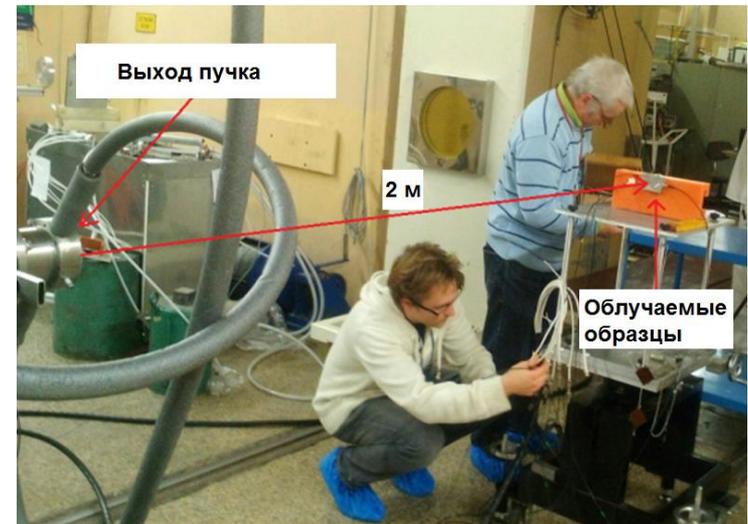


Рис. 5 - фотография экспериментальной установки

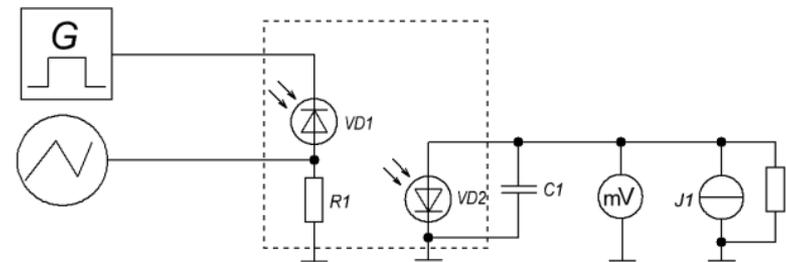


Рис. 6 – упрощенная схема экспериментальной установки



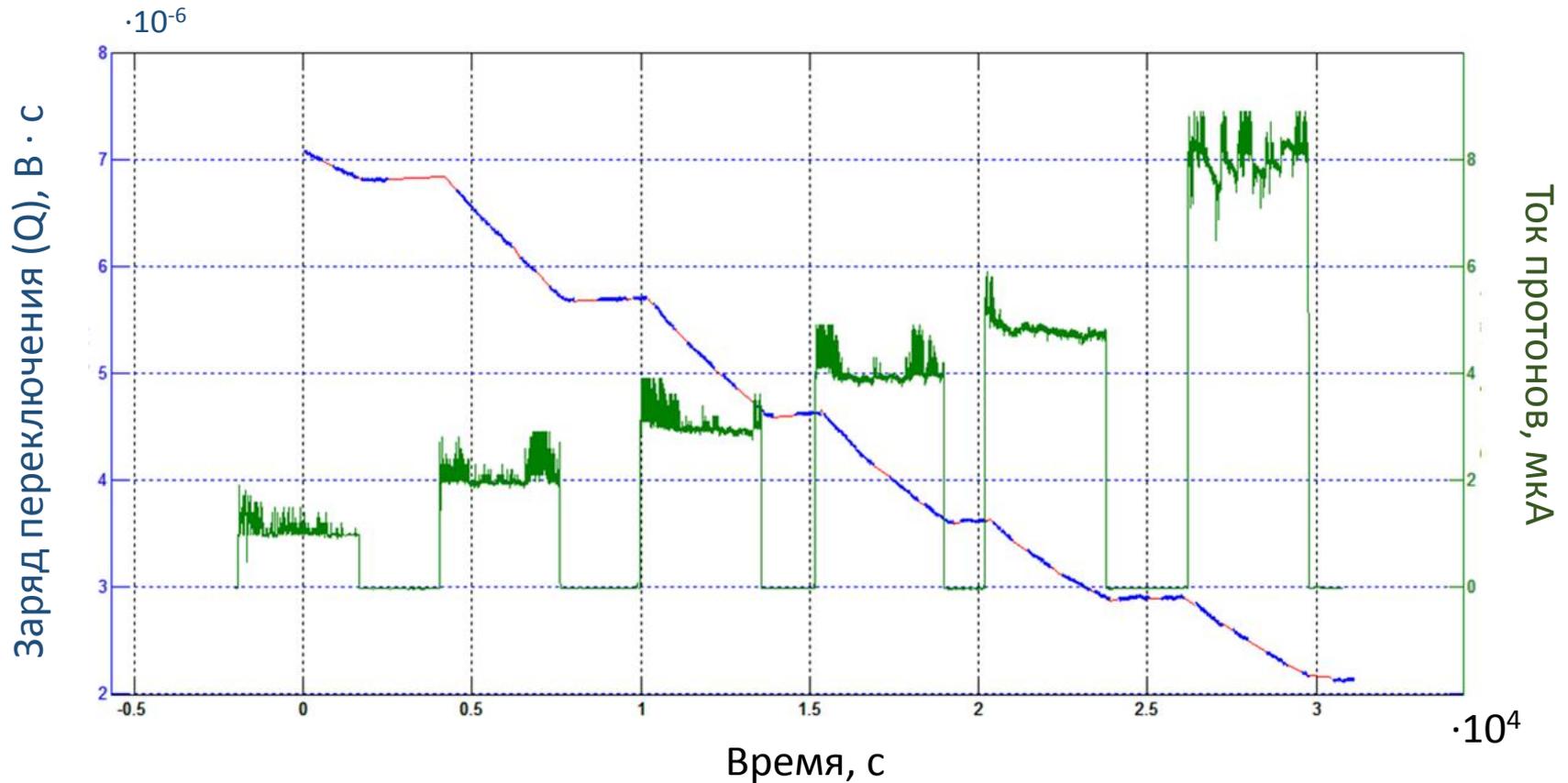


Рис. 7 – Зависимость заряда переключения от времени

За 68 дней изменение заряда составило от  $2,14 \cdot 10^{-6}$  до  $5,28 \cdot 10^{-6}$



Таблица 1 - Эксперимент от 21.09.2016

Ток протонов, мкА	Коэффициент наклона, В·10 <sup>-11</sup>
1	-15,12
2	-34,27
3	-29,29
4	-32,86
5	-16,82
8	-27,38

Таблица 2 - Эксперимент от 23.11.2016

Ток протонов, мкА	Коэффициент наклона, В·10 <sup>-11</sup>
1	-7,2442
2	-6,601
3	-9,302
4	-11,714
5	-13,047

- Отсутствие корреляции можно объяснить независимостью процессов **самоотжига и деградации кристаллической решетки**
- Ранее был экспериментально определен флюенс нейтронов на расстоянии 2 м от выхода пучка, что позволяет построить **калибровочную кривую**

