



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа информационных технологий и робототехники
Направление подготовки 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника»
ООП/ОПОП Программирование вычислительных систем
Отделение школы (НОЦ) Отделение информационных технологий

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

Тема работы
Разработка сопряжения между L2 концентратором и сервером обработки данных для эксперимента SPD ускорительного комплекса NICA

УДК 004.62:621.3.049.77

Обучающийся

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8В11	Ерофеев Дмитрий Витальевич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОИТ ИШИТР ТПУ	Мыцко Евгений Алексеевич	К.Т.Н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент БШ ТПУ	Спицын Владислав Владимирович	К.Э.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОКД ИШНКБ ТПУ	Федоренко Ольга Юрьевна	Д.М.Н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП/ОПОП, должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОИТ ИШИТР ТПУ	Мыцко Евгений Алексеевич	К.Т.Н.		

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОСВОЕНИЯ ООП/ОПОП

Код компетенции	Наименование компетенции
Универсальные компетенции	
УК(У)-1	Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач.
УК(У)-2	Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений.
УК(У)-3	Способен осуществлять социальное взаимодействие и реализовывать свою роль в команде.
УК(У)-4	Способен осуществлять деловую коммуникацию в устной и письменной формах на государственном языке Российской Федерации и иностранном(-ых) языке(-ах).
УК(У)-5	Способен воспринимать межкультурное разнообразие общества в социально-историческом, этическом и философском контекстах.
УК(У)-6	Способен управлять своим временем, выстраивать и реализовывать траекторию саморазвития на основе принципов образования в течение всей жизни.
УК(У)-7	Способен поддерживать должный уровень физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности.
УК(У)-8	Способен создавать и поддерживать в повседневной жизни и в профессиональной деятельности безопасные условия жизнедеятельности для сохранения природной среды, обеспечения устойчивого развития общества, в том числе при угрозе и возникновении чрезвычайных ситуаций и военных конфликтов.
УК(У)-9	Способен использовать базовые дефектологические знания в социальной и профессиональных сферах.
УК(У)-10	Способен принимать обоснованные экономические решения в различных областях жизнедеятельности
УК(У)-11	Способен формировать нетерпимое отношение к коррупционному поведению
УК(У)-12	Способен проявлять предприимчивость в практической деятельности, в т.ч. в рамках разработки коммерчески перспективного продукта на основе научно-технической идеи
Общепрофессиональные компетенции	
ОПК(У)-1	Способен применять естественнонаучные и общетехнические знания, методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования в профессиональной деятельности.
ОПК(У)-2	Способен понимать принципы работы современных информационных технологий и программных средств, в том числе отечественного производства, и использовать их при решении задач профессиональной деятельности.
ОПК(У)-3	Способен решать стандартные задачи профессиональной деятельности на основе информационной и библиографической культуры с применением информационно-коммуникационных

Код компетенции	Наименование компетенции
	технологий и с учетом основных требований информационной безопасности.
ОПК(У)-4	Способен участвовать в разработке стандартов, норм и правил, а также технической документации, связанной с профессиональной деятельностью.
ОПК(У)-5	Способен устанавливать программное и аппаратное обеспечение для информационных и автоматизированных систем.
ОПК(У)-6	Способен разрабатывать бизнес-планы и технические задания на оснащение отделов, лабораторий, офисов компьютерным и сетевым оборудованием.
ОПК(У)-7	Способен участвовать в настройке и наладке программно-аппаратных комплексов.
ОПК(У)-8	Способен разрабатывать алгоритмы и программы, пригодные для практического применения.
ОПК(У)-9	Способен осваивать методики использования программных средств для решения практических задач.
Профессиональные компетенции	
ПК(У)-1	Способен разрабатывать требования и проектировать программное обеспечение.
ПК(У)-2	Способен разрабатывать электрические схемы и характеризовать стандартные ячейки библиотеки.
ПК(У)-3	Способен разрабатывать компоненты системных программных продуктов.
ПК(У)-4	Способен разрабатывать поведенческие описания моделей стандартных ячеек и разрабатывать техническую документацию на состав библиотеки стандартных ячеек.
ПК(У)-5	Способен оптимизировать использование ресурсов сетевых устройств и операционных систем программно-конфигурируемых инфокоммуникационных сетей.



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа – Инженерная школа информационных технологий и робототехники
Направление подготовки – 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника»
Отделение школы (НОЦ) – Отделение информационных технологий

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП/ОПОП

(Подпись) (Дата) Мыцко Е.А.
(ФИО)

ЗАДАНИЕ на выполнение выпускной квалификационной работы

Обучающийся:

Группа	ФИО
8В11	Ерофеев Дмитрий Витальевич

Тема работы:

Разработка сопряжения между L2 концентратором и сервером обработки данных для эксперимента SPD ускорительного комплекса NICA	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№140-6/с от 20.05.2025

Срок сдачи обучающимся выполненной работы:	09.06.2025
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Объектом исследования является прототип аппаратно-программного комплекса для сопряжения L2 концентратора с сервером обработки данных в эксперименте SPD ускорительного комплекса NICA, включающий программный интерфейс взаимодействия на языке C и аппаратную часть на базе ПЛИС с использованием ядра прямого доступа к памяти. Разработанный аппаратно-программный комплекс обеспечивает передачу данных с высокой пропускной способностью, а также кластеризацию потока.
Перечень разделов пояснительной записки подлежащих исследованию, проектированию и разработке	<ul style="list-style-type: none"> – Обзор литературы предметной области; – Анализ существующих решений; – Обзор технологий и инструментов разработки; – Общий обзор проекта; – Проектирование и реализация первой версии прототипа архитектуры сопряжения L2 концентратора с сервером обработки данных, включая разработку архитектуры сопряжения на

	<p>языке описания аппаратуры SystemVerilog;</p> <ul style="list-style-type: none"> – Проектирование и реализация второй версии прототипа архитектуры сопряжения, включая разработку прототипа API для взаимодействия сервера обработки данных и L2 концентратором, улучшение архитектуры ПЛИС; – Разработка алгоритмов кластеризации; – Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение; – Социальная ответственность.
Перечень графического материала	<ol style="list-style-type: none"> 1. Структурная схема взаимодействия компонентов системы цепочки считывания в эксперименте SPD 2. Структурная схема общей архитектуры L2 концентратора 3. Структурная схема первой версии архитектуры сопряжения L2 концентратора с сервером обработки данных 4. Блок-схема API 5. Структурная схема второй версии архитектуры сопряжения L2 концентратора с сервером обработки данных 6. Структурная схема архитектуры кластеризации 7. Рисунки, демонстрирующие результаты работы

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность, ресурсосбережение	Спицын Владислав Владимирович Доцент БШ ТПУ, к.э.н.
Социальная ответственность	Федоренко Ольга Юрьевна Профессор ОКД ИШНКБ ТПУ, д.м.н.

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	31.01.2025
---	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОИТ ИШИТР ТПУ	Мыцко Евгений Алексеевич	к.т.н.		31.01.25

Задание принял к исполнению обучающийся:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8В11	Ерофеев Дмитрий Витальевич		31.01.25



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа информационных технологий и робототехники
Направление подготовки 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника»
ООП/ОПОП Программирование вычислительных и телекоммуникационных систем
Уровень образования Бакалавриат
Отделение школы (НОЦ) Отделение информационных технологий
Период выполнения _____ (весенний семестр 2023/2024 учебного года)

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН

выполнения выпускной квалификационной работы

Обучающийся:

Группа	ФИО
8В11	Ерофеев Дмитрий Витальевич

Тема работы:

Разработка сопряжения между L2 концентратором и сервером обработки данных для эксперимента SPD ускорительного комплекса NICA
--

Срок сдачи обучающимся выполненной работы:	09.06.2025
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
06.02.2025	Анализ аналогичных решений	5
13.02.2025	Анализ современных технологий и инструментов разработки	5
27.02.2025	Обзор компонентов системы «L2 концентратор-Сервер обработки данных»	10
20.03.2025	Проектирование системы	15
05.04.2025	Сборка тестового стенда и разработка архитектуры ПЛИС	30
01.05.2025	Разработка API для взаимодействия сервера обработки данных с L2 концентратором и анализа пропускной способности	10
15.05.2025	Разработка алгоритмов кластеризации	5
20.05.2025	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	10
29.05.2025	Социальная ответственность	10

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОИТ ИШИТР ТПУ	Мыцко Евгений Алексеевич	к.т.н.		31.01.2025

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП/ОПОП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОИТ ИШИТР ТПУ	Мыцко Евгений Алексеевич	к.т.н.		31.01.2025

Обучающийся

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8В11	Ерофеев Дмитрий Витальевич		31.01.2025

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 85 с., 21 р., 12 табл., 35 источников.

Ключевые слова: ПЛИС, NICA, SPD, физика высоких энергий, алгоритмы сбора данных, детекторная электроника, PCI Express, прямой доступ к памяти, кластеризация, API, системное программирование

Данная работа посвящена разработке аппаратно-программного комплекса для сопряжения L2 концентратора на базе ПЛИС и сервера обработки данных в эксперименте SPD ускорительного комплекса NICA. Он обеспечивает высокоскоростную передачу данных через интерфейс PCI Express и модуль прямого доступа к памяти с помощью специального API на языке C и архитектуры сопряжения L2 концентратора. Проведён анализ производительности и выявлены потенциальные ограничения используемого решения прямого доступа к памяти. Проведено тестирование с объёмом переданных данных более 1 Терабайта. Разработан прототип алгоритма кластеризации потока.

Объект разработки — аппаратно-программный интерфейс для сопряжения L2 концентратора с сервером обработки данных.

Цель работы — разработка и реализация аппаратно-программного интерфейса для сопряжения L2 концентратора с сервером обработки данных, обеспечивающего высокую пропускную способность и кластеризацию потока.

Степень внедрения: прототип аппаратно-программного интерфейса с базовой реализацией кластеризации в симуляции.

Область применения: эксперимент SPD ускорительного комплекса NICA, телекоммуникации, обработка потоковых данных в реальном времени.

В будущем планируется реализация кластеризации непосредственно на ПЛИС, оптимизация пропускной способности за счёт перехода с нынешнего ядра прямого доступа к памяти на более производительные решения, а также расширение программного интерфейса.

Содержание

Введение	10
Определения, обозначения, сокращения	13
Определения	13
Обозначения и сокращения	15
Обзор литературы.....	17
1. Исследование предметной области	19
1.1 Обзор конкурентных решений.....	19
1.2. Обзор аппаратных компонентов проекта.....	21
1.3. Обзор инструментов разработки.....	25
2. Общий обзор проекта.....	27
2.1. Readout chain.....	27
2.2. Архитектура L2 концентратора	28
2.3. Ресурсы аппаратной платформы.....	31
3. Разработка сопряжения между L2 концентратором и сервером обработки данных	32
3.1. Требования и задачи	32
3.2. Проектирование и разработка первой версии сопряжения	33
3.3. Проектирование и разработка обновлённой версии сопряжения.....	36
3.4. Разработка алгоритма кластеризации.....	41
4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение..	47
4.1. Продукт, конкуренты и анализ рынка.....	47
4.1.1. Описание продукта и его конкурентных преимуществ.....	47
4.1.2. Целевой сегмент рынка.....	49
4.1.3. Определение емкости рынка и объема продаж	51
4.2. Организация производства и планирование затрат	53
4.2.1. Организация производства.....	53
4.2.2. Расчет затрат на производство	55
4.3. Финансовые ресурсы и эффективность проекта	56
4.3.1. Прогноз денежных потоков и эффективность проекта	56
4.3.2. Финансовые ресурсы проекта.	58
4.3.3 Стратегия продвижения продукта на рынок.....	58
4.4. Выводы по разделу.....	60
5. Социальная ответственность	64
5.1. Введение.....	64

5.3. Производственная безопасность.....	65
5.3.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов	67
5.4. Экологическая безопасность.....	75
5.5. Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	75
5.6. Заключение по разделу	77
Заключение	79
Список использованных источников	81

Введение

Современные физические эксперименты в области высоких энергий, такие как эксперимент SPD (Spin Physics Detector) в рамках проекта NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility) [1,2,3,4], требуют построения сложных систем сбора, передачи и обработки большого объёма экспериментальных данных. В таких экспериментах применяются многоуровневые архитектуры, включающие иерархически организованные концентраторы данных, распределённые вычислительные комплексы и интегральные устройства с высокой пропускной способностью [5].

Одним из таких компонентов является L2 концентратор (концентратор второго уровня) в эксперименте SPD (Spin Physics Detector) [6, с. 285], предназначенный для агрегации каналов данных с L1 концентратора и передачи информации на сервер обработки данных.

Разработка интерфейса сопряжения L2-концентратора с сервером — важная инженерная задача, обеспечивающая корректную и быструю доставку экспериментальных данных в систему дальнейшей обработки. В рамках данной выпускной квалификационной работы была поставлена задача создания аппаратно-программного интерфейса на базе ПЛИС, работающего по шине PCI Express с использованием ядра прямого доступа к памяти, а также соответствующего программного обеспечения (API) со стороны сервера обработки данных. Кроме того, была поставлена задача по разработке алгоритма кластеризации данных.

Объект разработки — аппаратно-программный интерфейс для сопряжения L2 концентратора с сервером обработки данных в рамках физического эксперимента SPD.

Цель работы — разработка и реализация аппаратно-программного интерфейса для сопряжения L2 концентратора с сервером обработки данных, обеспечивающего высокую пропускную способность и кластеризацию потока.

В рамках проекта были решены следующие задачи:

1. Изучение архитектуры сбора данных в эксперименте SPD и требований к интерфейсу «L2–сервер»;
2. Проектирование пользовательской логики в ПЛИС на языке описания аппаратуры SystemVerilog с использованием ядра прямого доступа к памяти;
3. Реализация API на языке C для взаимодействия с устройством через драйвер прямого доступа к памяти и интерфейс PCI Express;
4. Проведение экспериментов по передаче большого объема данных и анализ производительности PCIe;
5. Построение модели кластеризации данных в программной среде;

Значимость работы:

1. Научная: разработка создавалась в рамках реального физического эксперимента SPD и является частью экспериментальной инфраструктуры.
2. Техническая: решение обеспечивает эффективную передачу данных по шине PCIe и может масштабироваться для использования в аналогичных системах.
3. Исследовательская: работа включает в себя экспериментальный анализ производительности, выявление узких мест и предложения по модернизации.

Методы исследования:

1. Анализ технической документации к системе SPD и архитектуре сбора данных, а также к отладочной плате ПЛИС;
2. Исследование существующих решений в других экспериментах физики высоких энергий;
3. Исследование современных инструментов для разработки систем передачи данных через PCI Express на ПЛИС.
5. Исследование пропускной способности PCI Express.
6. Экономический анализ, включающий оценку коммерческой целесообразности и эффективности разработанной системы.

7. Анализ социального контекста, включающий правовые и социальные вопросы безопасности, производственную и экологическую безопасность, а также безопасность при чрезвычайных ситуациях.

Определения, обозначения, сокращения

Определения

В данной работе применены следующие термины с соответствующими определениями:

аппаратно-программный интерфейс: комплекс аппаратных и программных компонентов, обеспечивающий взаимодействие между цифровыми устройствами, при этом часть логики реализуется на уровне ПЛИС, а часть — в прикладном программном обеспечении.

интерфейс передачи данных: способ организации двунаправленного или однонаправленного обмена информацией между устройствами, включающий в себя физические линии, протокол и логический уровень управления передачей.

шина PCI Express (PCIe): высокоскоростной последовательный интерфейс, предназначенный для подключения периферийных устройств к материнской плате и обеспечивающий передачу данных с большой пропускной способностью.

ядро прямого доступа к памяти: готовый модуль, предоставляющий доступ к памяти хоста (DMA) через интерфейс PCIe и упрощающий реализацию пользовательской логики обмена данными между ПЛИС и компьютером.

кластеризация данных: метод группировки входного потока данных по определённым признакам (временным, географическим, логическим) с целью последующего анализа или фильтрации.

буферизация данных: процесс временного хранения потока информации в памяти для согласования скорости между различными компонентами системы передачи.

API (Application Programming Interface): программный интерфейс, предоставляющий функции для взаимодействия прикладного уровня с аппаратной частью, обеспечивая доступ к данным, передаваемым через PCIe.

входной поток данных: непрерывная или квазинепрерывная последовательность цифровых сообщений (кадров), поступающих от предыдущего уровня (концентратора L1) к L2 концентратору и серверу обработки данных.

пользовательская логика (User Logic): часть аппаратной реализации в ПЛИС, разрабатываемая пользователем и отвечающая за обработку данных, взаимодействие с модульными ядрами и реализацию специфических функций.

L2 концентратор: устройство промежуточного уровня в системе сбора данных, агрегирующее входящий поток от нижестоящих концентраторов и передающее его на сервер обработки данных.

L1 концентратор: устройство первого уровня в иерархии сбора данных, соединённое с фронт-энд электроникой (FEE), отвечающее за первичную агрегацию и синхронизацию данных, поступающих от детекторов SPD. Принимает команды от системы синхронизации времени (TSS) и передаёт данные на концентратор второго уровня (L2) через высокоскоростные оптические каналы.

сервер обработки данных: вычислительный узел, получающий агрегированные данные от L2-концентраторов и участвующий в процессе построения «срезов» (slices). Выполняет фильтрацию, хранение и (частично) онлайн-анализ событий в системе SBS.

