

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
НАУКИ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ ИМ. Г.И. БУДКЕРА
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

Эпштейн Леонид Борисович

**Первичный триггер электромагнитного калориметра
эксперимента СОМЕТ**

1.3.2 Приборы и методы экспериментальной физики

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат физико-математических наук, доцент
Григорьев Дмитрий Николаевич

Новосибирск — 2026

Оглавление

	Стр.
Введение	4
Глава 1. Общее описание эксперимента СОМЕТ	15
1.1 Фоны	17
1.2 Формирование мюонного пучка	20
1.2.1 Протонный пучок	20
1.2.2 Мюонная мишень	21
Глава 2. Электромагнитный калориметр	24
2.1 Электромагнитный калориметр	24
2.1.1 Структура электромагнитного калориметра	25
2.1.2 Электроника калориметра	27
2.2 Триггерная система и система сбора данных	32
2.2.1 Триггерная система	33
2.2.2 Система сбора данных	37
Глава 3. Система первичного триггера электромагнитного калориметра	39
3.1 Технические требования, предъявляемые к электронике первичного триггера электромагнитного калориметра	40
3.2 Описание общей структуры реализации системы первичного триггера электромагнитного калориметра	40
3.3 Техническая реализация первичного триггера электромагнитного калориметра	44
3.3.1 Аналоговая часть электронного тракта	44
3.3.2 Цифровая часть первичного триггера	48
3.4 Испытания радиационной стойкости	52
3.5 Алгоритм поиска кластеров	59
3.5.1 Моделирование алгоритма системы первичного триггера	60
3.5.2 Аппаратная реализация алгоритма	65

	Стр.
3.6 Измерение энергетического разрешения и эффективности системы первичного триггера электромагнитного калориметра	68
3.7 Измерение времени принятия решения и задержки выработки триггерного сигнала электромагнитного калориметра	71
3.8 Результаты измерений	78
Заключение	79
Список литературы	81
Приложение А. Форматы данных электроники	88
А.1 Формат данных FC7	88
А.2 Формат данных FCT	89
А.3 Формат передаваемых данных из платы первичного триггера .	90
Приложение Б. Принципиальные схемы электроники	91
Б.1 Распределитель напряжения ЛФД	91
Б.2 Принципиальная схема преобразователя сигналов ЗЧУ-EROS .	92
Б.3 Принципиальная схема оцифровывающего канала первичного триггера	93
Приложение В. Результаты радиационных испытаний стабилизаторов напряжения и цифровых микросхем на устойчивость к гамма-излучению	95
Приложение Г. Свидетельства и акты	97
Г.1 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ	97
Г.2 Акт о внедрении программы первичного триггера для ЭВМ . .	98
Г.3 Акт о внедрении аппаратуры первичного триггера	99

Введение

Актуальность темы исследования

В экспериментах на Большом Адронном Коллайдере (БАК) открыта последняя недостающая частица Стандартной Модели (СМ) — бозон Хиггса [1]. В то же время не обнаружено ни одной частицы, выходящей за рамки Стандартной Модели, более того, почти все полученные к настоящему времени результаты хорошо согласуются с предсказаниями Стандартной Модели. Однако из астрофизических данных известно, что Стандартная Модель неполна. Например, она не описывает количество барионной материи во Вселенной или состав темной материи. Поэтому на передний план выходят высокоточные эксперименты по поиску новой физики в запрещенных в Стандартной Модели процессах.

Одним из таких процессов является нарушение закона сохранения лептонного числа в заряженном секторе. С учетом осцилляций нейтрино в рамках Стандартной Модели вероятность подобных процессов предсказывается на необнаружимо малом уровне порядка $O(10^{-54})$. В то же время, во многих новых теориях возникают процессы, проходящие с изменением лептонного числа с близкой по порядку величины вероятностью к планируемой экспериментальной чувствительности 10^{-17} . Поэтому изучение таких процессов важно для поиска новой физики, выходящей за рамки Стандартной Модели, в том числе при энергиях на 2 порядка больше доступных для БАК.