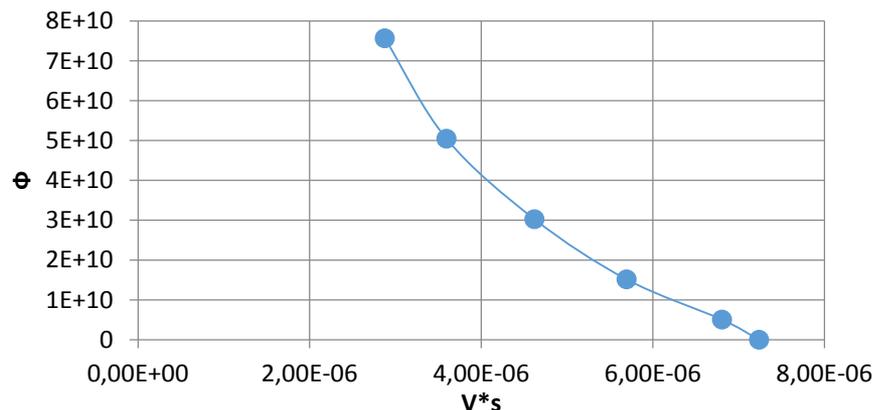
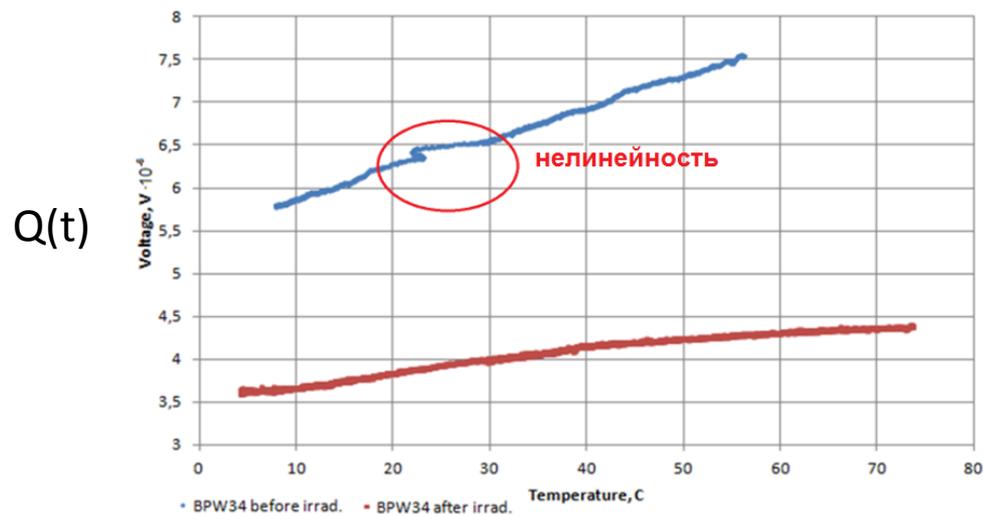
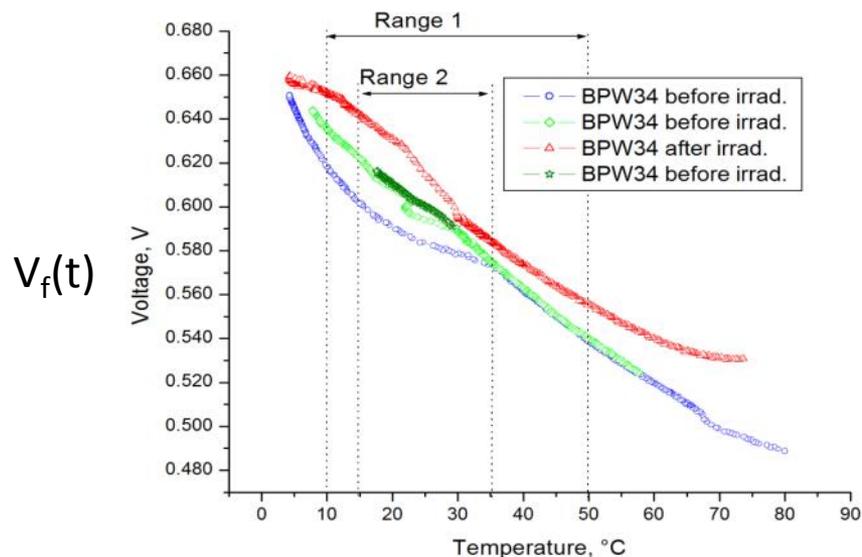


Рис. 8— Зависимость заряда переключения от флюенса



- В пенопластовый закрытый контейнер были помещены исследуемые образцы и датчик температуры
- Нагрев осуществлялся с помощью высокоомощного резистора
- Охлаждение образцов ниже температуры окружающей среды осуществлялось с помощью льда
- Были определены температурные коэффициенты