Slice Building System (SBS): подсистема, обеспечивающая сбор, агрегирование и обработку данных от L2-концентраторов в рамках одной временной единицы (Slice). Состоит из множества процессов (reader, builder, supervisor и distributor), распределённых по нескольким вычислительным узлам, и обеспечивает передачу полученных данных на хранение и мониторинг.

TSS (Trigger and Synchronization System): это система триггера и синхронизации, играющая критически важную роль в системах сбора данных (DAQ) в физических экспериментах.

SMART NIC (Smart Network Interface Card): это "умная" сетевая карта, в которой обработка сетевого трафика осуществляется не только традиционными средствами (процессором хоста), но и аппаратно, непосредственно на самой карте. SMART NIC на базе FPGA использует программируемую логическую матрицу (ПЛИС) для кастомной, параллельной и низкоуровневой обработки сетевых пакетов в обход CPU и ОС.

ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS): "Тороидальный детектор на Большом адронном коллайдере".

Ethernet: это технология локальных сетей (LAN), предназначенная для передачи данных между устройствами по кабелю с использованием стандартизированного протокола.

Slice: единица агрегирования событий во времени в эксперименте SPD.

Frame: единица агрегирования событий во времени, объединяющая в себе несколько Slice.

Run: запуск эксперимента, содержащий в себе множество Frame.

Обозначения и сокращения

В данной работе применены следующие обозначения и сокращения:

SPD — Spin Physics Detector

NICA — Nuclotron-based Ion Collider fAcilit

ОИЯИ — Объединённый институт ядерных исследований

ПЛИС — программируемая логическая интегральная схема

PCIe — Peripheral Component Interconnect Express

DMA — Direct Memory Access

AXI — Advanced eXtensible Interface

MAC — Media Access Control

FIFO — First-In First-Out

DDR4 — Double Data Rate 4

DRAM — Dynamic Random Access Memory

GBT — GigaBit Transceiver

SFP — Small Form-factor Pluggable
FMC — FPGA Mezzanine Card
ECC — Error Correction Code
API — Application Programming Interface
Slice — временной срез данных
Frame — агрегированный набор срезов
DAQ — Data Acquisition System
FELIX — Front-End Link eXchange

Обзор литературы

В процессе проектирования аппаратно-программной архитектуры L2-концентратора и построения системы передачи данных для эксперимента SPD была изучена профильная литература и документация, касающаяся как общих принципов построения DAQ-систем, так и конкретных технических решений, применяемых в крупных коллайдерных установках.

Основным источником сведений о системе SPD и её архитектуре послужил технический отчёт SPD TDR [5, 6], в котором подробно описана общая концепция эксперимента, включая структуру DAQ-системы, требования к сбору и агрегации данных, структуру Slice Building System и взаимодействие между отдельными компонентами системами, в том числе с соседними для L2 концентратора L1 концентратором и сервером обработки данных. Из этого источника стало понятно, что система должна функционировать в режиме с высокой частотой взаимодействий (до 4 МГц) и полностью бестриггерной архитектурой, что требует высокой производительности L2-концентраторов и продуманной кластеризации данных.

Для изучения современных архитектур DAQ-систем был проанализирован опыт эксперимента ATLAS, в частности архитектура FELIX (Front-End Link eXchange) [15, 16], использующая ПЛИС для приёма данных по оптическим каналам и передачу их на серверы через PCIe. Аналогично разрабатываемому решению для SPD, Felix реализует взаимодействие между front-end и серверными уровнями через аппаратно-программный интерфейс. Однако в отличие от SPD, система FELIX базируется на триггерной структуре и протоколе GBT, что было учтено при сравнительном анализе.

Также были изучены публикации [8, 9, 17], посвящённые построению сетевой архитектуры на ПЛИС с PCIe в машинном обучении и «SMART NIC FPGA». Это дало представление об аналогах разработки, существующие в других областях помимо физики высоких энергий.

Дополнительно были использованы внутренние наработки проекта [7], в которых рассматриваются особенности разработки конкретной версии всей архитектуры L2 концентратора.

Анализ современной литературы и технической документации позволил сформировать чёткое представление об архитектуре систем сбора данных, применяемых в высокоэнергетических экспериментах, и адаптировать их к условиям SPD. Это, в свою очередь, позволило приступить к реализации собственной архитектуры L2 концентратора, максимально соответствующей поставленным требованиям.

1. Исследование предметной области

1.1 Обзор конкурентных решений

В настоящее время в сфере сбора и агрегации данных в физике высоких энергий существует ряд решений, используемых в различных коллайдерных экспериментах. Ниже рассмотрен наиболее показательный пример, используемый в эксперименте ATLAS.

Самым главным и похожим конкурентным решением является система FELIX (Front-End Link eXchange), применяемая в эксперименте ATLAS на Большом адронном коллайдере (CERN). FELIX представляет собой модульную платформу на базе ПЛИС, обеспечивающую агрегацию данных от фронт-энд устройств с использованием протокола GBT и передачу их на сервер по интерфейсу PCIe (Рис. 1).



Рис. 1 — Аппаратная платформа FLX-182

Архитектурно Felix выполняет роль концентратора данных, аналогично L2 концентратору для SPD. Данные от детекторов поступают в плату Felix через оптические GBT-линки, где затем разбиваются на E-links и группируются в блоки данных. Эти блоки передаются в хост-систему через PCIe, где уже программное обеспечение хоста формирует Ethernet-пакеты и отправляет их в сеть. Таким образом, Felix можно рассматривать как промежуточный уровень между детекторной электроникой и вычислительной системой, обеспечивающий агрегацию и буферизацию потоков данных.

С функциональной точки зрения Felix выполняет роль L2 концентратора, так как агрегирует потоки данных от детектора и передает их в центральную систему обработки. Как и L2 концентратор, Felix позволяет масштабировать систему считывания данных за счет гибкости интерфейсов и возможности обработки пакетов в FPGA перед их отправкой в серверную часть системы. Отличие состоит в используемых протоколах передачи: в системе SPD применяется 10G Ethernet, тогда как Felix использует GBT и E-links. Кроме того, L2 концентратор встроен в принципиально другую систему сбора данных, где агрегация потоков происходит поэтапно и, как было сказано во введении, в DAQ Atlas используется триггерная система, что в корне меняет принцип архитектуры FELIX.

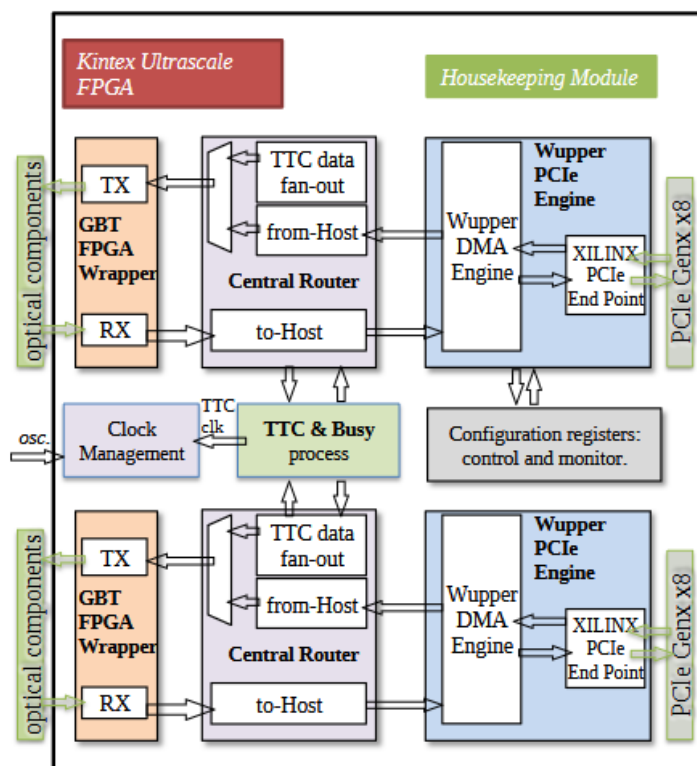


Рис. 2 — Архитектура FELIX

1.2. Обзор аппаратных компонентов проекта

В ходе проведения экспериментов при регистрации детекторами характеристик частиц после столкновения будет генерировать поток данных, скорость которого по приблизительным оценкам составляет около 1 Гбайт/с в первой фазе [20] и 20 Гбайт/с в последней фазе [6, с. 282]. Этот поток включает в себя как физические данные, так и сервисные команды.

Для обеспечения такой пропускной способности для системы сборки данных необходима специальная электроника, осуществляющая прием и многоуровневую обработку данных с последовательной агрегацией потоков данных в один, для передачи на сервер сбора данных. Далее, программное обеспечение сбора и обработки данных осуществляет сборку событий и обработку данных. В данной главе описывается аппаратная платформа L2 концентратора [7].

ПЛИС, FMC и SFP

Архитектура L2 концентратора основана на использовании программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС). ПЛИС предлагает ряд преимуществ перед традиционными сетевыми картами в задачах предобработки и анализа данных [8,9]. В отличие от сетевых карт, ПЛИС предоставляет разработчику возможности по созданию специализированного дизайна для обработки данных. Этим обеспечивается гибкость в реализации различных алгоритмов, возможность итерационной доработки и проверки разработок. В свою очередь, доступные сетевые карты имеют мало портов для оптических кабелей, алгоритмы обработки данных внутри сетевой карты нельзя модифицировать. Использование видеокарты для обработки данных также не желательно из-за необходимости передачи трафика по пути сетевой интерфейс–ОЗУ процессора–видеокарта. В этой цепочке данные будут проходить «бутылочное горлышко» интерфейса к памяти процессора дважды. Доступная коммерческая отладочная плата на ПЛИС, как будет показано далее, поддерживает до 8 оптических портов, что

значительно превосходит возможности стандартных сетевых карт. Таким образом, использование ПЛИС позволяет заменить несколько сетевых карт одной платой и снизить общую нагрузку на вычислительную систему.

Плата оснащена двумя разъемами FMC (FPGA Mezzanine Card) HPC, каждый из которых поддерживает до четырех 10G SFP трансиверов [10,11]. Это позволяет использовать один концентратор второго уровня для агрегации до 8 концентраторов первого уровня, с суммарной пропускной способностью до 80 Гбит/с. После приема пакетов из концентратора L1, данные передаются в сервер обработки данных через интерфейс PCIe 3.0 x16. Детали процесса обработки информации L2 концентратором представлены далее.

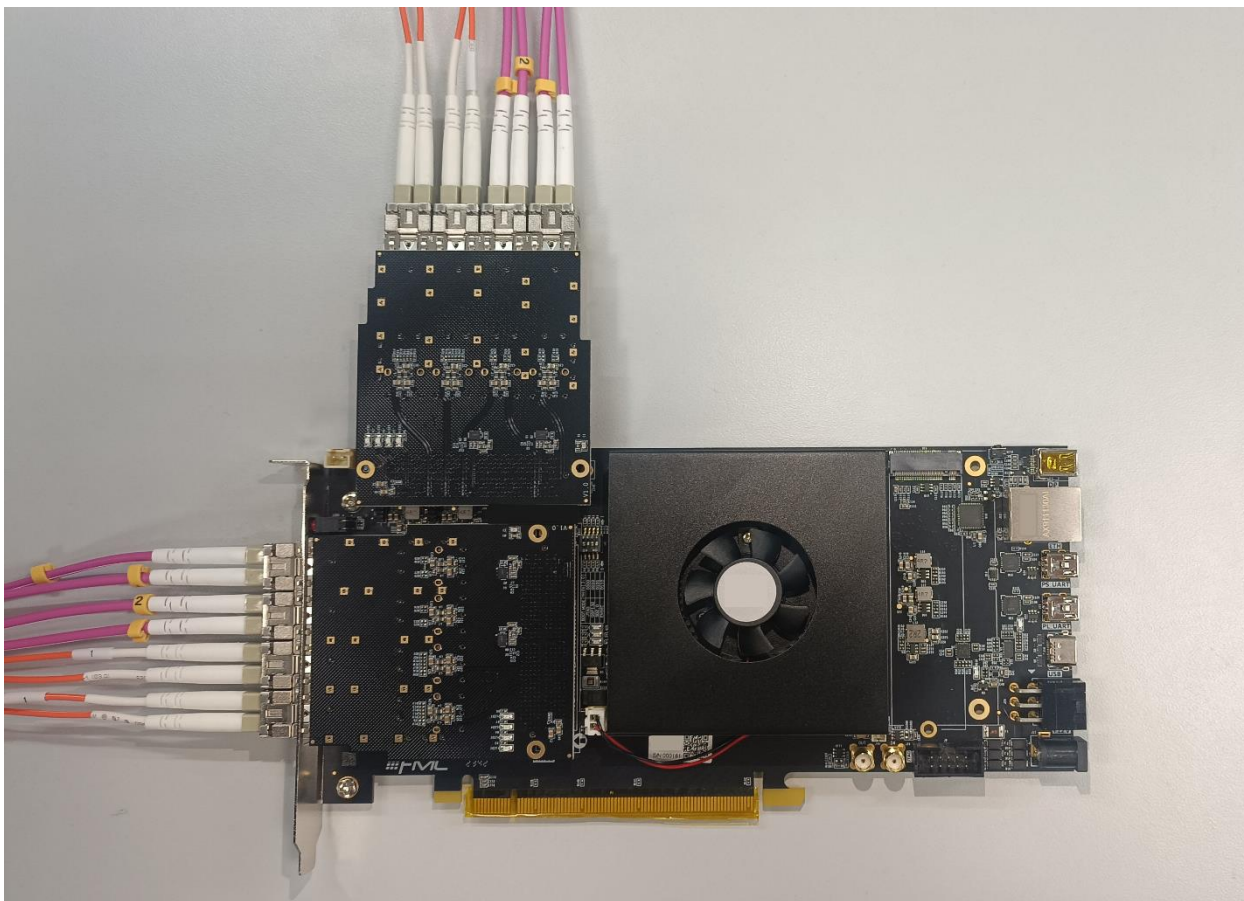


Рис. 3 — Аппаратная платформа L2 концентратора, с подключенными модулями FMC и SFP

Интерфейс PCI Express Gen3 x16

Для взаимодействия с сервером обработки данных, он же тестовый стенд (Рис. 4) применяется высокоскоростной интерфейс PCI Express,

реализованный в конфигурации Gen3 x16, что позволяет передавать данные с пиковой пропускной способностью до 16 ГБ/с. Передача осуществляется по схеме с прямым доступом к памяти (DMA), без участия центрального процессора ПЛИС. Обмен производится между буфером логики и адресным пространством хоста.

Питание и охлаждение

Плата питается от внешнего источника постоянного напряжения 12 В. Внутри устройства реализованы стабилизаторы на необходимые уровни (1.2 В, 3.3 В, 5 В). Для поддержания температурного режима используется активное воздушное охлаждение (радиатор с вентилятором), установленное на корпус ПЛИС. Температура контролируется встроенными средствами и может считываться через интерфейс управления.

Интерфейс JTAG

Для программирования, конфигурации и отладки логики ПЛИС используется стандартный отладочный интерфейс JTAG (Joint Test Action Group). Через данный интерфейс осуществляется загрузка конфигурационного файла (bitstream) в ПЛИС, пошаговая отладка внутренних модулей с использованием встроенных средств диагностики. Интерфейс JTAG позволяет получить доступ к внутренним ресурсам микросхемы без участия внешней логики и используется как основной инструмент аппаратной отладки на всех этапах проектирования.

Сервер обработки данных

Данные от L2-концентратора поступают на сервер, соответствующим классу высокопроизводительных рабочих станций. В тестовой конфигурации использовался шестиядерный процессор, обеспечивающий необходимую вычислительную мощность для приёма входящего потока данных. Операционная система — Linux, обмен с ПЛИС осуществляется через пользовательский API, взаимодействующий с PCIe-драйвером.

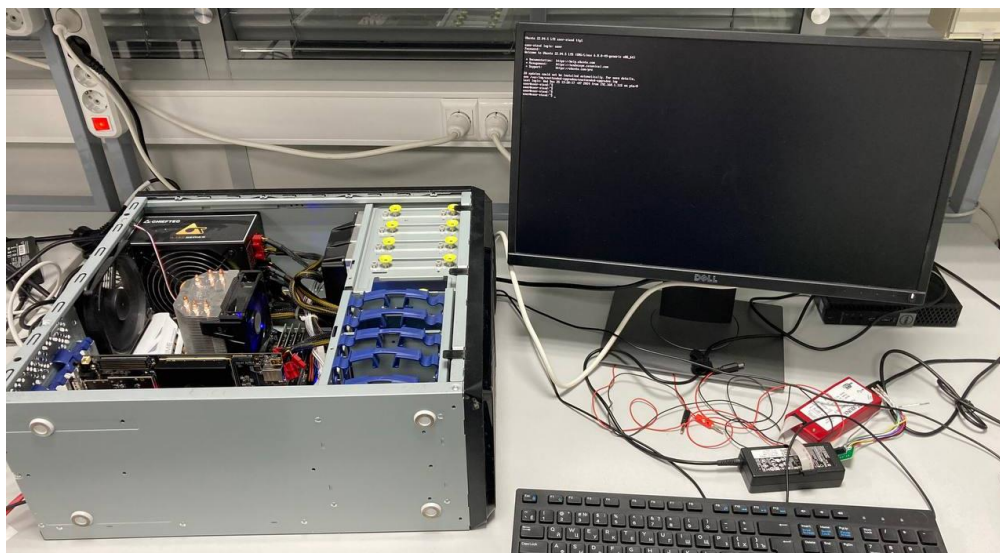


Рис. 4 — Собранный тестовый стенд «L2 коцентратор-Сервер обработки данных»

1.3. Обзор инструментов разработки

В данном подразделе рассматриваются программные и аппаратно-зависимые инструменты, применявшиеся в процессе разработки аппаратной и программной части L2-концентратора. Инструменты подбирались исходя из требований к низкоуровневому управлению логикой ПЛИС, взаимодействию через шину PCI Express и организации тестирования на стороне сервера.