Экспериментальное обнаружение процессов с нарушением лептонного числа в заряженном секторе безусловно означает открытие новой физики, выходящей за пределы Стандартной Модели. Отрицательный же результат приведет к серьезным ограничениям для многих современных теоретических моделей, которые предсказывают большую вероятность данного процесса. Поэтому даже отрицательные результаты экспериментов будут иметь большое значение для развития теоретической физики.

Для экспериментального обнаружения таких процессов необходимо спроектировать и разработать детектор, который бы позволил достичь требуемой точности. Одной из основных частей детектора является триггерная система, задачей которой является отбор предположительно полезных событий.

Степень разработанности темы исследования

В настоящее время самое жесткое ограничение на возможность нарушения лептонного числа в заряженном секторе поставлено в эксперименте MEG-II. В опубликованной участниками эксперимента MEG-II работе [2] приведено ограничение на вероятность безнейтринного распада положительного мюона на позитрон и гамма-квант меньше 2.2×10^{-13} 90% доверительной вероятностью. Эксперименты по распаду положительного мюона на позитрон и гамма-квант максимально чувствительны к петлевым диаграммам с участием частиц вне Стандартной модели, однако вклад древесных диаграмм в него равен нулю в силу симметрии. Целью эксперимента COMET [3] является регистрация когерентной конверсии мюона в электрон в поле ядра без излучения нейтрино. Данный процесс имеет меньшую чувствительность к проявлениям новой физики в петлевых диаграммах, но в то же время вклад древесных диаграмм в нем не равен нулю. В эксперименте Mu3e [4] планируется изучать процесс распада положительного мюона на 2 позитрона и электрон, что также является примером нарушения закона сохранения лептонного числа. Этот процесс чувствителен и к петлевым диаграммам, и к древесным диаграммам, но с другими весами по отношению к процессу конверсии. Таким образом, эксперименты MEG, Mu3e и COMET дополняют друг друга и совместный анализ полученных данных позволит не только увеличить чувствительность к проявлениям новой физики, но и позволит получить информацию о ее свойствах.

Лучшее текущее экспериментальное ограничение на вероятность когерентной конверсии мюона в электрон в поле атомного ядра 7×10^{-13} , поставленное экспериментом SINDRUM II [5], недостаточно для изучения новой физики. Целью эксперимента COMET является увеличение чувствительности на 2 порядка до 3×10^{-15} на первом этапе и еще на 2 порядка до 3×10^{-17} в ходе реализации всего проекта. Также в настоящее время в Национальной ускорительной лаборатории им. Ферми (Фермилаб), США, ведется подготовка другого эксперимента по поиску безнейтринной конверсии мюона в электрон в поле ядра, Mu2e [6], с такой же проектной чувствительностью 3×10^{-17} . Это свидетельствует о высокой заинтересованности физического сообщества в результатах этих экспериментов. Другим направлением поиска нарушения закона сохранения лептонного числа в заряженном секторе являет-

ся поиск безнейтринных распадов тау-лептона [7]. Однако в настоящее время их чувствительность сильно уступает экспериментам с мюонами.

Для эксперимента COMET необходим мощный импульсный протонный пучок с разделением сгустков частиц по времени порядка времени жизни мюона (2 мкс). Поэтому было принято решение, что эксперимент будет проводиться на ускорителе протонов с рекордной интенсивностью в J-PARC в Японии [8].