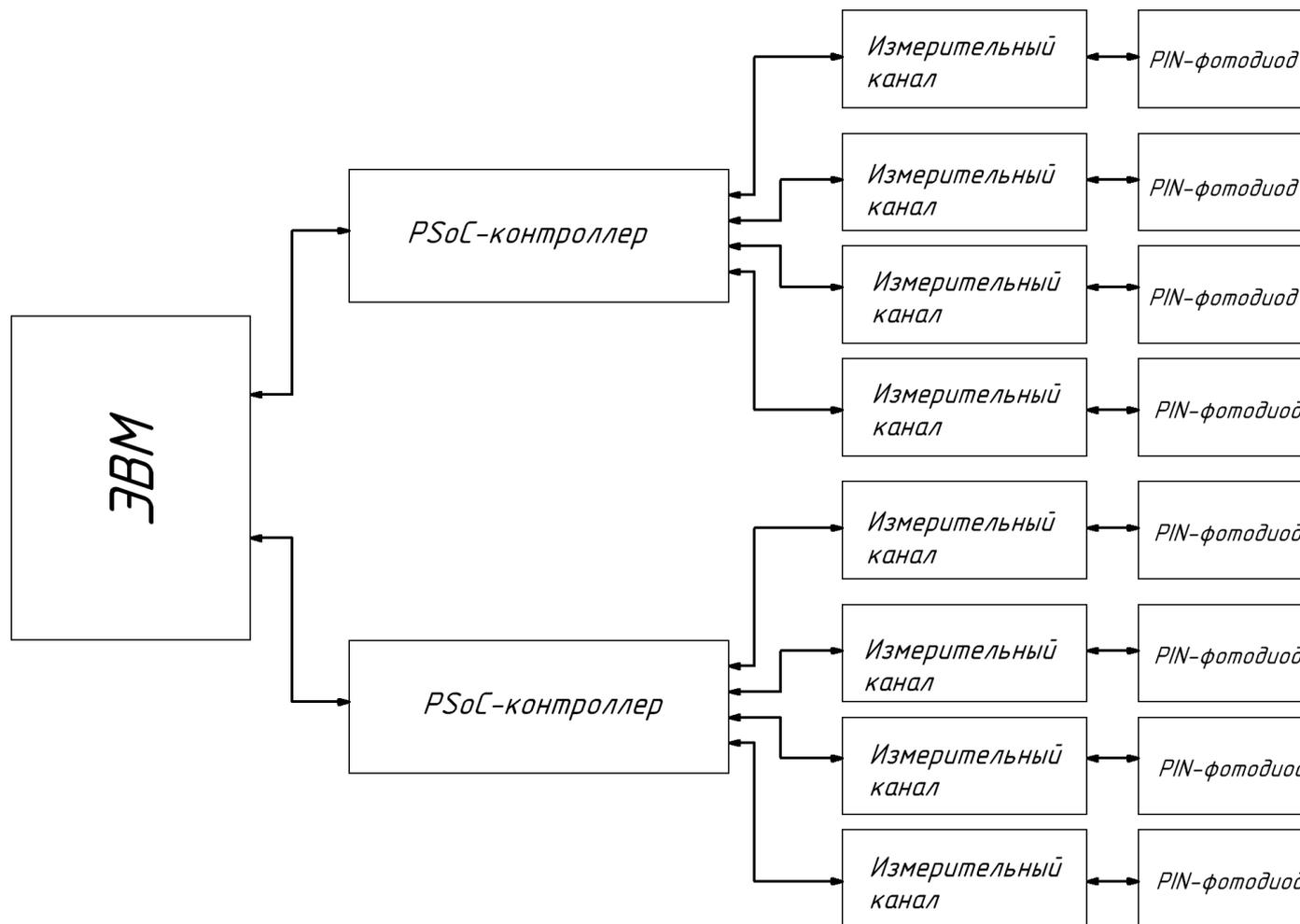


Рис. 8 – Структурная схема системы считывания



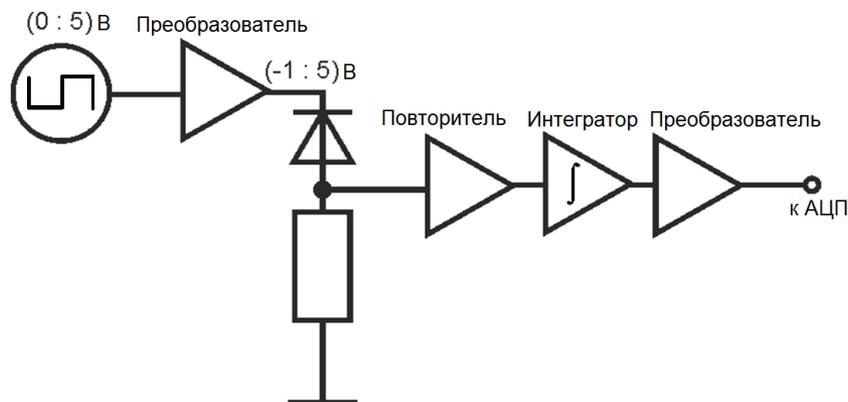


Рис. 9 – Структура измерителя заряда

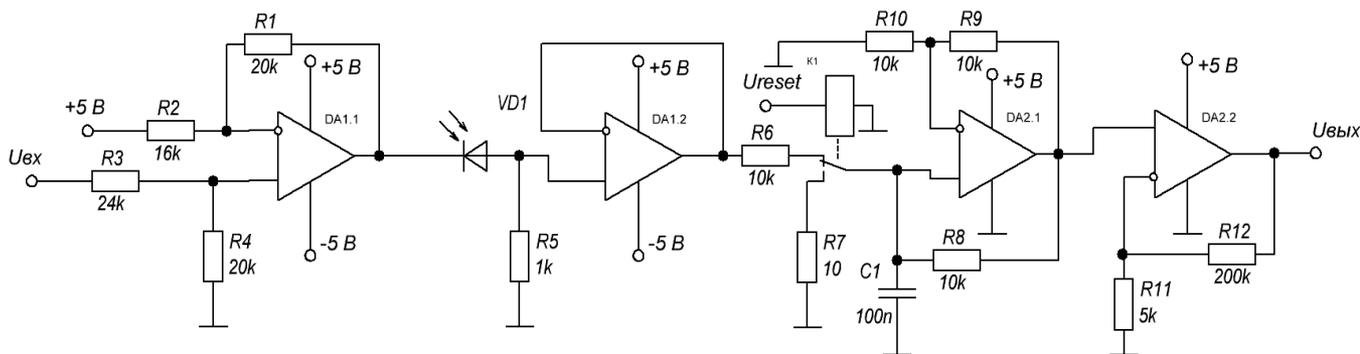


Рис. 10 – Принципиальная схема измерителя заряда



- Работа схемы с моделями операционных усилителей **MAX4477** была просимулирована в программе LTSpice
- Наблюдается **запаздывание** в работе схемы
- При оценке влияния ширины импульса на выходное значение **интегратора Deboo** была выявлена **линейная зависимость**, что позволяет использовать MAX4477 в данной работе