Среда для разработки пользовательской логики ПЛИС

Разработка логических блоков, реализуемых в программируемой логической интегральной схеме, осуществлялась с использованием языков описания аппаратуры, в частности Verilog и SystemVerilog. Используемые средства моделирования и синтеза поддерживают создание модулей, взаимодействующих по интерфейсам AXI, а также модулей для передачи данных через PCIe. Процесс проектирования включает разработку архитектуры модулей ПЛИС, синтез проектных файлов и загрузку в ПЛИС, отладку через JTAG.

Средства отладки

Отладка аппаратной части L2 концентратора осуществлялась с применением двух классов инструментов: функционального моделирования и встроенного аппаратного анализа. Для предварительной проверки логики использовался HDL-симулятор с поддержкой языка описания аппаратуры SystemVerilog, позволяющий проводить поведенческое и временное моделирование проектных модулей. Через тестовые среды (testbenches) моделировались входные пакеты, проверялась работа алгоритмов кластеризации. Результаты моделирования сохранялись во внешние файлы с помощью конструкций \$writememh, что позволяло анализировать поведение системы на разных этапах без необходимости синтеза.

После синтеза проекта и загрузки его в ПЛИС отладка продолжалась средствами встроенного логического анализа. Внутренние сигналы выводились на диагностический интерфейс через интегрированные в проект

модули захвата. Эти модули подключались к отладочному интерфейсу, что позволяло осуществлять постфактум-анализ поведения системы в реальном времени. Поддержка условий срабатывания (trigger) обеспечивала захват интересующих событий с высокой точностью, что особенно важно при выявлении редких сбоев или временных гонок.

Язык программирования C

Разработка прикладного программного интерфейса, реализующего взаимодействие с L2-концентратором на стороне сервера, велась на языке программирования C. Выбор данного языка обусловлен его низкоуровневым характером, эффективной работой с памятью и широкими возможностями прямого доступа к регистрам устройств. API, реализованный в рамках проекта, обеспечивает инициализацию передачи данных по PCI Express, управление логикой DMA-обмена, а также сбор статистики, необходимой для анализа пропускной способности.

2. Общий обзор проекта

2.1. Readout chain

Обработка данных в эксперименте SPD делится на два условных этапа: Online-обработка и Offline-обработка. Online-обработка – это фильтрация и сортировка информации в непосредственной близости к детектору сначала на интегральных устройствах, а затем на серверах. Offline-фильтр представляет собой традиционный анализ готовых данных из хранилища на компьютерах. Важнейшей частью Online-обработки является Readout chain (Рис. 5) [6, с. 284].

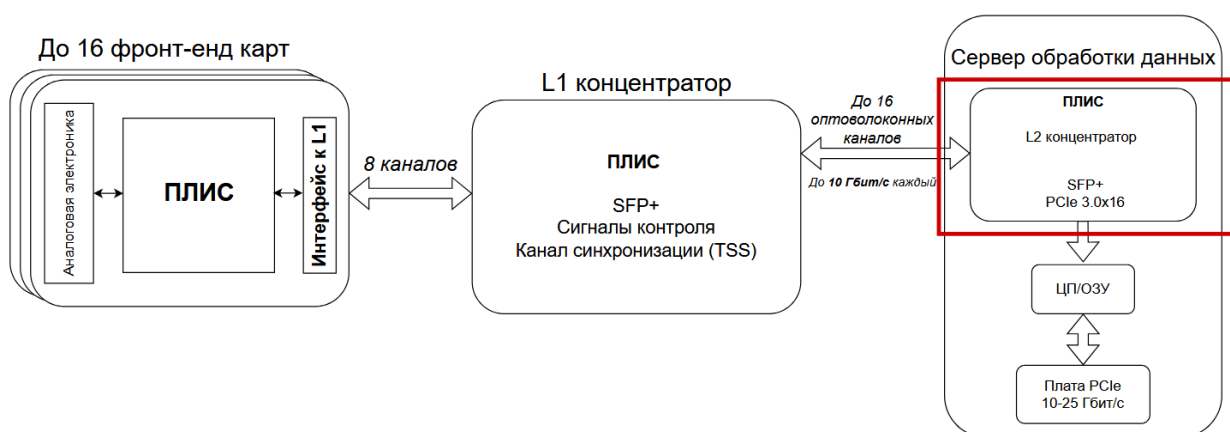


Рис. 5. Структурная схема взаимодействия компонентов системы цепочки считывания в эксперименте SPD

Общая задача Readout chain – это объединение каналов сенсоров и предобработка пакетов. Это необходимо вследствие того, что число каналов может достигать 176 тысяч в первой фазе эксперимента (Таблица 1). L2 концентратор, функциональное место которого в Readout chain выделено на рисунке 5 красным прямоугольником, предназначен для финальной агрегации каналов из восьми в один, кластеризации данных и передачи их в сервер обработки данных.

Таблица 1 — Подсчёт каналов детектора в эксперименте SPD

Тип детектора SPD	Число каналов	Каналы/FEB	Число FEB
Micromegas	5384	128	43
Straw tracker	30512	128	239
BBC	1056	64	18
BBC MCP	64	32	2
Range system	137600	192	717
ZDC	210	64	34
Итого (макс.)	176716		1053

2.2. Архитектура L2 концентратора

Структура L2 концентратора поделена на две части: сопряжения с L1 концентратором и сопряжение с сервером обработки данных. В данном подразделе представлен общий обзор проекта L2 концентратора. Структурная Высокоуровневая схема ПО концентратора L2 представлена на рисунке 6.

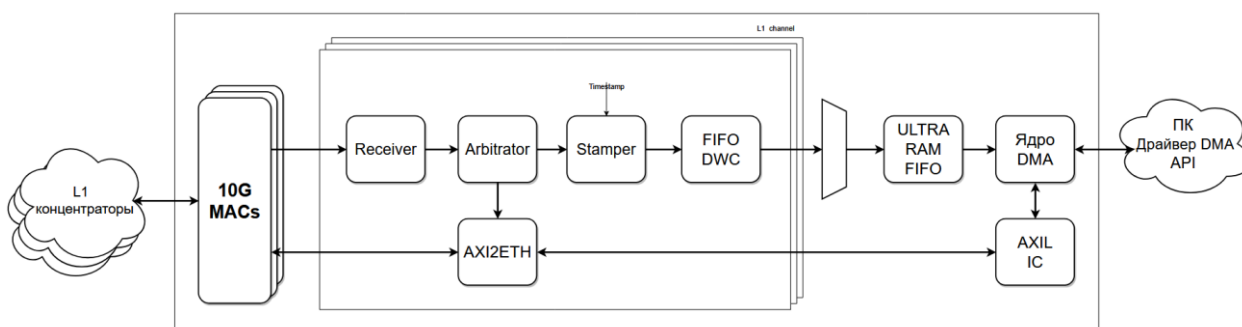


Рис. 6 — Структурная схема общей архитектуры L2 концентратора

Путь следования и обработки данных в концентраторе L2 проходит слева направо на рисунке 6. Детали обработки и передачи данных представлены ниже.

Данные с набора концентраторов L1 по оптическим кабелям, проходя через SFP трансиверы на плате, передаются на модули 10G MAC [12]. Эти модули принимают пакеты и выполняют проверку их контрольной суммы, после чего данные передаются в модули канальной обработки.

Для обмена информацией между концентраторами L1 и L2 используется два типа пакетов. Пакеты «Данные» содержат информацию, полезную нагрузку, полученную от детекторов, и передаются на сервер сбора данных. Пакеты «Команды» обеспечивают взаимодействие между концентраторами L2 и L1, служат для передачи сервисной информации, настройки и обновления программного обеспечения концентратора L1 и подключенных к нему front-end карт.

Модуль «Receiver» проверяет корректность MAC-адресации и размеров пакета, а также определяет тип пакета (команда или данные). После выполнения проверки соответствующие поля пакета удаляются, а результаты сохраняются и передаются для дальнейшей обработки.

Модуль «Arbitrator» выполняет арбитраж потока данных и направляет их: если пакет содержит команду, он направляется в модуль «Axi-to-Eth», а данные передаются дальше, в модуль «Stamper».

Модуль «Stamper» дополняет пакет результатами проверок внутри «Receiver» и временным штампом. Эта информация используется на следующем уровне обработки данных на сервере обработки данных. Форматирование пакета после обработки канальными модулями представлено на рисунке 7.

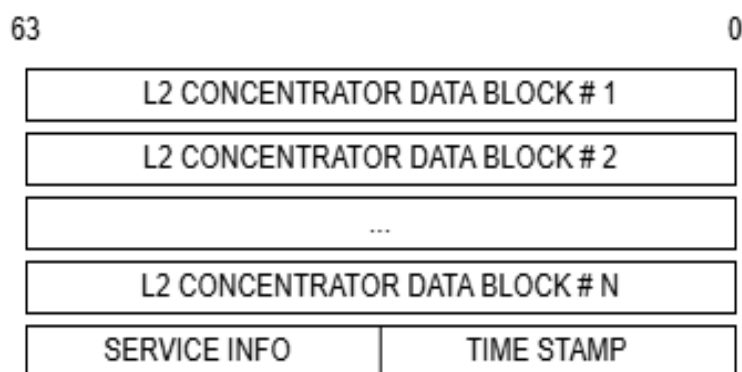


Рис. 7 — Формат пакета данных

После предварительной обработки, пакеты передаются в модуль FIFO DWC (First-In-First-Out Data Width Converter). Данный модуль буферизирует пакеты для предотвращения их потерь при возможных задержках и осуществляет изменение ширины шины данных с целью синхронизирования скоростей передачи данных в нескольких каналах и интерфейса передачи в сервер (PCI).

Модуль «mux» последовательно мультиплексирует пакеты нескольких каналов в PCI буфер («ULTRA RAM FIFO»). В качестве буфера используются специфичные для данной архитектуры ПЛИС блоки памяти UltraRAM, каждый вместимостью 288 Кб, обладающие двухпортовой архитектурой и поддержкой кода коррекции ошибок (ECC) (Error Correction Code) [13].

С помощью модуля ядра DMA [14] осуществляется сопряжение с сервером сбора и обработки данных через интерфейс PCIe. Так же, через это ядро производится обмен транзакциями по шине AXI Lite как с концентратором L2, так и с нижестоящими устройствами – концентратор L1 и front-end платами.

Передача данных в память сервера обработки данных (ОЗУ) происходит со скоростью до 16 ГБ/с, что соответствует максимальной пропускной способности интерфейса PCIe 3.0 x16. С учетом приведенных выше расчетов пропускной способности, для обработки данных одного детектора будет достаточно двух концентраторов L2 при условии достаточного количества портов для подключения концентраторов L1.

Взаимодействие между концентратором L2 и сервером обработки данных осуществляется через API (Application programming interface). API представляет собой набор функций, описанных на языке C. Эти функции предоставляют пользовательский интерфейс для взаимодействия с L2 концентратором через драйвер DMA.

2.3. Ресурсы аппаратной платформы

Разработанное ПО для концентратора L2 представляет собой микрокод, реализованный на языке описания аппаратуры SystemVerilog. Часть модулей представляет собой стандартные ядра, часть оригинальная разработка.

Занимаемое дизайном количество ресурсов на текущей аппаратной платформе представлено в таблице 2.

Таблица 2 — Занимаемые ресурсы ПЛИС

Ресурс	Занято/доступно	Занято, %
LUT	55510/522720	10.62
LUTRAM	3254/161280	2.02
FF	61624/1045440	5.89
BRAM	324.5/984	32.98
IO	6/512	1.17
GT	18/48	37.50
BUFG	31/940	3.30
PCIE	1/5	20.00

3. Разработка сопряжения между L2 концентратором и сервером обработки данных

3.1. Требования и задачи

Разработка аппаратно-программного сопряжения L2-концентратора с сервером обработки данных является ключевым этапом построения всей системы сбора данных эксперимента SPD. На этом уровне осуществляется передача агрегированных потоков событий от концентратора второго уровня в систему хранения и первичного анализа. Учитывая высокую частоту взаимодействий в эксперименте (до 4 МГц) и объём генерируемых данных, к модулю сопряжения предъявляются жёсткие требования по устойчивой пропускной способности, надёжности и целостности передаваемой информации.

Основными техническими задачами, решаемыми в рамках данной части разработки, являются:

1. Проектирование архитектуры взаимодействия между логикой ПЛИС и сервером по интерфейсу PCI Express, с использованием механизма прямого доступа к памяти (DMA);

2. Реализация прикладного программного интерфейса (API) на языке программирования C, обеспечивающего приём и обработку входящего потока на стороне хоста;

3. Внедрение логики кластеризации событий внутри концентратора, позволяющей группировать входящие данные по срезам (Slice) и источникам (портам L1), с последующей маршрутизацией и буферизацией.

Поставленная цель — обеспечить передачу данных со скоростью не менее 1 ГБ/с (Скорость в первой фазе эксперимента [20]) без потерь и искажений, при этом сохранить модульность архитектуры, позволяющую адаптировать решение к различным условиям функционирования эксперимента и развивать его в будущем. Реализация всех компонентов велась с учётом ограничений на загрузку процессора, временные задержки и точность привязки данных ко времени.

3.2. Проектирование и разработка первой версии сопряжения

В рамках разработки аппаратно-программного сопряжения L2-концентратора с сервером обработки данных важнейшей характеристикой является фактическая пропускная способность канала передачи. Как описано ранее в разделе 1.2, общий объём данных, генерируемых системой в режиме пиковых нагрузок, может достигать от 1 ГБ/с до 20 ГБ/с. В связи с этим требуется тщательное изучение возможностей реализации обмена по шине PCI Express на используемой аппаратной платформе.

На рисунке 8 изображён первый прототип архитектуры сопряжения L2 концентратора для изучения пропускной способности, разработанный в ходе производственной практики в г. Дубна. Стоит подметить, что эта версия архитектуры не соединена с частью сопряжения с L1 концентратором, как было показано на рисунке 6 подраздела 2.2, а является изолированной структурой. Ниже представлено описание логики модулей архитектуры.

Модуль «DMA» (Direct Memory Access) является ядром прямого доступа к памяти для взаимодействия сервера с ПЛИС. Архитектура прошивки основывается на использовании стандартных интерфейсов AMBA AXI, включая потоковый интерфейс без адресации (AXI-Stream) и облегчённый адресный интерфейс управления (AXI-Lite). Поток данных формируется внутри модуля генерации пакетов, настраиваемого посредством регистровой карты управления. Размеры и запуск пакетов определяются управляющими сигналами, контролируемые пользователем с помощью DMA, а передача данных осуществляется через буфер FIFO. Полученные данные затем передаются в DMA, обеспечивающее обмен с хостом по PCIe.

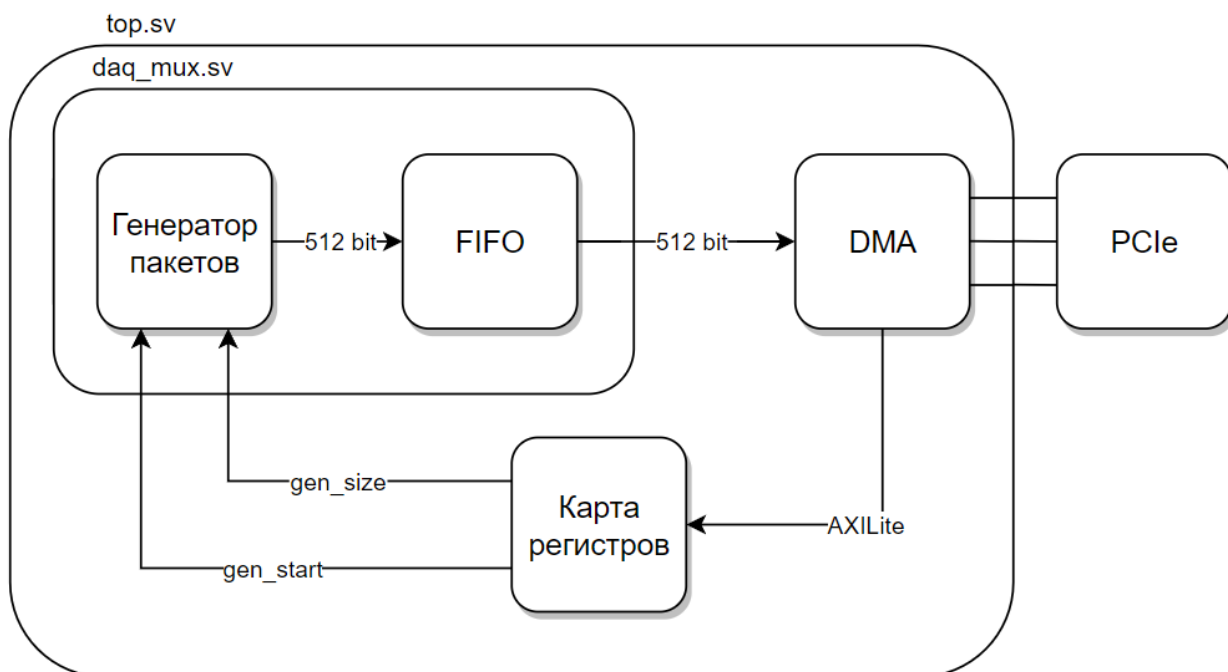


Рис. 8 — Структурная схема первой версии архитектуры сопряжения L2 концентратора с сервером обработки данных

Для измерения пропускной способности генерируемого потока с отладочной платы со стороны хоста использован комплекс скриптов и программ на языке C. Они запускают генерацию пакетов на ПЛИС, а затем считывают их и измеряют среднюю пропускную способность потока с заранее заданными статическими размерами пакетов. Блок-схема логики работы программ изображена на рисунке 9.