Схема эксперимента следующая: интенсивный пучок протонов взаимодействует с мишенью, после чего пионы и рожденные в их распаде мюоны направляются в специальный канал с соленоидальным магнитным полем, в котором происходит отбор мюонов. На выходе из канала медленные мюоны попадают на вторичную мишень, сделанную из алюминия, в которой они останавливаются и захватываются на орбиту, где “происходит” их конверсионный переход с испусканием электрона. Искомый процесс $\mu^-N \rightarrow e^-N$ является фактически двухчастичным. Сигнальными событиями являются моноэнергетические электроны с энергией равной массе мюона минус энергия отдачи ядра и энергия связи мюона в атоме ($E_{\mu e} = m_\mu - B_\mu - E_{recoil}$, где m_μ — масса мюона 105.66 МэВ, B_μ — энергия связи мюонного атома в 1S-состоянии 0.475 МэВ и E_{recoil} — энергия отдачи ядра 0.22 МэВ для алюминиевой мишени, и $E_{\mu e} = 104.97$ МэВ).

В связи со сложностью проведения принято решение разделить эксперимент на 2 этапа. На первом этапе [9] будет использоваться только один соленоид с поворотом на 90° градусов. Физическая задача этого этапа — достичь чувствительности 3×10^{-15} с детектором на основе цилиндрической дрейфовой камеры (CyDec), и измерить фоны с частью детектора на основе дрейфовых трубок и сцинтилляционных кристаллов (Straw-tracker and Electromagnetic CALorimeter — StrECAL), необходимых для разработки второго этапа, так как эти данные отсутствуют. На втором этапе [10] будет использоваться полномасштабная транспортная линия из соленоидов с поворотом на 360° и детектором на основе дрейфовых трубок и сцинтилляционных кристаллов.

В данном эксперименте нет физических совпадений и необходимое сигнальное событие от фона будет отбираться по измеренному в координатной системе импульсу. Основной задачей калориметра является выработка сигнала запуска детектора, главным аргументом для которого будет энергия

электронов, а так же разделение частиц по энергии и импульсу (E/p), и предоставление начальной временной отметки (T_0) и начальной точки для поиска треков в координатной системе [11]. Группа ученых из ИЯФ СО РАН (г.Новосибирск) принимает активное участие в разработке калориметра совместно с группами из ОИЯИ (г.Дубна), учебных учреждений и научных организаций Японии.

Предварительная электроника электромагнитного калориметра должна одновременно обеспечивать как энергетическое, так и временное разрешения. Поэтому к ней предъявляются противоречивые требования на быстродействие и низкий уровень шумов [12].

Согласно проведенным расчетам, для обеспечения допустимой частоты запуска детектора энергетическое разрешение в режиме реального времени должно быть не хуже 5%. Ввиду огромной фоновой загрузки необходимо оптимизировать условия на выдачу сигнала запуска триггера электромагнитного калориметра детектора, являющегося основной запускающей системой, как компромисс между эффективностью и загрузкой системы сбора данных (ССД). Оптимизация включает как аппаратную функцию, так и программную обработку данных. Для этого был разработан способ выработки сигнала о нахождении предполагаемого события, с целью запуска процедуры чтения информации с подсистем детектора. Данный способ основан на использовании специального модуля, анализирующего непрерывно поступающую информацию в режиме реального времени (онлайн) без мертвого времени за короткий промежуток времени (1 мкс). При этом из-за большой фоновой загрузки, вызванной нейтронами и гамма-квантами (с энерговыделением 1-10 МэВ), возникает две проблемы: наложение сигналов в каналах калориметра и повышенный радиационный фон в зоне расположения детектора. Кроме того энергия попадающей в калориметр частицы распределяется между несколькими кристаллами. Поэтому для решения первой проблемы для регистрации электронов с энергией 104.97 МэВ, производящих сигналы в нескольких кристаллах, необходимо определить оптимальный размер кластера, оперируя группой кристаллов. Для решения второй проблемы при проектировании системы необходимо учитывать вероятность повышенного радиоактивного фона.

Основную часть данной работы составляют результаты работы по разработке и созданию первичного триггера электромагнитного калориметра детектора эксперимента СОМЕТ.