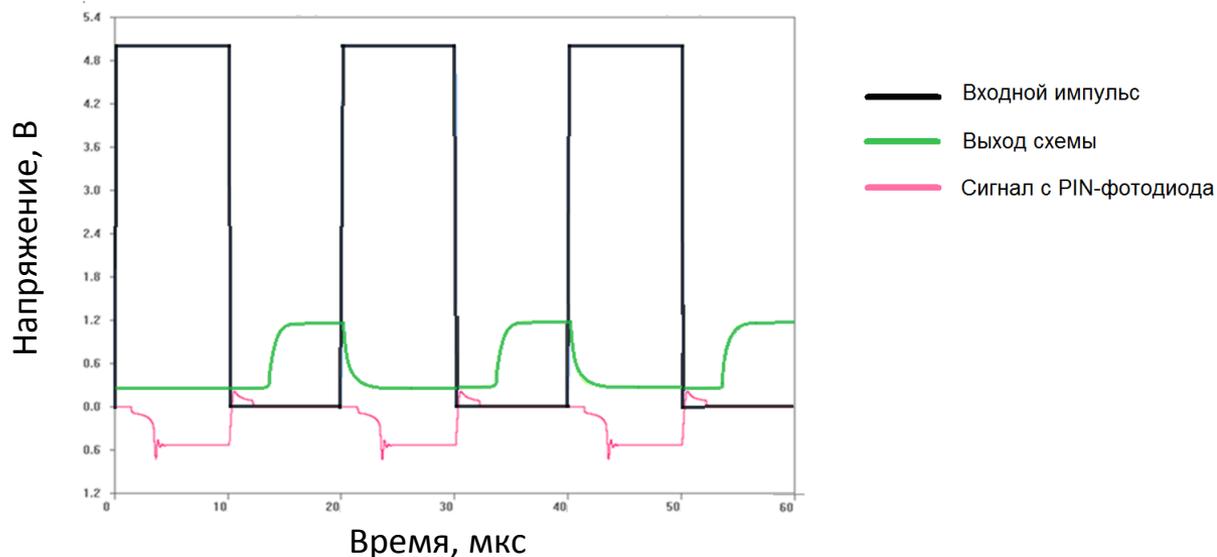


Рис. 11 – Результат SPICE-моделирования

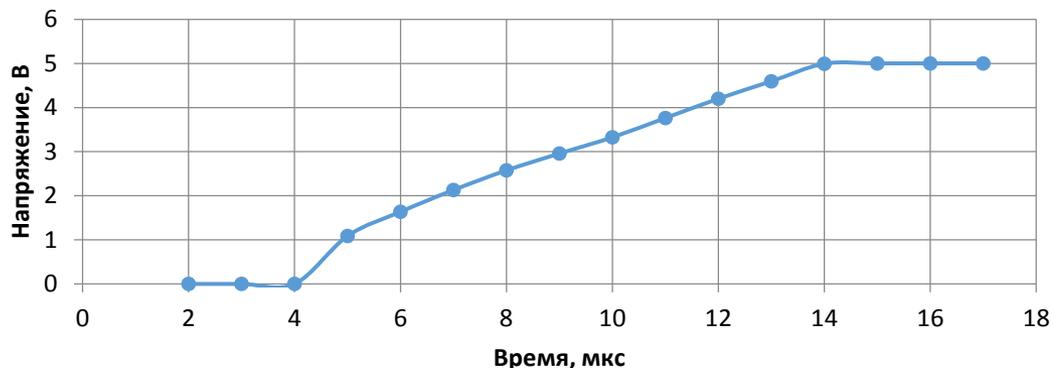


Рис. 12 – Зависимость выходного значения интегратора от длины импульса



- Прототип одного канала измерения был собран на макетной плате
- Формы выходных сигналов **совпадают с симуляцией**