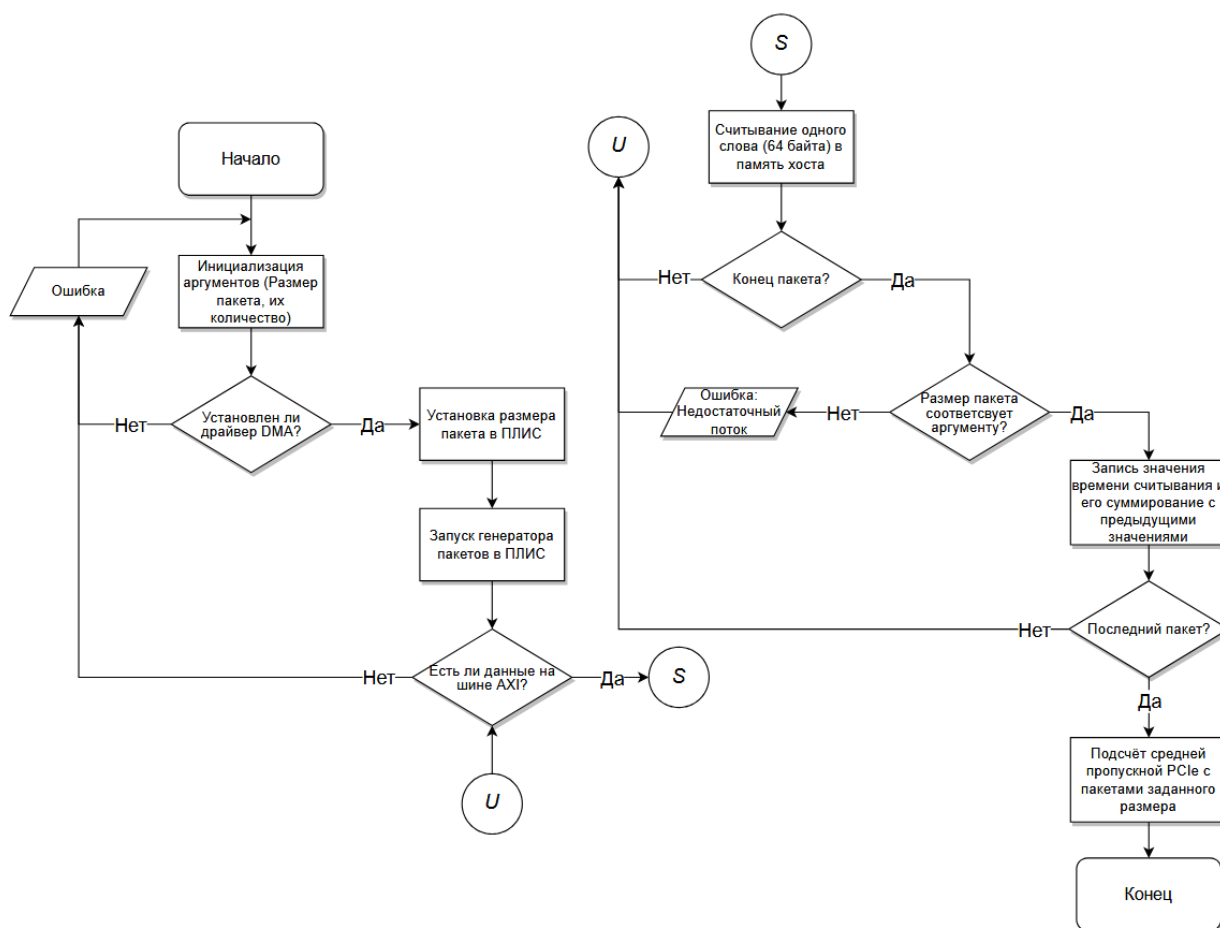


Рис. 9 — Блок-схема работы API

В процессе тестирования разработанного прототипа аппаратно-программного комплекса было зафиксировано, что фактическая пропускная способность достигала порядка 37% от теоретического предела (Рис. 10). Испытания проводились в г. Дубна на сервере с 24-ядерным процессором с тактовой частотой 2.8 ГГц и материнской платой серверного класса, под управлением операционной системы на базе ядра Linux версии 6.5.2. Причины несоответствия максимальной пропускной способности и измеренных значений остаются неясными и рассматриваются далее (см. с. 40, подраздел 3.3).

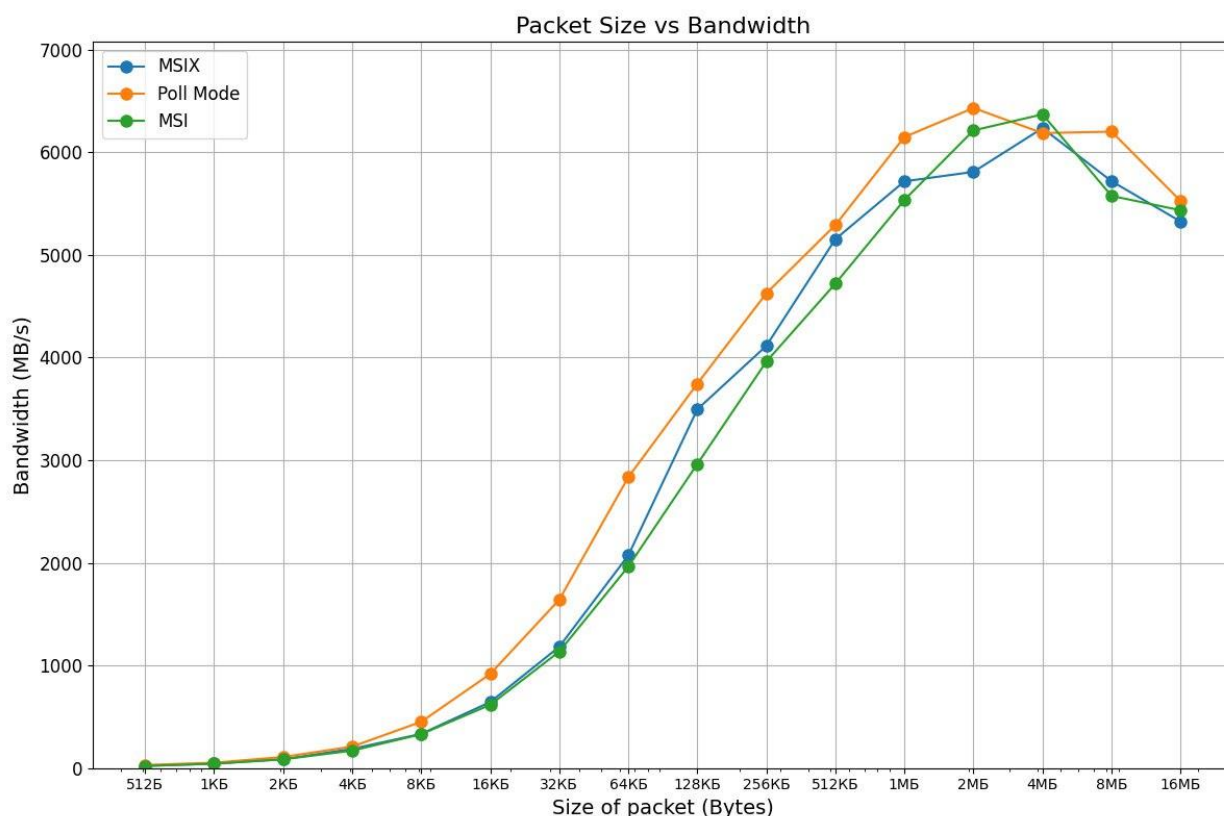


Рис. 10 — Результаты измерения пропускной способности в г. Дубна

3.3. Проектирование и разработка обновлённой версии сопряжения

Повторные измерения проведены в г. Томске на альтернативной аппаратной платформе. Для повышения гибкости тестирования и приближения условий к реальным сценариям эксперимента был разработан обновлённый вариант проекта, ориентированный на более универсальное исследование пропускной способности и передачу данных с пакетами случайной длины. В ранее представленную схему (Рис. 8) были добавлены дополнительные функциональные блоки, направленные на расширение режимов работы и улучшение контроля данных (Рис. 11).

В частности, в архитектуру был введён мультиплексор, обеспечивающий переключение между основным режимом (приём данных с модуля L2 Interface) и режимом тестирования пропускной способности. По умолчанию активен первый режим. Добавлена также логика подсчёта количества переданных пакетов (Counter of Packets), позволяющая

верифицировать целостность потока и отлаживать поведение системы на уровне транзакций.

Модуль генерации пакетов был существенно модифицирован: в него добавлена поддержка сигнала `random_size`, конфигурируемого через регистровую карту управления. Это позволило реализовать режим динамической генерации пакетов переменной длины, наряду с уже существующим режимом формирования пакетов фиксированного размера.

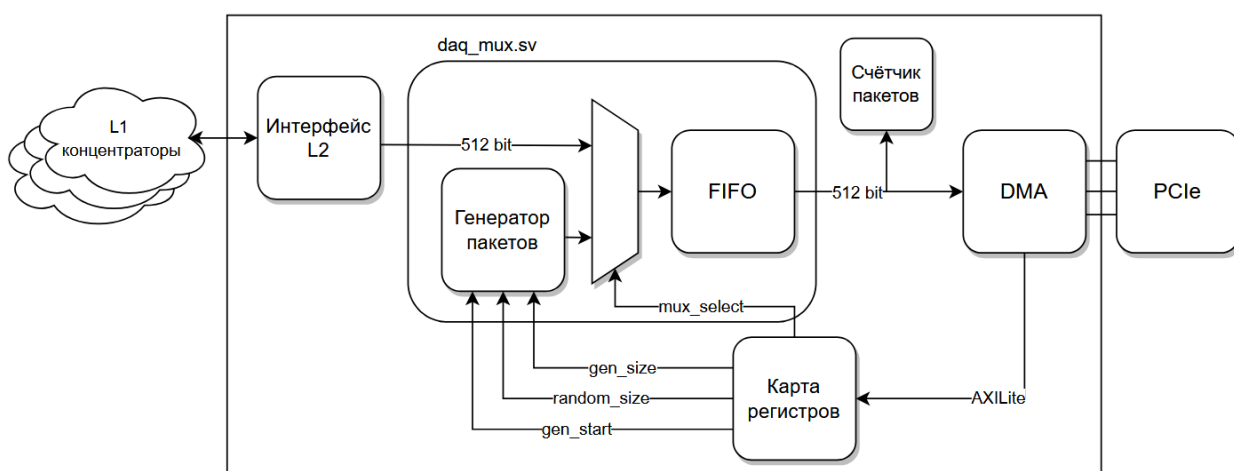


Рис. 11 — Структурная схема второй версии архитектуры сопряжения L2 концентратора с сервером обработки данных

Дополнительно был проведён анализ возможных способов передачи пакетов переменной длины через ядро прямого доступа к памяти. Были рассмотрены три подхода:

1. Последовательная передача заголовка и основного блока с использованием двух дескрипторов
2. Параллельная передача с двумя дескрипторами;
3. Передача с одним дескриптором и последующим анализом содержимого буфера в оперативной памяти.

Наиболее удобным в реализации и тестировании оказался первый вариант, предусматривающий последовательную передачу данных с предварительным извлечением размера. Несмотря на то, что он не является оптимальным по скорости, его архитектурная простота и высокая надёжность

делают его предпочтительным для текущей версии API. Последовательность системных вызовов, реализованных в соответствующей программе, представлена в таблице 3. Передача одного события осуществляется в два этапа: сначала считывается заголовок, содержащий метainформацию о размере фрейма, затем — основное тело сообщения (payload). Это позволяет эффективно обрабатывать события переменной длины.

Системный вызов «`read(fd, buf_sframe, 4)`»: первое чтение иницирует обращение к драйверу, который, в свою очередь, осуществляет доступ к DMA-буферу. Из этого буфера считываются первые 4 байта, содержащие заголовок кадра. В заголовке закодирован размер последующего блока данных. Это чтение необходимо для подготовки корректного приёма и предотвращения искажения или потери полезных данных.

Операция «`memcpy(&size_of_frame, buf_sframe, 4)`»: полученные 4 байта копируются в переменную `size_of_frame` для последующего использования. Эта операция выполняется в оперативной памяти и используется исключительно для преобразования представления данных из бинарного буфера в переменную. Далее эта переменная определяет объём для второго вызова `read`.

Системный вызов «`read(fd, buf_data, size_of_frame)`»: после того как размер пакета определён, осуществляется основное чтение данных. В этот момент API считывает из устройства количество байт, равное `size_of_frame`, и записывает их в буфер `buf_data`. Таким образом, формируется полная структура события: сначала — заголовок, затем — полезная нагрузка. При этом обеспечивается чтение строго необходимого объёма, что повышает эффективность передачи и снижает нагрузку на систему. Ранее была использована версия считывания с заранее известным значением размера пакета, которое задавалось аргументом в командной строке, из-за чего требовался только один системный вызов «`read()`». В остальном, логика работы API осталась схожа с блок-схемой, изображённой ранее на рисунке 9 подраздела 3.2.

Таблица 3 — Последовательность системных вызовов в API

Операция	Аргументы	Назначение
1. read()	buf_sframe, 4	Чтение заголовка кадра
2. memcpy()	&size_of_frame	Декодирование размера
3. read()	buf_data, size	Чтение основного payload

На рисунке 12 изображены результаты новых измерений. Можно заметить, что пропускная способность со статичными пакетами увеличилась, что, скорее всего, связано с другими характеристиками компьютера. Кроме того, видно, как избыточность чтения заголовка пакета уменьшило пропускную способность. Так, на пакетах длиной 32 КБ пропускная способность отличается примерно в полтора раза, но с размерами около 1 МБ скорость почти не отличается. Однако, хотя на практике пропускная способность так и не приблизилась к теоретическим показателям (16 Гбайт/с), скорости в 7 Гбайт/с хватает для версии первого прототипа L2 концентратора, ведь в первой фазе эксперимента скорость будет едва достигать 1 Гбайт/с, а размеры дампов считывания как раз будут начинаться от 1 МБ и выше.

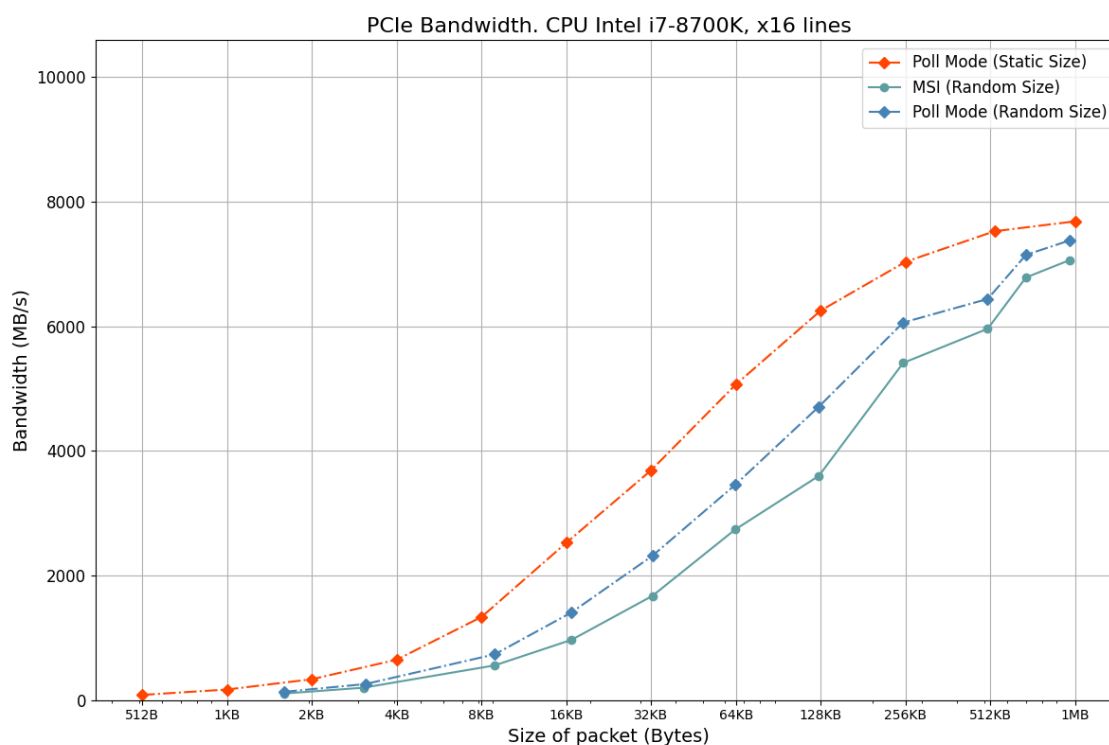
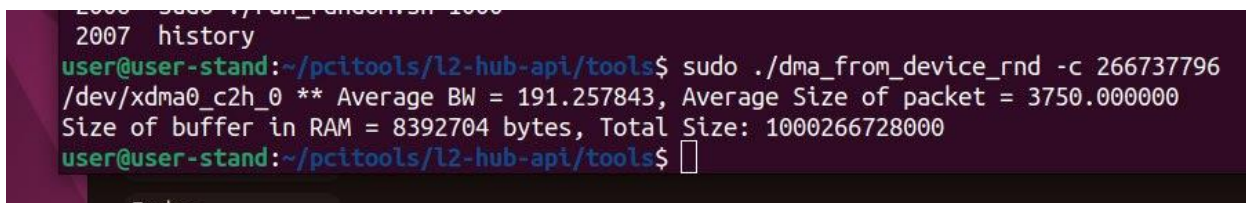


Рис. 12 — Результаты измерения пропускной способности в г. Томск

По итогам изучения пропускной способности PCIe был разработан первый прототип API, позволяющий перейти на реальные Ethernet пакеты (802.3 “Raw”) и получена максимальная скорость передачи, на которую может рассчитывать L2 концентратор в данной конфигурации.

Было произведено полное тестирование системы на корректность передачи данных. В результате проверки с ПЛИС на сервер обработки данных передано около 1 Терабайта. Ни один пакет не был искажён или потерян (Рис. 13).



```
2007 history
user@user-stand:~/pcitools/l2-hub-api/tools$ sudo ./dma_from_device_rnd -c 266737796
/dev/xdma0_c2h_0 ** Average BW = 191.257843, Average Size of packet = 3750.000000
Size of buffer in RAM = 8392704 bytes, Total Size: 1000266728000
user@user-stand:~/pcitools/l2-hub-api/tools$
```

Рис. 13 — Результаты тестирования

Что касается причин недостатка скорости, причины этого всё ещё остаются неизвестными. Косвенные признаки указывают на некую недоработку драйвера DMA, которые были установлены еще в ходе производственной практики:

1. Процессор не загружен полностью. Максимум — 60%. Команда Linux «dd of=/dev/null if=/dev/zero bs=1MB count=10000» полностью загружает процессор на 100%, в то время как “dd of=/dev/null if=/dev/dma0_c2h_0 bs=1MB count=10000”, который так же, как и ПЛИС передает байты через DMA показывает ту же пропускную способность. Этот момент является одним из аргументов в пользу того, что программы, которые используются (например, dma_from_device_rnd.c и т.д.), не связаны с ограничениями скорости; скорее, это драйвер ограничивает её. Возможно, текущее состояние драйвера несовместимо с каким-либо компонентом системы и DMA просто не обеспечивает полной производительности из-за какой-то скрытой ошибки.

2. При перенастройке ядра DMA с Gen 3x16 на Gen 3x8 ожидалось увидеть те же 5-6 ГБ/с, что и в Gen 3x16, но были получены 2.2 ГБ/с. Оба значения для обеих конфигураций составляют ~30% от максимума.

3. Подмечено, что скорость увеличивается, когда драйвер устанавливается на разных версиях ядра Linux. На 6.5.2 она работает на 10-20% быстрее, чем на 6.9.9.

4. Разные версии репозитория DMA не дают значительных результатов. Официальная версия используемого DMA не обновлялась с 2020 года.

Кроме того, были найдены некоторые исследования, в которых так же был задействован используемый в проекте драйвер DMA и в них тоже фиксируется потеря производительности при использовании данного ядра [17,18]. Для решения этой проблемы в будущем планируется заменить нынешний DMA на более сложные и производительные ядра.

3.4. Разработка алгоритма кластеризации

Ключевой задачей, решаемой в рамках функциональности L2-концентратора, является реализация механизма кластеризации входных данных [6, с. 285]. Под кластеризацией в данном контексте понимается упорядочивание входных сетевых пакетов по заданным признакам с последующей буферизацией в оперативной памяти DDR4 (Рис. 14)

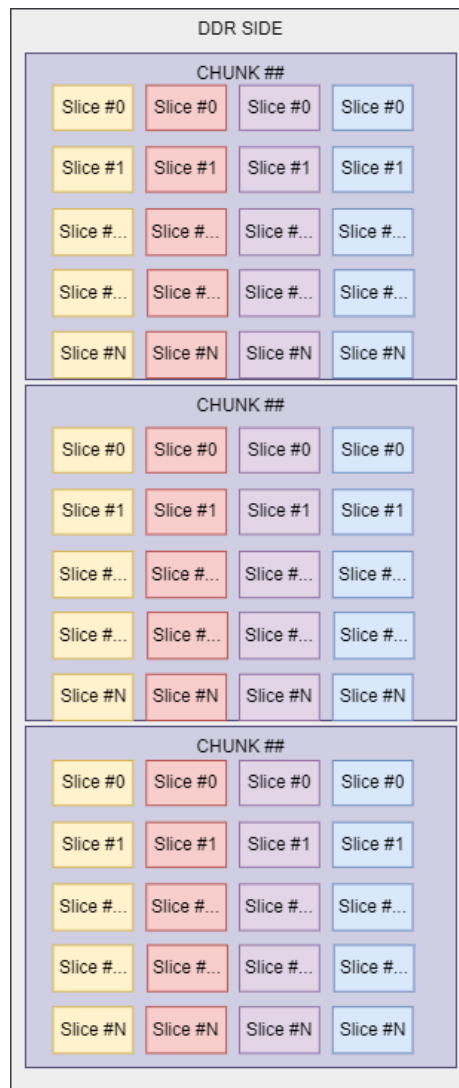


Рис. 14 — Буферизация в DDR4

Для корректной работы системы фильтрации пакетов на последующих уровнях необходима дополнительная структурная абстракция — Slice. Slice представляет собой временной срез длиной от 0.1 до 10 мкс, который агрегирует события в пределах заданного интервала времени. Несколько Slice образуют структуру более высокого уровня — Frame, длительность которого может достигать 10 секунд (Рис. 15). В свою очередь, несколько Frame составляют единицу сбора данных — Run. На рисунке 13 каждый цветной столбец Slice символизирует отдельный входной канал концентратора первого уровня (всего поддерживается до 64 каналов, т.е. 64 столбца).

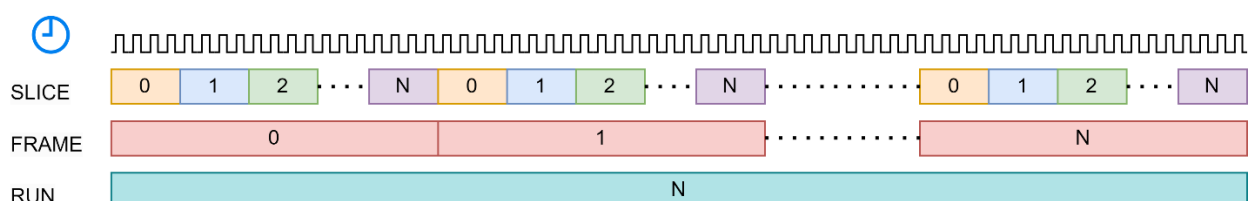


Рис. 15 — Временная диаграмма Slice, Frame, Run

Основная задача кластеризации заключается в сортировке входных пакетов по признаку номера порта источника (L1 Port) и распределении их по соответствующим временным срезам. В результате должна формироваться таблица распределения пакетов по портам и времени (см. рис. 14). Для реализации этой логики был разработан архитектура прототипа кластеризации на ПЛИС (Рис. 16), включающий модули генерации, арбитража и маршрутизации данных.

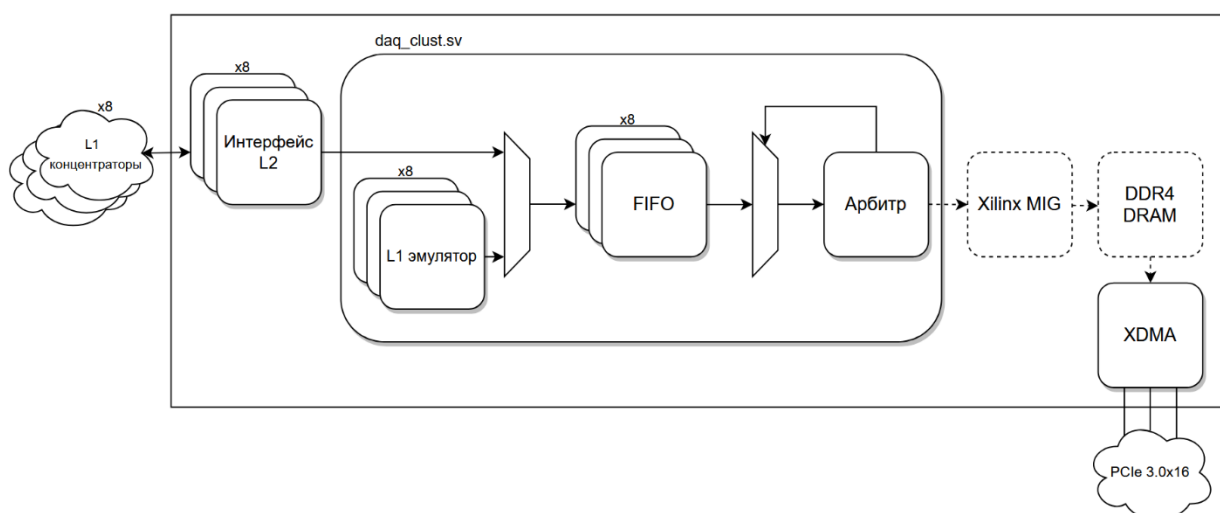


Рис. 16 — Структурная схема архитектуры алгоритма кластеризации

В процессе разработки было выявлено и учтено несколько технически значимых особенностей:

1. Каждый из модулей генерации (Stream Generator) формирует поток пакетов Ethernet формата 802.3 “Raw” [19], причём количество пакетов на один Slice может отличаться. Таким образом, объём входных данных — непостоянен.
2. Порядок пакетов по полю Slice является строго возрастающим (0, 1, 2, ...), что облегчает разбор временных интервалов.

3. Порядок пакетов по полю номера входного порта (L1 Port) является неупорядоченным и случайным (например, 2, 0, 1, ...), что требует соответствующей сортировки.

Принцип работы разработанной схемы следующий: сгенерированные пакеты поступают на входные буферы FIFO, каждый из которых ассоциирован с отдельным каналом L2. Далее модуль сортировки (Arbitrator), используя встроенный мультиплексор, поочерёдно опрашивает FIFO, извлекая данные и формируя дескрипторы по их полям «Slice» и «L1 Port».

На текущем этапе связка с внешней памятью DDR4 ещё не реализована, однако логика кластеризации прошла симуляционную отладку. Для проверки используется встроенная функция \$writememh языка SystemVerilog, которая позволяет записывать данные в файл, отображающий содержимое условной памяти. В рамках ВКР была спроектирована разметка в памяти, изображённая на рисунке 19. На каждый пакет приходится 1600 байт области памяти (т.к. один пакет – 1500 байт максимум), на каждый порт - 196 608 байт (с учетом того, что в одном Slice будет не более 140 пакетов с одного порта). На рисунке 20 приведён пример расположения трёх пакетов, успешно отобразившихся на своих адресах в пределах Slice 0.

На рисунках 17 и 18 представлены структура Ethernet-кадра и формат полезной нагрузки (payload), соответствующей внутреннему протоколу SPD.

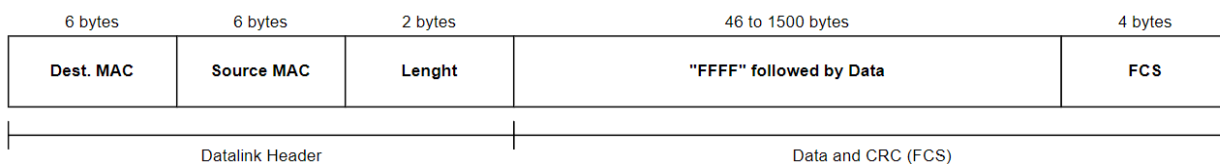


Рис. 17 — Формат пакета Ethernet 802.3 “Raw”.

L2 Header	L2 Port 4 Bit				L2 ID 8bit		Reserved				
L1 Header	L1 Port 4 Bit				MSB of Frame Number 12bit				MSB of Slice Number 16 bit		
FEB DATA BLOCK	1	0	X	X	Format ID 4 bit		LSB of Frame Number 8bit		LSB of Slice Number 16 bit		
	0	0	X	X	FEB DATA #0						
	0	0	X	X	FEB DATA #1						
	...										
	0	0	X	X	FEB DATA #255						
	1	1	X	X	ERROR CODE 8 bit		TOTAL WORDS 20 BIT				

Рис. 18 — Формат Payload (Data).

Offset for Slices	Offset for L1 Ports										Offset of packet
	0x0		0x30000	0x60000	...	0xN		...	0x12C0000		
	Number of Slice	Number of L1 Port									
		0	1	2	3	4	...	n	...	63	
0x0	0										0x0
											0x600
											0x1200
				...		...		...			...
			...							0xN	
										...	
		...			...				...	0x30000	
0x12F0000	1										0x0
											0x600
											0x1200
				...		...		...			...
			...							0xN	
										...	
		...			...				...	0x30000	
0x25E0000	2										0x0
											0x600
											0x1200
				...		...		...			...
			...							0xN	
										...	
		...			...				...	0x30000	
...	...										0x0
											0x600
											0x1200
				...		...		...			...
			...							0xN	
										...	
		...			...				...	0x30000	

Рис. 19 — Разметка в памяти.

3004	000000000000038c	6004	000000000000038c	18004	00000000000003f0
3005	fffffffffffff995f	6005	fffffffffffff995f	18005	fffffffffffff995f
3006	3a1290990372ffff	6006	3a1290990372ffff	18006	3a12909903d6ffff
3007	70affffff10000000	6007	70affffff20000000	18007	70affffff60000000
3008	bf01000730004004	6008	bf01000730004004	18008	bf01000730004004
3009	3000500050005005	6009	3000500050005005	18009	3000500050005005

Рис. 20 — Три пакета, находящиеся в виртуальной памяти в правильных местах.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
8B11	Ерофееву Дмитрию Витальевичу

Школа	ИШИТР	Отделение школы (НОЦ)	ОИТ
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	09.03.01 Информатика и вычислительная техника

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Краткое описание продукта	Разработка сопряжения между L2 концентратором и сервером обработки данных для эксперимента SPD ускорительного комплекса NICA
2. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	На текущий момент ключевая ставка равна 25%, а риски оцениваются в 10%. Таким образом, ставка дисконтирования равна 35%. Ставка кредитования 22,5%.

Перечень вопросов, подлежащих разработке:

Проблема конечного потребителя, которую решает продукт, который создается в результате выполнения НИОКР (функциональное назначение, основные потребительские качества)	Большинство существующих сетевых карт ориентированы на массовый рынок (офисные сети, домашние устройства), но не решают задачи, критичные для промышленных и встроенных систем. Решением является разработка компактного L2-концентратора на базе ПЛИС, предназначенного для встраивания в промышленные системы, лабораторное оборудование, сетевые прототипы и образовательные стенды.
Объем и емкость рынка	TAM: 7000 пользователей SAM: 1750 пользователей SOM: 15 пользователей
Себестоимость продукта	5 234 000 рублей
Конкурентные преимущества создаваемого продукта	Продукт сочетает гибкость HDL-логики, высокую производительность и низкую задержку (20нс), встраиваемость и модифицируемость, а также низкое энергопотребление.
Целевые сегменты потребителей создаваемого продукта	Разработанная прошивка может быть адаптирована под нужды каждой группы (крупные корпорации, аутсорсинговые и медицинские компании, международные проекты). Однако стоит отметить, что на настоящий момент прошивка предназначена именно для крупных корпораций или международных проектов, где требуется быстрая передача данных.
Стратегия продвижения продукта на рынок	Публикация технических статей, хакатоны и технические конференции, партнерство с университетами и институтами.

Перечень таблиц и графического материала:

Ожидаемый объем продаж и выручка. Виды расходов (расчет затрат по годам). Расчет эффективности инвестиций. Таблица 4 Сегментация рынка Таблица 5 Ожидаемый объем продаж и выручка Таблица 6 Краткий план действий Таблица 7 Затраты проекта по годам Таблица 8 Расчет денежных операций Таблица 9 Расчет налога на прибыль Таблица 10 Оценка эффективности проекта

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	03.03.2025
--	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент БШ	Спицын Владислав Владимирович	канд. экон. наук, доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8B11	Ерофеев Дмитрий Витальевич		

4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

4.1. Продукт, конкуренты и анализ рынка

4.1.1. Описание продукта и его конкурентных преимуществ

В рамках данной работы проводится исследование экономической эффективности внедрения разработанного прототипа L2 концентратора из эксперимента SPD ускорительного комплекса NICA в системы сбора данных различных компаний и проектов. Оценивается целесообразность разработки собственной прошивки для автоматизации объединения и предобработки потоков данных, а также анализируются потенциальные выгоды от его использования с точки зрения сокращения затрат на энергопотребление, закупку нового оборудования при расширении систем.

Особое внимание уделяется сравнительному анализу существующих решений (обычные сетевые карты) с точки зрения их недостатков. Рассматриваются возможные статьи расходов, включая затраты на разработку, обучение сотрудников и интеграцию разработки в существующие процессы.

Результаты исследования позволят обосновать экономическую эффективность предложенного подхода, а также определить оптимальные стратегии внедрения L2 концентратора в компании. Кроме того, оценивается влияние автоматизации на снижение энергопотребления, разгрузку центрального процессора и долгосрочные финансовые показатели проекта.

Основные преимущества системы включают:

1. Гибкость и адаптивность под любые требования

Прошивка предполагает изменения под нужды конкретного проекта или системы сборки данных, поддерживающих протокол Ethernet 802.3 “Raw”.