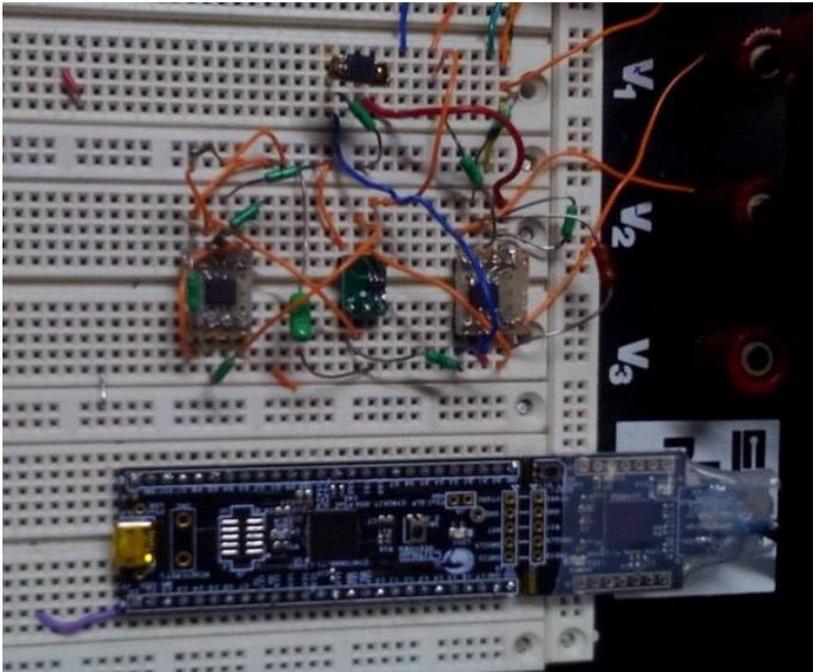


Рис 13. – Внешний вид прототипа

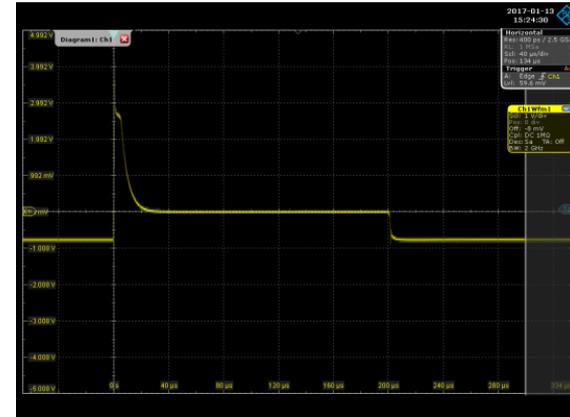


Рис 14. – сигнал с BPW34

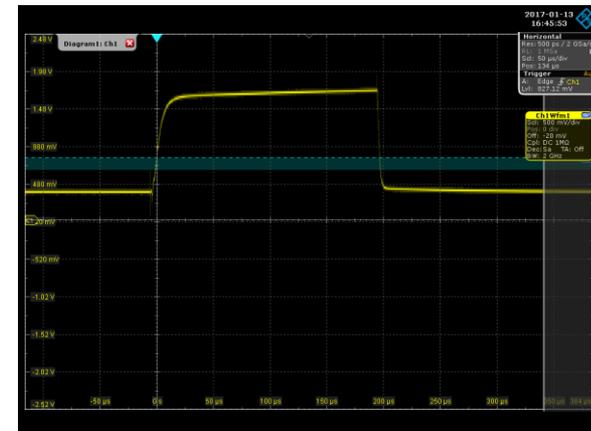


Рис 15. – Выходной сигнал схемы



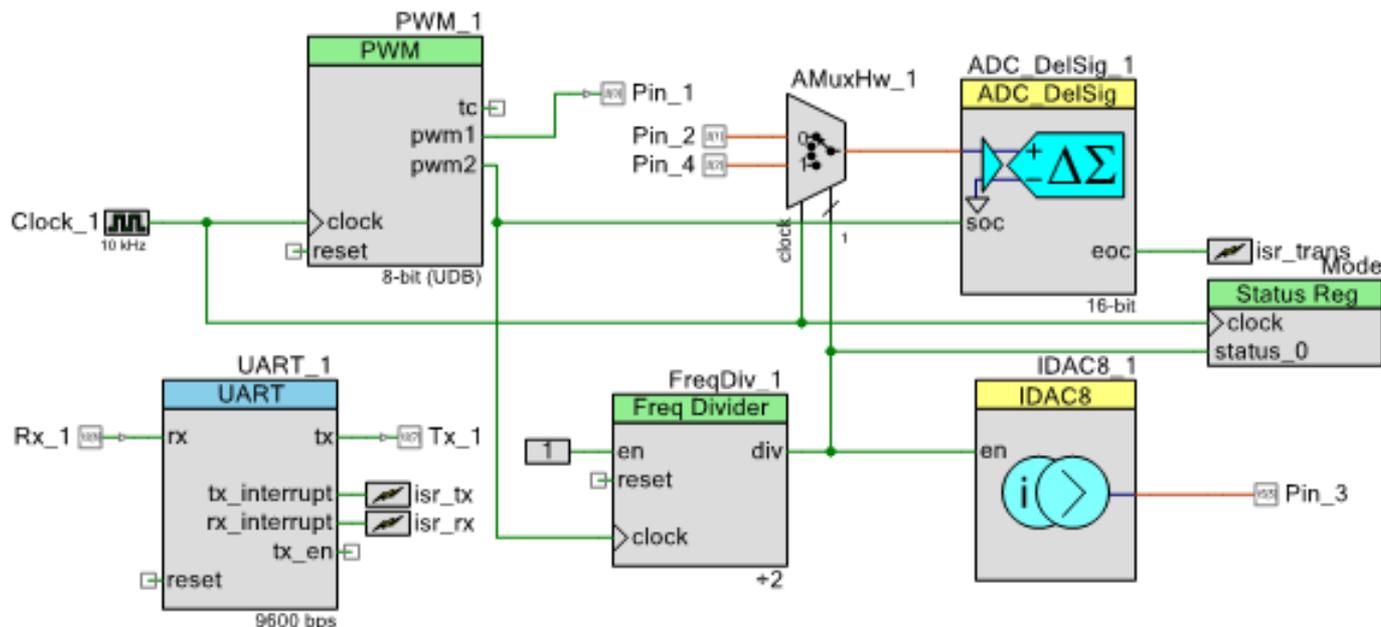


Рис. 16 – структура PSoC-дизайна

Pin\_1 – Выход генератора прямоугольных импульсов

Pin\_2 – Выход схемы интегрирования

Pin\_3 – Выход источника тока

Pin\_4 – Выход датчика PT100



# Блок схема алгоритма считывания

Основной алгоритм работы заложен в обработчике прерывания по окончанию преобразования АЦП `isr_trans`.