2. Снижение затрат энергопотребление

В отличие от классических решений на базе центрального процессора и отдельной сетевой карты, ПЛИС-платформа потребляет существенно меньше энергии. Это особенно важно для масштабируемых систем, работающих в условиях ограничений по питанию и охлаждению (например, в экспериментах

с высоким уровнем радиации, в стойках с ограниченным тепловыделением и т.п.).

3. Масштабируемость

Архитектура L2-концентратора на ПЛИС допускает гибкое масштабирование — как по числу обрабатываемых портов, так и по функциональности. HDL-описание может быть адаптировано под конкретное количество каналов и тип оборудования, используемого в проекте. Это особенно удобно при постепенном наращивании аппаратного парка без необходимости полной смены архитектуры.

4. Высокая эффективность

ПЛИС обеспечивает возможность полной аппаратной параллельной обработки кадров и пакетов. В отличие от CPU, который последовательно обрабатывает сетевой стек, FPGA выполняет логические операции одновременно на нескольких потоках, что позволяет достичь высокой пропускной способности при низкой нагрузке. Благодаря реализации логики на уровне железа, L2-концентратор на ПЛИС обеспечивает минимальные задержки передачи кадров — в отличие от программных решений, в которых данные проходят через операционную систему и драйверы. Это делает устройство аналогом SMART NIC — специализированного сетевого адаптера на FPGA, ориентированного на детерминированную производительность.

5. Модифицируемость

HDL-описание концентратора может быть оперативно изменено для добавления новых функций, поддержки нестандартных протоколов или изменения архитектуры обработки. В отличие от фиксированной архитектуры коммерческих сетевых адаптеров, ПЛИС-платформа предоставляет полный контроль над обработкой данных, что критично для научных и инженерных задач с нестандартными требованиями.

В отличие от существующих решений, основанных на обработке сетевого трафика с помощью традиционных сетевых карт и центрального процессора, L2-концентратор на ПЛИС сочетает в себе энергоэффективность,

масштабируемость и высокую производительность. Благодаря аппаратной параллельности, низким задержкам и полной модифицируемости HDL-кода, он предоставляет гибкий и адаптивный инструмент для высоконагруженных научных и инженерных проектов, особенно в условиях, где важна предсказуемость поведения, надёжность и точное управление потоками данных.

4.1.2. Целевой сегмент рынка.

Потенциальной потребительской группой предлагаемого L2-концентратора на базе ПЛИС могут выступать организации, работающие с высокоскоростной передачей данных, требующие минимальных задержек и высокой надёжности в обработке сетевого трафика. В первую очередь это международные научно-исследовательские проекты, в которых критична эффективность обработки и маршрутизации больших объёмов информации в реальном времени. В России и за рубежом к таким организациям относятся:

1. Научно-исследовательские центры и проекты (например, NICA, СКИФ и др.), использующие масштабные распределённые вычисления и сбор данных с тысяч датчиков.

2. Аэрокосмические и оборонные компании, где важны детерминированные задержки и модифицируемость сетевого оборудования.

3. Центры высокопроизводительных вычислений (HPC), в том числе суперкомпьютерные кластеры, нуждающиеся в низкоуровневой оптимизации сетевой инфраструктуры.

При сегментации рынка используется критерий требований к автоматизации. В таблице 4 приведена сегментация рынка:

Таблица 4 – Сегментация рынка

Группа потребителей	Ключевые потребности	Требования к разработке
Научно-исследовательские центры (NICA, СКИФ)	Обработка огромного объема данных с минимальными задержками, надёжность, масштабируемость.	Высокая пропускная способность (10/40/100 Gbps), низкие задержки, постоянная работа без сбоев.
Аэрокосмические и оборонные предприятия	Детерминированное поведение, отказоустойчивость, безопасность.	Жёсткий контроль задержек, надёжность в условиях помех, защищённая архитектура, возможность быстрого обновления HDL-кода.
Суперкомпьютерные центры и HPC-кластеры	Высокая плотность соединений, масштабируемость, энергоэффективность	Возможность обработки большого количества одновременных соединений, низкое энергопотребление

Для научно-исследовательских организаций и международных проектов (таких как NICA, СКИФ) приоритетом является высокая производительность, минимальные задержки и возможность гибкой настройки сетевой инфраструктуры под специфические протоколы. Для суперкомпьютерных центров и HPC-кластеров ключевое значение имеет

масштабируемость, энергоэффективность и возможность интеграции в существующие вычислительные узлы. В оборонной и аэрокосмической сфере особое внимание уделяется надёжности, отказоустойчивости и детерминированному поведению устройства в реальном времени.

Таким образом, создаваемый L2-концентратор на базе ПЛИС может быть адаптирован под нужды каждой группы потребителей за счёт модульной архитектуры, гибкости HDL-кода и возможности работы с нестандартными протоколами. Однако на текущем этапе развития продукта он в наибольшей степени ориентирован на потребности научных центров, занятых обработкой больших объёмов данных в реальном времени.

Целевая аудитория отличается высоким уровнем технической компетенции, работает в условиях ограничений по задержкам и энергопотреблению, имеет опыт работы с высокопроизводительными системами и готова к внедрению кастомизируемых аппаратных решений ради достижения оптимальных показателей эффективности.

4.1.3. Определение емкости рынка и объема продаж

Метод расчёта «сверху вниз»

Потенциально доступный рынок (РАМ)

По оценкам участников крупнейших международных научных инициатив, в мире функционирует около 20 крупных коллайдерных и ядерно-физических проектов, в которых активно применяются распределённые вычисления и высокоскоростные сети (включая NICA и СКИФ). Каждый такой проект включает от 50 до 200 вычислительных узлов, где может потребоваться отдельный высокопроизводительный L2-концентратор на базе ПЛИС. Также существуют национальные суперкомпьютерные центры и дата-центры при ВУЗах и НИИ, которых по всему миру — порядка 1000 учреждений, активно работающих с HPC и задачами реального времени. Таким образом, ориентировочный РАМ: $(20 \text{ проектов} \times 100 \text{ узлов}) + (1000 \text{ НИИ/центров} \times 5 \text{ узлов}) = 2000 + 5000 = 7000$ потенциальных устройств в год.

Общая адресуемая емкость рынка (TAM)

Реалистично оценим, что только 25% из этого числа готовы рассматривать FPGA-решения в текущем году (ввиду ограничений бюджета, технической зрелости и пр.). $TAM = 7000 \times 25\% = 1750$ устройств в год.

Доступный для захвата рынок (SAM)

При пилотной фазе и ограниченных мощностях производства можно ориентироваться на 5% от TAM: $SAM = 1750 \times 5\% = 87$ устройств в год.

Прогнозируемая доля рынка (SOM)

Учитывая наличие 3–4 крупных вендоров в нише, при конкурентной стратегии можно рассчитывать на 25% нишевого проникновения: $SOM = 87 \times 25\% = 22$ устройства в год.

Корпоративный потенциал (B2B)

Для научных и промышленных B2B-клиентов стоимость одного L2 концентратора может составлять от 120 000 до 300 000 рублей в зависимости от конфигурации и дополнительной поддержки. Таким образом, годовой B2B-объем продаж может достигать: $22 \text{ устройств} \times 200\,000 \text{ руб. (средняя цена)} = 4,4 \text{ млн руб. в год.}$

Таблица 5 – Ожидаемый объем продаж и выручка

Год	Объем продаж, число купленных L2 концентраторов	Выручка, руб.
1	0	0
2	35	3 500 000
3	50	5 000 000

4.2. Организация производства и планирование затрат

4.2.1. Организация производства

Для нашего проекта по разработке L2 концентратора потребуются такие ресурсы, как персонал, оборудование и программное обеспечение. Полный список приведён ниже.

1. Персонал (2 человека):

- 2 человека отвечает за разработку цифровой схемы на языке описания аппаратуры SystemVerilog.

2. Оборудование:

- Техника:

1. Ноутбуки в количестве 2 шт.

2. Отладочная плата, компьютер для тестового стенда и удалённый компьютер для прошивки (Уже есть в аудитории).

- Мебель:

1. Столы и стулья, которые уже есть в общежитии, рабочих комнатах библиотеки или аудиториях корпусов.

- Интернет:

1. Оплата домашнего интернета (примерно 1500 рублей в месяц).

3. Программное обеспечение:

- Бесплатные инструменты:

1. Используется бесплатная среда программирования, а также специальное ПО для синтеза HDL-кода и прошивки платы.

- Лицензии:

1. Если потребуется платное ПО, можно использовать студенческие лицензии.

Таблица 6 – Краткий план действий

№	Этап	Длительность	Краткое описание
1	Подготовка	1 неделя	Анализ существующих решений (FELIX) Определение технических требований к L2 концентратору Подбор инструментов и библиотек (SystemVerilog, спец. ПО для прошивки, ядро DMA)
2	Планирование	3 недели	Создание технического задания с ключевыми функциями (Поддержка протокола AXI, поддержка ядер DMA и MAC)
3	Проектирование и разработка	6 месяцев	Проектирование и разработка сопряжения L2 концентратора с сервером обработки данных: Разработка алгоритмов кластеризации Разработка API для сервера обработки данных Дополнительные модули: Генератор пакетов
4	Тестирование и доработка	3 месяцев	Верификация: Проверка работы ключевых модулей в симуляторах. Рефакторинг: Оптимизация производительности (Пропускной способности)
5	Подготовка к запуску	2 месяца	Согласование со старшими коллегами, настройка серверов обработки данных непосредственно на местах установки L2 концентратора.
6	Поддержка и обновление	-	Техническая поддержка: Мониторинг и исправление багов Развитие продукта: Добавление нейронных сетей для более «умного» анализа пакетов. Увеличение пропускной способности за счёт новых решений API и DMA.

Согласно плану, выход на рынок ожидается в пределах года после начала разработки.

4.2.2. Расчет затрат на производство

Производство аппаратного продукта всегда требует затрат, поэтому были выделены все затраты по трем основным их видам. Проведен анализ зарплат на сайте вакансий среди Junior-разработчиков на стеке RTL-разработчика. В среднем месячная оплата труда такого уровня разработчиков составляет 66 000 рублей.

Помимо зарплат, к затратам на производство стоит отнести стоимость оборудования, используемого членами команды. Было посчитано, что для необходимого уровня работы следует иметь достаточно мощные ноутбуки, стоимость которых составляет 60 000 рублей. Для всего оборудования стоит рассчитать амортизацию, закладывая в срок службы 5 лет. За оборудование в виде 2 ноутбуков амортизация составляет 24000 рублей/год.

Основные виды затрат:

1. Инвестиционные затраты:

- Покупка ноутбуков (2 шт.) = 120 тыс. руб.

2. Текущие переменные затраты:

- Интернет-соединение (2 шт.) = 3,000 тыс. руб. / мес.

3. Текущие постоянные затраты:

- Зарплата сотрудникам (ежемесячно на 2 чел.) = 66 тыс. руб. / мес.
- Рекламные расходы и (маркетинг, PR) = 300 тыс. руб. в первый год

Распределение затрат по годам:

1. Первый год: Наибольшая часть затрат будет понесена в первый год из-за разработки и начальных маркетинговых расходов.
2. Второй год: Инвестиционные затраты, снизятся, а все текущие затраты увеличатся из-за производства и маркетинга.

3. Третий год и далее: Текущие переменные и постоянные затраты остаются стабильно высокими в зависимости от объёма продаж и маркетинга.

Таблица 7 – Затраты проекта по годам

Годы	0	1	2
ИНВЕСТИЦИОННЫЕ ЗАТРАТЫ			
Покупка компьютеров	120	0	0
ТЕКУЩИЕ ПЕРЕМЕННЫЕ ЗАТРАТЫ			
Выплата кредита	929 028	929 028	929 028
Интернет-соединение	36	36	36
ТЕКУЩИЕ ПОСТОЯННЫЕ ЗАТРАТЫ			
Зарплата	1600	1600	1600
Реклама	0	300	500
ИТОГО	1 756	1 936	2 136

4.3. Финансовые ресурсы и эффективность проекта

4.3.1. Прогноз денежных потоков и эффективность проекта

Расчет ставки дисконтирования опирается на ключевую ставку и риски. На текущий момент ключевая ставка равна 25%, а риски оцениваются в 10%. Таким образом, ставка дисконтирования равна 35%. В таблице 5 приведен расчет эффективности инвестиций. Выручка от продаж была уменьшена на сумму обслуживания кредита за временной период.

Таблица 8 – Расчет денежных операций

Показатели	Годы		
	0	1	2
Ставка дисконтирования	1	1,35	1,35
Ставка дисконтирования, нарастающим итогом	1	1,35	1,8225
Денежные потоки текущих операций:			
Выручка от продажи товаров и услуг	0	3500	5000

Расходы:			
з/п	1600	1600	1600
Интернет-соединение	36	36	136
Реклама и маркетинг	0	300	500
налог на прибыль(отдельный расчет)	0	294,3812	554,3812
ЧДП от текущих операций	-1636	1269,619	2309,619
ЧДП от текущих операций (дисконтированный)	-1636	940,4584	1267,281
ЧДП от текущих операций (диск, нараст итог)	-1636	-695,542	571,7389
Денежные потоки от инвест деятельности			
ЧДП от инвест деятельности (дисконтированный)	120	0	0
ЧДП от инвест деятельности (диск, нараст итог)	120	120	120
NPV нарастающим итогом	-1756	-815,542	451,7389

Таблица 9 – Расчет налога на прибыль

Показатели	Годы		
	1	2	3
Выручка от продажи товаров и услуг	0	3500	5000
Расходы			
з/п	1600	1600	1600
Интернет-соединение	36	36	36
Реклама и маркетинг	0	300	500
Амортизация	0	92,094	92,094
Прибыль до налогообложения	0	1471,906	2771,906
Налог на прибыль (20 %)	0	294,3812	554,3812

Таблица 10 – Оценка эффективности проекта

NPV	451,7389
PI	4,764491
Срок окупаемости	1,643537
IRR	56,395

4.3.2. Финансовые ресурсы проекта.

Как основной способ получения финансовых средств было принято решение взять кредит в Сбербанке на 2 млн. руб. сроком на 3 года под процент 22,5. Ежемесячная оплата по кредиту составит 77 419 руб.

4.3.3 Стратегия продвижения продукта на рынок.

Год 1: Запуск и первичное проникновение на рынок

Месяц 1-2: Старт и первичное позиционирование

Официальный запуск

1. Создание аккаунтов в системе контроля версий с регулярными релизами, регистрация на научно-технические конференции.

PR-кампания

1. Публикация технических статей и научных журналах с кейсами внедрения.

Месяц 3-6: Привлечение инвесторов и потенциальных компаний-пользователей

Образовательные инициативы

1. Бесплатные вебинары для ПЛИС-инженеров и разработчиков ("Что такое FPGA SMART NIC и с чем его едят").

2. Участие в научно-технических конференциях.

Месяц 7-12: Масштабирование аудитории

Контент-маркетинг

1. Серия видеороликов на RuTube: «Сетевые решения на FPGA: как снизить задержки и сэкономить ресурсы».

2. Технические гайды на системе контролей версий и Яндекс.Дзен: «Как интегрировать L2 концентратор в существующую инфраструктуру».

Спецпредложения

1. Скидка 25% на первые 10 устройств для НИИ и исследовательских лабораторий.

2. Бесплатная настройка под инфраструктуру для участников международных научных коллабораций.

Год 2: Расширение присутствия и укрепление позиций

Месяц 1-4: Углубление в B2B-сегмент

Партнерская программа

Комиссия 10–15% для интеграторов и реселлеров в сфере научного оборудования.

Месяц 5-8: Укрепление экспертного статуса

Коллаборации

1. Видеообзоры от hardware-инфлюенсеров (например, каналов про вычисления и ПЛИС).

Медийная активность

1. Интервью и статьи в отраслевых изданиях.

Месяц 9-12: Лояльность и экосистема

Программа лояльности

1. Обновления HDL-прошивок бесплатно в течение 3 лет.

2. Приоритетная техническая поддержка для клиентов, заключивших SLA.

Реферальная система

1. Бонус 15 000 руб. за рекомендацию научной лаборатории, заключившей контракт.

Офлайн-мероприятия

1. Воркшопы по low-latency маршрутизации на ПЛИС (Москва, Новосибирск, Дубна).

4.4. Выводы по разделу

Проведённый анализ подтвердил значимый экономический потенциал разрабатываемого L2 концентратора. Продукт закрывает ключевую потребность целевой аудитории в высокопроизводительной, масштабируемой и энергоэффективной системе коммутации на 2-м уровне модели OSI, особенно в условиях высоконагруженных научных и промышленных вычислений.

По сравнению с традиционными решениями на базе процессоров и сетевых карт, предлагаемый концентратор обеспечивает:

1. Снижение энергопотребления и эксплуатационных затрат;
2. Существенное снижение задержек и рост пропускной способности;
3. Гибкость архитектуры и возможность повторной настройки под изменяющиеся требования;
4. Модифицируемость на уровне HDL, в отличие от закрытых и жёстко заданных ASIC/сетевых карт.

Анализ рынка (метод “top-down”) показал, что:

1. Потенциальный рынок (TAM) включает до 900 высокоспециализированных лабораторий и научных команд по всему миру;
2. Реалистично адресуемый сегмент (SAM) составляет около 180 пользователей;
3. Потенциально достижимый объём продаж (SOM) в первые два года — 90 единиц оборудования;
4. При средней стоимости решения в 250 000 руб. и поэтапном выходе на рынок, выручка может превысить 22 млн руб. в течение первых трёх лет.

Стратегия продвижения продукта сфокусирована на высокоточном B2B-маркетинге, партнёрстве с интеграторами и взаимодействии с ключевыми научными коллаборациями (NICA, СКИФ). Внедрение программы лояльности, офлайн-воркшопов и медийной активности укрепит доверие к продукту и обеспечит долгосрочное присутствие на специализированном рынке.

Таким образом, с технической и экономической точек зрения проект обладает устойчивой бизнес-логикой, способен выйти на безубыточность уже на втором году реализации и представляет интерес для узкого, но платёжеспособного сегмента рынка.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Обучающемуся:

Группа 8В11		ФИО Ерофеев Дмитрий Витальевич	
Школа	Инженерная школа информационных технологий и робототехники	Отделение (НОЦ)	ОИТ
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	09.03.01 Информатика и вычислительная техника

Тема ВКР:

Разработка сопряжения между L2 концентратором и сервером обработки данных для эксперимента SPD ускорительного комплекса NICA	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
Введение <ul style="list-style-type: none"> – Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика) и области его применения. – Описание рабочей зоны (рабочего места) при разработке проектного решения/при эксплуатации 	<p><i>Объект исследования:</i> Разработка сопряжения между L2 концентратором и сервером обработки данных для эксперимента SPD ускорительного комплекса NICA.</p> <p><i>Область применения:</i> разработка прошивки ПЛИС для физики высоких энергий.</p> <p><i>Рабочая зона:</i> офис</p> <p><i>Размеры помещения:</i> 6 * 5 м</p> <p><i>Отопление:</i> отопление осуществляется при помощи радиаторной батареи 2 шт.</p> <p><i>Освещение:</i> искусственное в виде 6 светодиодных ламп со световым потоком 3420 лм.</p> <p><i>Вентиляция:</i> приточно-вытяжная вентиляция</p> <p><i>Количество и наименование оборудования рабочей зоны:</i> персональный компьютер (1 шт.), мышь компьютерная (1 шт.), клавиатура (1 шт.), монитор (2 шт.)</p> <p><i>Рабочие процессы, связанные с объектом исследования, осуществляемые в рабочей зоне:</i> Разработка и тестирование программного обеспечения на персональном компьютере</p>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности при разработке проектного решения <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	<p>Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 №197-ФЗ (ред. От 07.04.2025).</p> <p>ГОСТ 12.2. 032-78. Система стандартов безопасности труда. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.</p> <p>ГОСТ 21889-76. Система «человек-машина». Кресло человека-оператора. Общие эргономические требования.</p> <p>ГОСТ 22269-76 Рабочее место оператора. Взаимное расположение элементов рабочего стола.</p> <p>СанПиН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания.</p>
2. Производственная безопасность при разработке проектного решения <ul style="list-style-type: none"> – Анализ выявленных вредных и опасных производственных факторов 	<p>Вредные факторы:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Отсутствие или недостаток естественного или искусственного света в рабочей зоне 2. Повышенный уровень шума

	<p>3. Нервно-психические перегрузки, связанные с напряженностью трудового процесса</p> <p>4. Статические физические перегрузки</p> <p>Опасные факторы:</p> <p>1. Факторы, связанные с электрическим током, под действие которого попадает разработчик</p> <p>Требуемые средства коллективной и индивидуальной защиты от выявленных факторов: система естественного и искусственного освещения, соблюдение режима работы, регулярные перерывы в течение рабочего дня, наличие регулируемого по высоте и наклоне спинки кресла, наличие устройств автоматического отключения и сигнализации</p>
3. Экологическая безопасность при разработке проектного решения	<p>Воздействие на селитебную зону: воздействия не обнаружено.</p> <p>Воздействие на литосферу: загрязнение почвы при неправильной утилизации неисправного оборудования, использованных батареек</p> <p>Воздействие на гидросферу: не выявлено.</p> <p>Воздействие на атмосферу: не выявлено.</p>
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях при разработке проектного решения	<p>Возможные ЧС: обрушение здания, аварии на коммунальных системах жизнеобеспечения населения, пожар, угроза пандемии, пожар, ураганы.</p> <p>Наиболее типичная ЧС: Возникновение пожара из-за неисправности электрического оборудования и/или нарушений правил эксплуатации техники.</p>
Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень	Подпись	Дата
Профессор ОКД ИШНКБ	Федоренко Ольга Юрьевна	Д-р мед. наук		

Задание принял к исполнению обучающийся:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8B11	Ерофеев Дмитрий Витальевич		

5. Социальная ответственность

5.1. Введение

Данная работа посвящена разработке специального дизайна ПЛИС, осуществляющего прием и многоуровневую обработку данных с последовательной агрегацией потоков данных в один, для передачи на сервер сбора данных. Разработка ведется в учебной аудитории площадью 30 квадратных метра, оборудованной системой радиаторного отопления, приточно-вытяжной вентиляцией и качественным искусственным освещением с использованием люминесцентных ламп суммарной световой мощностью 6840 люмен. Основное рабочее пространство включает персональный компьютер с установленным специализированным программным обеспечением и эргономичный рабочий стол, обеспечивающий комфортные условия для продолжительной разработки. Создаваемый дизайн направлен на тестирование пропускной способности PCIe, разработку API для связи отладочной платы и компьютера, а также алгоритмов кластеризации в рамках разработки L2 концентратора для эксперимента SPD ускорительного комплекса NICA.

5.2. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Согласно Трудовому кодексу Российской Федерации [21], устанавливаются ключевые положения, регулирующие отношения между работодателем и работником. Это включает вопросы, связанные с оплатой труда, отпусками, охраной труда, продолжительностью рабочего дня, оформлением больничных и другими аспектами трудовых прав и обязанностей.

Деятельность, связанная с использованием компьютеров, классифицируется как работа категории 1б по степени тяжести. В данную категорию также входят виды труда, осуществляемые в сидячем, стоячем или передвижном положении, сопряженные с умеренным физическим напряжением. В соответствии с нормами, действующими на территории РФ,

стандартная продолжительность рабочей недели составляет 40 часов, хотя для отдельных категорий сотрудников могут применяться сокращённые нормы. Перерыв на обед, согласно статье 108 ТК РФ, должен составлять от 30 минут до 2 часов.

Минимальная площадь рабочего места, оборудованного плоским монитором, должна быть не менее 4,5 м². Температурный режим в помещении должен поддерживаться в пределах 20–24 °С, а скорость движения воздуха — от 0,2 до 0,3 м/с.

ГОСТ 12.2.032-78 [22], регламентирующий требования безопасности труда, определяет, что рабочий стол при организации сидячего рабочего места должен удовлетворять эргономическим требованиям, обеспечивать удобное размещение техники и учитывать её габариты и специфику выполняемой деятельности. При проектировании рабочих мест необходимо учитывать антропометрические характеристики мужчин и женщин; при обслуживании работников обоих полов используются усреднённые показатели. Размещение рабочих столов должно предусматривать ориентацию экранов видеотерминалов боковой стороной к естественным источникам света.

Вопросы, касающиеся обработки персональных данных сотрудников, регулируются положениями Федерального закона №152-ФЗ "О персональных данных" [23]. В соответствии с ним, обработка персональных данных должна осуществляться в рамках заранее определённых целей, а сами данные — быть актуальными, точными и необходимыми для достижения этих целей. Оператор обязан своевременно удалять или обновлять персональные данные в случае утраты ими актуальности.

5.3. Производственная безопасность

Для обеспечения безопасности на производстве необходимо проводить оценку воздействия вредных и опасных производственных факторов на работников. Под вредными факторами понимаются воздействия, способные вызвать развитие профессиональных заболеваний, тогда как опасные факторы могут привести к возникновению производственных травм.

Согласно ГОСТ 12.0.003–2015 ССБТ "Опасные и вредные производственные факторы. Классификация" [24], все производственные факторы делятся на четыре основные группы: физические, химические, биологические и психофизиологические. В рамках проводимого проекта основное внимание было сосредоточено на физических и психофизиологических факторах, обладающих как вредными, так и опасными свойствами. Перечень таких факторов представлен в таблице 1.

Таблица 11 – Опасные и вредные производственные факторы при разработке проекта

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Нормативные документы
Вредные факторы	
Пониженный уровень освещенности	СП 52.13330.2016. Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95* [25].
Умственное перенапряжение, в том числе вызванное информационной нагрузкой.	МР 2.2.9.2311 – 07 «Профилактика стрессового состояния работников при различных видах профессиональной деятельности» [26].
Повышенный уровень электромагнитных излучений	СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания [27]. ГОСТ 12.1.006-84 ССБТ. «Электромагнитные поля радиочастот. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля» [28].
Повышенный уровень шума.	ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности [29].
Статические нагрузки.	ГОСТ 12.2.032-78 «Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования» [22].

Опасные факторы	
Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека	ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты [30].

5.3.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов

Пониженный уровень освещенности

Недостаточный уровень освещённости в рабочей зоне может быть обусловлен нехваткой как искусственного, так и естественного света. Такое освещение отрицательно сказывается на работоспособности, может вызывать утомляемость, зрительный дискомфорт и оказывать негативное влияние на здоровье, в частности на качество зрения.

Согласно СанПиН 1.2.3685-21 [27], уровень освещённости на поверхности рабочего стола должен составлять от 300 до 500 люкс. Осветительные приборы не должны создавать бликов на экране монитора, а яркость самого экрана должна быть не выше 300 люкс. Дополнительно рекомендуется обеспечивать равномерность освещения в поле зрения и ограничивать коэффициент пульсации света значением не более 5%.

Согласно строительным нормам СП 52.13330.2016 [25], работа с персональными компьютерами отнесена к категории Б по точности (различение объектов размером 0,3–0,5 мм) и к подразряду 1, который предполагает длительное зрительное внимание, сосредоточенное на одной поверхности в течение более 70% рабочего времени. Для минимизации негативного влияния недостаточного освещения важно, чтобы яркость экрана и уровень естественного освещения были сопоставимы, что позволяет избежать резких перепадов яркости в поле зрения.

Для повышения качества освещения рекомендуется использовать энергоэффективные светильники с цветовой температурой в диапазоне от 2400 до 6800 К и минимальным уровнем ультрафиолетового излучения. Использование ламп накаливания мощностью 100 Вт и более не

рекомендуется. Улучшению естественного освещения могут способствовать демонтаж отдельных перегородок и применение светоотражающих материалов в интерьере помещения.

Умственное перенапряжение, в том числе вызванное информационной нагрузкой

Продолжительные умственные нагрузки, возникающие при решении сложных задач, могут вызывать ряд неблагоприятных последствий для здоровья. Среди них — расстройства сна, головные боли, чувство слабости, ослабление иммунной защиты организма, нарушения сердечного ритма и ухудшение психоэмоционального состояния.

Согласно методическим рекомендациям МР 2.2.9.2311–07 «Профилактика стрессового состояния работников при различных видах профессиональной деятельности» [26], умственное напряжение рассматривается как один из факторов нервно-психических перегрузок. Эти воздействия отнесены к вредным производственным факторам психофизиологической природы, оказывающим влияние на состояние здоровья работников.

В целях профилактики подобных состояний рекомендуется соблюдать ряд мер: регулярно устраивать перерывы для восстановления когнитивной активности, выполнять физические упражнения, способствующие снятию напряжения, а также чередовать виды деятельности с использованием электронной техники и без неё.

Повышенный уровень электромагнитных излучений

Электрооборудование в целом является источником электромагнитного излучения, что необходимо учитывать при организации рабочего пространства. Продолжительное пребывание в зоне действия повышенных уровней такого излучения может неблагоприятно повлиять на здоровье человека, в особенности на функционирование сердечно-сосудистой и

нервной систем. Для снижения потенциальных рисков следует применять меры защиты, направленные на ограничение воздействия этих факторов.

В рамках рассматриваемого проекта основным источником электромагнитного излучения выступает монитор персонального компьютера, функционирующий в частотном диапазоне от 3 кГц до 400 кГц. Обеспечение безопасности работы с ним требует использования сертифицированных моделей, соответствующих установленным санитарным и техническим нормам, а также требованиям по охране здоровья пользователей, предусмотренным производителями.

Дополнительным источником электромагнитного поля является системный блок, генерирующий излучение с частотой 50 Гц. В соответствии с нормами, изложенными в СанПиН 1.2.3685-21 [27], предельно допустимые значения напряженности электрического поля составляют 0,5 кВ/м для частоты 50 Гц и 25 В/м в диапазоне 30–300 кГц. Дополнительные нормативы по электромагнитной безопасности приводятся в ГОСТ 12.1.006–84 ССБТ [28].

Среди рекомендуемых профилактических мероприятий по снижению воздействия электромагнитного излучения можно выделить заземление системного блока, поддержание достаточной влажности воздуха в помещении, а также соблюдение безопасного расстояния от задней части мониторов и системных блоков соседних рабочих мест.

Отклонение показаний микроклимата

Согласно СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» [27], микроклимат помещений определяется следующими показателями: температура воздуха, скорость его движения, относительная влажность и интенсивность теплового излучения. Отклонения от нормативных значений этих параметров могут отрицательно влиять на здоровье работников.

Так, понижение температуры ниже допустимых пределов может привести к переохлаждению, развитию воспалительных и простудных заболеваний. В свою очередь, чрезмерное повышение температуры вызывает перегрев организма, повышенное потоотделение, обезвоживание, ухудшение общего самочувствия, снижение трудоспособности и трудности с дыханием.

Разработка системы, связанной с работой за компьютером (например, системы защиты от протечек), относится к категории работ 1б согласно СанПиН 1.2.3685-21 [27]. Для этой категории определены как оптимальные, так и допустимые значения микроклиматических условий в холодный и тёплый периоды года.

Оптимальные значения (обеспечивают высокую работоспособность и комфортные условия):

- Холодный период: температура воздуха 21–23°C, температура поверхностей 20–24°C, относительная влажность 40–60%, скорость движения воздуха 0,1 м/с.
- Теплый период: температура воздуха 22–24°C, температура поверхностей 21–25°C, влажность и скорость движения воздуха остаются такими же.

Допустимые параметры микроклимата (не наносят ущерба здоровью, но могут снижать продуктивность):

- Холодный период: температура воздуха 19–20,9°C, температура поверхностей 18–25°C, относительная влажность 15–75%, скорость движения воздуха 0,1 м/с.
- Теплый период: температура воздуха 20–21,9°C, температура поверхностей 19–29°C, относительная влажность 15–75%, скорость движения воздуха 0,3 м/с.

Для поддержания комфортных условий работы рекомендуется использовать следующие методы: ношение одежды, соответствующей температурным условиям; применение кондиционеров или обогревателей для регулирования температуры; регулярное проветривание помещения.

Повышенный уровень шума

В процессе реализации проекта, особенно при длительной работе за компьютером, работник может подвергаться воздействию неблагоприятных звуковых факторов. Основными источниками шума в офисной среде являются системные блоки компьютеров, вентиляторы охлаждения, а также разговоры и иные действия других сотрудников в помещении.

Согласно ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ «Шум. Общие требования безопасности» [29], длительное пребывание в условиях повышенного шума способно вызывать серьёзные последствия для здоровья. В их числе: ухудшение слуха, развитие артериальной гипертензии, а также расстройства со стороны нервной и сердечно-сосудистой систем.

Для решения проблемы шума на рабочем месте в соответствии с ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ [29] рекомендуется выполнение следующих мероприятий: проектирование рабочих мест с учетом допустимых уровней шума; использование малошумного оборудования; оптимальное размещение источников шума для минимизации их влияния; контроль применения средств индивидуальной защиты (наушники, беруши) при необходимости; регулярный мониторинг уровня шума на рабочем месте; проведение профилактических мероприятий для снижения рисков, связанных с воздействием шума.

Статические нагрузки

С Статические физические перегрузки являются одной из форм неблагоприятного воздействия на организм, возникающей при длительном пребывании в одной и той же позе без движения или при выполнении однотипных, монотонных действий. Такие нагрузки обусловлены

продолжительной неподвижностью мышц и суставов, что приводит к ощущению напряжения, усталости и дискомфорта, особенно в области шеи, спины, плеч и рук. При длительном воздействии подобные перегрузки могут стать причиной развития заболеваний опорно-двигательного аппарата.

Причиной возникновения статических перегрузок выступает вынужденная рабочая поза или продолжительное напряжение отдельных групп мышц. Это может привести к таким хроническим заболеваниям, как остеохондроз, сколиоз, варикозное расширение вен, а также к общему снижению иммунитета. Для снижения риска развития подобных проблем необходимо соблюдать правила эргономики рабочего места и поддерживать правильную осанку в процессе работы.

Профилактика статических физических перегрузок предполагает проведение регулярных разминок и упражнений для мышц и суставов, особенно в случаях длительной работы в сидячем положении. Периодические перерывы позволяют снизить переутомление и восстановить мышечный тонус. Важным условием является соблюдение эргономических принципов организации рабочего места: оптимальная высота стула, правильное расположение монитора и клавиатуры, наличие подставки для ног и использование ортопедических подушек для поддержки спины. Также необходимо разнообразить виды деятельности и рабочие позы, чтобы избежать длительного пребывания в однотипном положении.

Требования к организации рабочего места при выполнении работ сидя изложены в ГОСТ 12.2.032-78 «Система стандартов безопасности труда. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования» [22]. В данном стандарте определены параметры, обеспечивающие комфортные условия труда, включая оптимальное расположение монитора, высоту стола и другие элементы, влияющие на снижение мышечного напряжения.