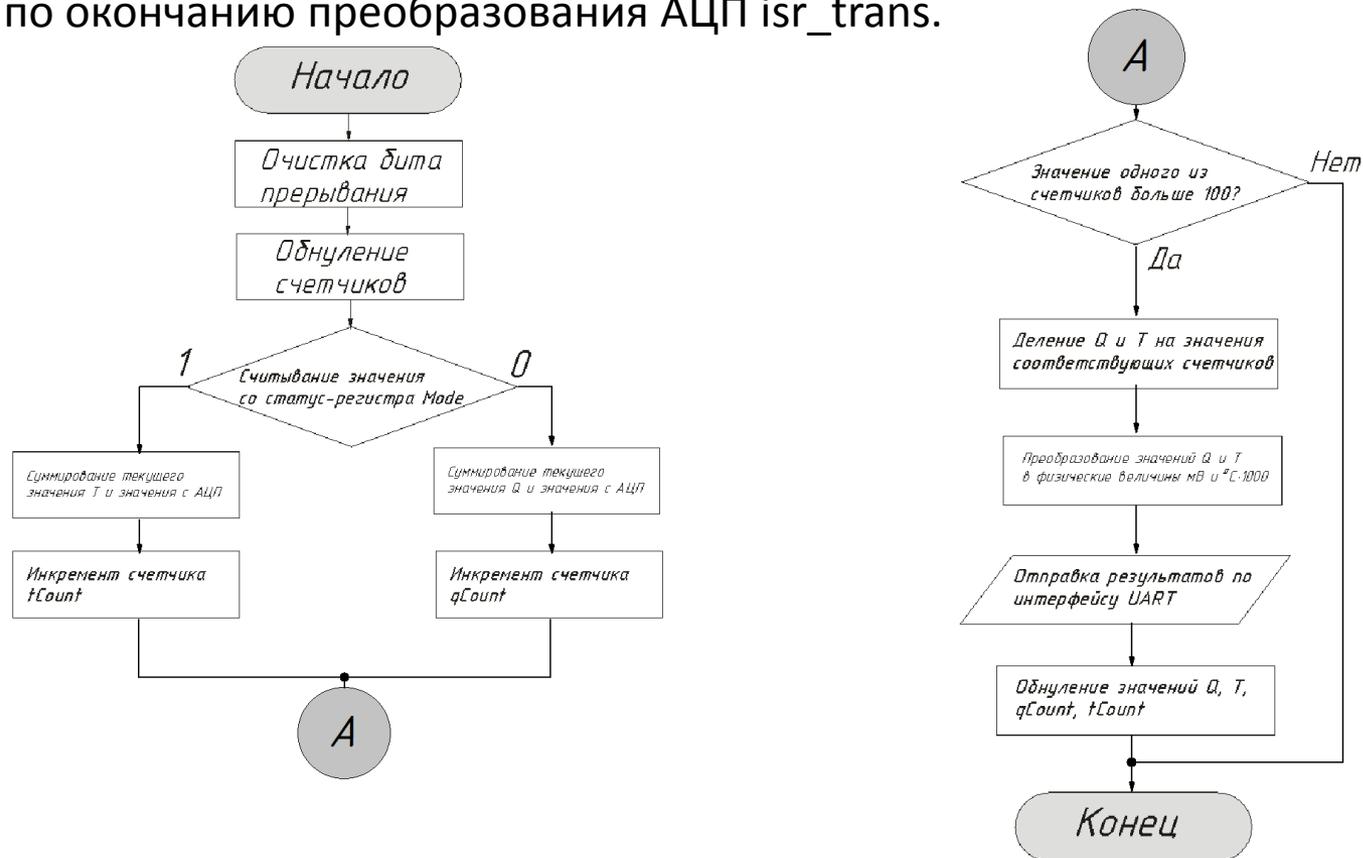


Рис. 17 – Блок-схема обработчика прерываний



Показатель	Значение
Коэффициент конкурентоспособности	4,05
Бюджет проекта, руб.	290000
Стоимость материальных затрат, руб	16000
Общая заработная плата лиц, участвующих в дипломном проекте	94226
Затраты на электроэнергию, руб.	181
Себестоимость проекта, руб	278220,7
Расходы на оборудование с учетом амортизации, руб	135370
Сравнительная эффективность проекта	1,8



- Разработан и протестирован прототип канала измерения заряда переключения системы считывания и анализа данных
- Оценено влияние флюенса нейтронов до  $10^{11}$  н/см<sup>2</sup> на заряд переключения и построена калибровочная прямая
  - Произведена коррекция напряжения прямого включения и заряда переключения по температуре в рабочем диапазоне (15 - 35) °С
  - Разработан алгоритм управления каналом измерения заряда
  - Произведена симуляция работы канала измерения заряда
  - Результаты эксперимента показывают, что зависимость заряда переключения от флюенса нейтронов сложнее, чем ожидалось. Эффекты деградации кристаллической решетки и самоотжига должны подвергнуться дальнейшему изучению