Дополнительно следует учитывать, что статические физические перегрузки могут сопровождаться умственным стрессом, что отражается на

психоэмоциональном состоянии работника. Умственное напряжение, вызванное длительной концентрацией и однотипными действиями, может привести к усталости и эмоциональному выгоранию. ГОСТ Р ИСО 10075-1-2019 «Эргономические принципы обеспечения адекватности умственной нагрузки» содержит рекомендации, направленные на снижение воздействия умственного стресса и повышение устойчивости работника к ментальным перегрузкам.

Существенную роль в профилактике статических нагрузок и умственного перенапряжения играет соблюдение режима труда и отдыха. Вопросы продолжительности рабочего времени и организации перерывов регламентированы статьёй 91 Трудового кодекса Российской Федерации «Понятие рабочего времени. Нормальная продолжительность рабочего времени» [21]. Соблюдение данных норм обязательно для работодателя и способствует поддержанию здоровья и работоспособности сотрудников, занятых в проектной деятельности.

Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека.

Электрический ток представляет собой упорядоченное движение заряженных частиц через проводник под воздействием разности потенциалов. Разработчики, работающие с электрическим оборудованием или электрическими схемами, могут подвергаться воздействию электрического тока, что связано с потенциальной угрозой для их здоровья и жизни.

Воздействие электрического тока на человека может иметь различные последствия. К наиболее опасным из них относятся электротравмы, ожоги, нарушения в работе нервной системы, аритмия сердца, а в отдельных случаях — летальный исход. Травмы могут быть вызваны как непосредственным контактом с токоведущими частями, так и результатом действия электрической дуги или искрения, возникающего в случае повреждения изоляции или неисправности оборудования.

Для предотвращения электротравм необходимо строго соблюдать установленные меры предосторожности. Надежное заземление оборудования, регулярная проверка его технического состояния, а также соответствие электрических установок требованиям стандартов безопасности являются основой предотвращения инцидентов. Особое внимание следует уделять контролю за исправностью изоляции, наличием защитных кожухов и других элементов, исключающих случайный контакт с токоведущими частями.

Наряду с техническими мерами особое значение имеет организационная работа. Сюда входит обучение персонала правилам безопасного обращения с электрооборудованием, проведение инструктажей и проверка знаний требований охраны труда. Контроль за соблюдением этих требований на рабочих местах должен осуществляться систематически. Внедрение системы мониторинга состояния оборудования и плановое техническое обслуживание способствуют снижению вероятности возникновения аварийных ситуаций и минимизации риска электротравм.

Согласно ГОСТ 12.1.038-82 «ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжения прикосновения и тока» [31], на рабочих местах разработчиков установлены нормативные значения, превышение которых недопустимо. В таблице 1 приведены соответствующие предельно допустимые уровни напряжения прикосновения и тока, ориентированные на обеспечение безопасности при эксплуатации электрооборудования в нормальных условиях труда.

Таблица 12 – Предельно допустимые значения напряжения и тока

Род тока	Напряжения прикосновения, В	Ток, мА
Переменный, 50 Гц	2,0	0,3
Постоянный	8,0	1,0

5.4. Экологическая безопасность

В процессе реализации данного проекта предполагается использование персонального компьютера, который не оказывает прямого негативного воздействия на окружающую среду, включая селитебную зону, атмосферу, литосферу и гидросферу. Общие требования к защите почв от загрязнений в рамках производственной деятельности регламентируются ГОСТ 17.4.3.04-85 "Охрана природы (ССОП). Почвы. Общие требования к контролю и охране от загрязнения" [32].

Правила утилизации вышедшей из строя электроники изложены в ГОСТ Р 55102-2012 "Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Руководство по безопасному сбору, хранению, транспортированию и разборке отработавшего электротехнического и электронного оборудования (за исключением ртутьсодержащих устройств и приборов)" [33]. Согласно данному стандарту, оборудование, используемое для разработки проекта, классифицируется как телекоммуникационное оборудование, устройства для записи и воспроизведения звука или изображений, а также оборудование для мониторинга и контроля. Порядок вывода такого оборудования из эксплуатации приведён в приложении Б ГОСТ Р 55102-2012.

Следует отметить, что все устройства, используемые в рамках реализации проекта, находятся в исправном состоянии и не требуют утилизации.

5.5. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Согласно СП 12.13130.2009 [34], офисное помещение можно отнести к категории В (пожароопасное). В соответствии со статьёй 8 Федерального закона от 22.07.2008 № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» [35], пожары, связанные с работой ПЭВМ под напряжением, классифицируются как категория Е (пожары электроустановок под напряжением) и категория А (пожары твердых горючих веществ). Для тушения таких пожаров рекомендуется использовать водные огнетушители с тонкораспыленной струей, порошковые огнетушители типа АВСЕ или

углекислотные огнетушители.

Первичные средства пожаротушения должны размещаться в легкодоступных местах и не должны быть помехой и препятствием при эвакуации персонала из помещений.

Согласно Постановлению Правительства РФ от 16.09.2020 N 1479 (ред. от 24.10.2022) «Об утверждении Правил противопожарного режима в Российской Федерации» [21], при обнаружении пожара или признаков горения в помещении разработчик обязан:

1. Немедленно сообщить о возгорании службе пожарной охраны по телефону экстренных служб, указанному в установленном порядке.
2. Принять меры к тушению пожара в соответствии с инструкциями по пожарной безопасности, включая использование средств первичного пожаротушения, если это безопасно и возможно.
3. Предпринять меры по эвакуации персонала из помещения в соответствии с планом эвакуации и обеспечить безопасное выход из здания.
4. При необходимости оказать первую помощь пострадавшим и предоставить помощь службе пожарной охраны при их прибытии.
5. Следовать инструкциям и указаниям сотрудников службы пожарной охраны, координировать действия с ними и предоставить необходимую информацию о возгорании и условиях в помещении.

Эти действия помогают минимизировать ущерб от пожара и обеспечить безопасность персонала и имущества. Важно также регулярно проводить тренировочные учения и инструктажи с персоналом по действиям в случае пожара, чтобы повысить готовность к чрезвычайным ситуациям и свести к минимуму риски возникновения чрезвычайных ситуаций.

Для предотвращения пожара при использовании компьютерной техники крайне важно строго следовать требованиям пожарной безопасности, установленным в ГОСТе 12.1.004-91 «Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования». Этот стандарт запрещает

подключение к электросети устройств с общей потребляемой мощностью, превышающей допустимую нагрузку, и требует оборудовать здания системами пожарной безопасности для защиты людей от опасных факторов пожара, включая их вторичные эффекты. В случае возникновения пожара необходимо немедленно сообщить о нем в пожарную службу по номерам 01 или 112 и организованно покинуть здание согласно плану эвакуации, представленному на рисунке 10.



Рис. 21 – Схема эвакуации

5.6. Заключение по разделу

В соответствии с нормативными требованиями охраны труда и экологической безопасности, рабочее место для разработки программного обеспечения классифицируется следующим образом: согласно приказу Минтруда России от 15.12.2020 № 903н "Об утверждении Правил по охране труда при эксплуатации электроустановок", помещение не относится к местам с повышенной опасностью, а выполняемые работы соответствуют категории

трудового напряжения I б, так как основная деятельность осуществляется в сидячем положении с минимальным физическим напряжением. Персонал, работающий с электрооборудованием напряжением до 1000 В, должен иметь II группу по электробезопасности.

Помещение отнесено к категории В по взрывопожарной и пожарной опасности (СП 12.13130.2009) из-за наличия горючих материалов. С точки зрения экологического воздействия объект соответствует IV категории (постановление Правительства РФ от 31.12.2020 № 2398), что подтверждает отсутствие вредных выбросов в атмосферу, сбросов загрязняющих веществ и стационарных источников загрязнения.

В рамках анализа социальной ответственности были определены оптимальные параметры освещения, микроклимата и уровня шума, а также обеспечено соответствие рабочей зоны требованиям безопасности. Помещение оснащено необходимыми средствами защиты, что позволяет минимизировать производственные риски при разработке программного обеспечения.

Заключение

В результате выполненной работы был разработан и протестирован прототип L2-концентратора, предназначенного для системы сбора данных в эксперименте SPD, проводимом на ускорительном комплексе NICA. Концентратор реализует критически важную функцию агрегации, буферизации и кластеризации потока данных, поступающих от L1 концентратора, с последующей передачей на сервер обработки.

На этапе подготовки была проведена сравнительная оценка архитектуры аналогичного решения из эксперимента ATLAS, что позволило выделить их сильные стороны и ограничения. На основе этого анализа сформулированы технические требования к собственной системе, с акцентом на высокую пропускную способность, отказоустойчивость и модульность.

Особое внимание в работе уделялось проектированию аппаратной архитектуры на ПЛИС, организации взаимодействия с сервером через интерфейс PCI Express и разработке прикладного программного интерфейса (API) на языке C. Также была реализована и протестирована логика кластеризации входных пакетов, с сортировкой по временным срезам и номерам портов источников, в соответствии с внутренней структурой данных SPD.

Для подтверждения работоспособности выполнены симуляционные испытания с использованием встроенных средств отладки. Проведены практические измерения пропускной способности, подтверждающие соответствие системы заданным параметрам. Кроме того, выполнена верификация целостности передаваемых данных — передано более 1 ТБ информации без потерь и искажений.

Важным результатом работы стало создание собственной программно-аппаратной платформы, способной служить основой для последующего расширения функциональности и интеграции в общую инфраструктуру эксперимента. В дальнейшем планируется реализация полной связки с внешней памятью DDR4, оптимизация механизма обмена по PCIe, а также

переход на более производительное ядро DMA. Все поставленные задачи были выполнены в полном объеме, а разработанный прототип обладает высоким потенциалом для дальнейшего развития и применения в составе реальной системы сбора данных.

Список использованных источников

1. Trubnikov G. V. et al., Project of the Nuclotron-based Ion Collider Facility (NICA) at JINR // Proc. EPAC'08, Genoa, Italy. 2008. PaperID WEPP029. P. 2581–2583.
2. Kekelidze V. D. et al., Three stages of the NICA accelerator complex // Eur. Phys. J. A. 2016. Vol. 52, No. 211. P. 390.
3. Syresin E. et al., Challenges of low energy hadron // Proc. IPAC 2022. 2022. Paper ID WEPOP.
4. Technical Project of the Object “NICA Complex” [Электронный ресурс]. URL: https://nica.jinr.ru/documents/TDR_spec_Fin0_for_site_eng.pdf (дата обращения: 28.05.2025).
5. Abazov V. et al., Technical Design Report of the Spin Physics Detector at NICA [Электронный ресурс]. URL: <https://nsr-jinr.ru/index.php/nsr/article/view/35> (дата обращения: 28.05.2025).
6. Abazov V. et al. [SPD Collaboration] Technical Design Report of the Spin Physics Detector at NICA. – 2024. – 4. – arXiv:2404.08317. – 362 с.
7. Бернгардт А.Е., Ерофеев Д.В., Борщ В.Н. Разработка L2-концентратора для эксперимента SPD на ускорительном комплексе NICA [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/10.17223/00213411/67/12/11> (дата обращения: 28.05.2025).
8. Pan Y., Guo Z. Design of a Fast and Scalable FPGA-Based Bitmap for RDMA Networks [Электронный ресурс] // Electronics (MDPI). – 2024. – Vol. 13, no. 24. – URL: <https://www.mdpi.com/2079-9292/13/24/4900> (дата обращения: 29.05.2025).
9. Huang X., Guo Z., Song M., Guo Y. A Reconfigurable Accelerator for Software Data Plane Based on FPGA SmartNIC [Электронный ресурс] // Electronics (MDPI). – 2021. – Vol. 10, no. 16. – URL: <https://www.mdpi.com/2079-9292/10/16/1927> (дата обращения: 29.05.2025).

10. ZYNQ UltraScale+ FPGA Development Board Z19-P User Manual [Электронный ресурс]. – Alinx Electronic Limited, 2022. – Режим доступа: https://www.alinx.com/public/upload/file/Z19-P_User_Manual.pdf (дата обращения: 29.05.2025).

11. FMC to 4x SFP Module FH1223 User Manual – Alinx Electronic Limited. – 2022. – URL: <https://www.en.alinx.com/Product/FMC-Cards/Communication/FH1223.html> (дата обращения: 29.05.2025)

12. 10G/25G High Speed Ethernet Subsystem v4.1 [Электронный ресурс] // AMD. – 2025. – URL: https://docs.amd.com/viewer/book-attachment/~wx6OG2uaH~yEHyW1Ogzew/2w60s_1zc12M3z4g4YYpqg-~wx6OG2uaH~yEHyW1Ogzew (дата обращения: 29.05.2025).

13. Embedded FIFO Generator LogiCORE IP Product Guide (PG327) [Электронный ресурс] // AMD. – 2025. – URL: <https://docs.amd.com/r/en-US/pg327-emb-fifo-gen/Common-Clock-FIFO-Block/Ultra-and-Distributed-RAM> (дата обращения: 29.05.2025)

14. DMA/Bridge Subsystem for PCI Express Product Guide [Электронный ресурс] // AMD. – 2024. – Режим доступа: https://docs.amd.com/viewer/book-attachment/Amxex287WoAaBahiV1hh6w/8tW~N1B_U0~jtyJNZb8T0Q-Amxex287WoAaBahiV1hh6w (дата обращения: 29.05.2025).

15. Anderson J., Borga A., Boterenbrood H., Chen H., Chen K., Drake G., Dönszelmann M., Francis D., Gorini B., Lanni F. A new approach to front-end electronics interfacing in the ATLAS experiment [Электронный ресурс] // IOP Science. – 2016. – Режим доступа: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/11/01/C01055> (дата обращения: 29.05.2025).

16. Anderson J., Borga A., Boterenbrood H., Chen H., Chen K., Drake G., Francis D., Gorini B., Lanni F., Lehmann Miotto G., Levinson L., Narevicius J., Plessl C., Roich A., Ryu S., Schreuder F., Schumacher J., Vandelli W., Vermeulen J., Zhang J. FELIX: a High-Throughput Network Approach for Interfacing to Front End Electronics for ATLAS Upgrades [Текст] : электронный ресурс // CERN. –

2015. – Режим доступа: <https://cds.cern.ch/record/2016626/files/pdf.pdf> (дата обращения: 29.05.2025).

17. Manavar Piyush, Nambiar Manoj, Sumeet Nupur, Singhal Rekha, Choudhary Sharod, Pandit Amey. Experience with PCIe streaming on FPGA for high throughput ML inferencing [Электронный ресурс]. – TCS Research, Tata Consultancy Services, Mumbai, India. – URL: <https://arxiv.org/pdf/2110.11719> (дата обращения: 29.05.2025).

18. ALINX. ZYNQMPSoC 开发平台基础教程 [Электронный ресурс]. – URL: https://www.dropbox.com/scl/fo/bcqs1auwpoz64at6jr4i1/AL7SLaXqUV_pBD7yiFlfuBc/Z19_P?dl=0&preview=course_s1_ALINX_ZYNQ_MPSoC%E5%BC%80%E5%8F%91%E5%B9%B3%E5%8F%B0%E5%9F%BA%E7%A1%80%E6%95%99%E7%A8%8BV1.01.pdf&rlkey=l5qeyqoy49saljs90y2v53w6w&subfolder_nav_tracking=1 (дата обращения: 29.05.2025).

19. IEEE. IEEE Standard for Ethernet (802.3) [Электронный ресурс]. – 2022. – URL: <https://standards.ieee.org/ieee/802.3/10422/> (дата обращения: 29.05.2025).

20. Boikov A. Data Acquisition and Processing System of the SPD Experiment. – [Электронный ресурс]. – 2025. – URL: <https://spd.jinr.ru/wp-content/uploads/2025/05/Boikov2025.pdf> (дата обращения: 09.06.2025).

21. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 №197-ФЗ (в ред. от 07.04.2025).

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

23. Федеральный закон от 27.07.2006 №152-ФЗ «О персональных данных».

24. ГОСТ 12.0.003-2015. ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.

25. СП 52.13330.2016. Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95* [Электронный ресурс] // Кодекс : сайт. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/728350512> (дата обращения: 18.03.2022).

26. МР 2.2.9.2311–07. Профилактика стрессового состояния работников при различных видах профессиональной деятельности.

27. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания [Электронный ресурс] // Кодекс : сайт. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115> (дата обращения: 18.03.2022).

28. ГОСТ 12.1.006-84. ССБТ. Электромагнитные поля радиочастот. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля.

29. ГОСТ 12.1.003-2014. ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.

30. ГОСТ 12.1.019-2017. ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты [Электронный ресурс] // Кодекс : сайт. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200161238> (дата обращения: 18.03.2022).

31. ГОСТ 12.1.038-82. ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов [Электронный ресурс] // Кодекс : сайт. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/5200313> (дата обращения: 21.03.2022).

32. ГОСТ 17.4.3.04-85. Охрана природы (ССОП). Почвы. Общие требования к контролю и охране от загрязнения.

33. ГОСТ Р 55102-2012. Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Руководство по безопасному сбору, хранению, транспортированию и разборке отработавшего электротехнического и электронного оборудования, за исключением ртутьсодержащих устройств и приборов.

34. СП 12.13130.2009. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности

[Электронный ресурс] // Кодекс : сайт. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200071156> (дата обращения: 24.03.2022).

35. Федеральный закон от 22.07.2008 №123-ФЗ (ред. от 30.04.2021).
Технический регламент о требованиях пожарной безопасности (в ред. от 25.12.2023).