Цель и задачи диссертационной работы

Целью диссертационной работы являлось создание системы запуска (первичного триггера) электромагнитного калориметра для эксперимента СОМЕТ. Для достижения поставленной цели в рамках диссертационной работы необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Спроектировать систему запуска регистрации событий для эксперимента СОМЕТ, позволяющую обеспечить энергетическое разрешение в режиме реального времени не хуже 5% для обеспечения допустимой частоты запуска детектора.
2. Разработать алгоритм анализа данных конвейерного типа (без “мертвого” времени), который должен учитывать как статистические флуктуации развития электромагнитного ливня, так и большую загрузку от фоновых событий.
3. Провести экспериментальные исследования энергетического разрешения и эффективности системы первичного триггера электромагнитного калориметра, а так же расчетные и экспериментальные исследования времени принятия решения и задержки выработки триггерного сигнала.
4. Исследовать стабильность работы различных типов микросхем: операционных усилителей (ОУ), аналого-цифровых преобразователей (АЦП), флэш-памяти, программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) и всего модуля в условиях высокого радиационного облучения до 2 кГр и потока 10^{12} нейтронов/см², чтобы выбрать наиболее подходящие типы для обработки аналоговых и цифровых сигналов.

Научная новизна

1. Создана уникальная система первичного триггера, анализирующая форму входных импульсов с 128 каналов в режиме реального времени, работающих на частоте дискретизации 80 МГц в амплитудном динамическом диапазоне 8 бит. Особенностями системы является

- возможность программного управления параметрами измерительных трактов (амплитудный диапазон, частота дискретизации) и режимами работы алгоритма кластеризации (величины порогов, размеры кластеров и т.д.). Использование ПЛИС больших размеров и ёмкости для построения системы первичного триггера позволило использовать ее в детектирующих системах с большим числом каналов, характерных для современных крупномасштабных экспериментов по физике элементарных частиц. Так же в системе первичного триггера реализована возможность программной модификации алгоритма обработки данных при помощи загружаемого в ПЛИС цифрового узла конфигурационного файла. Это позволит использовать его не только в качестве системы запуска регистрации событий для электромагнитного калориметра эксперимента СОМЕТ, но и в других экспериментах физики элементарных частиц.
2. Создан и реализован на базе элементов ПЛИС уникальный алгоритм анализа сигналов с групп кристаллов в реальном времени, который учитывает как статистические флуктуации развития электромагнитного ливня, так и большую фоновую загрузку. Благодаря калибровочным процедурам удалось обеспечить следующие характеристики трактов системы запуска регистрации событий: амплитудный динамический диапазон 10 бит (достигается цифровым образом внутри ПЛИС) при частоте дискретизации 80 МГц и энергетическое разрешение в режиме реального времени 4.5%, сравнимое с полученным после “офлайн” обработки записанных данных.
 3. Создана система запуска регистрации событий с возможностью работы в условиях повышенного радиационного уровня до 2 кГр и 10^{12} потока нейтронов/см².

Теоретическая и практическая значимость

Теоретической значимостью работы является возможное обнаружение физики за рамками Стандартной модели или установление более жесткого ограничения на процесс когерентной конверсии мюона в электрон в поле ядра без излучения нейтрино. Созданная система запуска регистрации событий в рамках эксперимента СОМЕТ позволит получить уникальные результаты по поиску нарушения закона сохранения лептонного числа в заряженном

секторе с недоступной на данный момент точностью. Стандартная Модель предсказывает исчезающе малую вероятность исследуемого процесса, меньше 10^{-54} . Данные эксперимента, полученные с помощью разработанной системы первичного триггера, должны позволить поставить предел в 3×10^{-17} в предполагаемом безнейтринном процессе конверсии электрона в мюон.

Практической значимостью работы является успешный опыт создания и проверки электронной системы на стенде с использованием сигнала с генератора и сигналов от частиц космического излучения, а также на выведенном пучке электронов в течение нескольких сезонов. Полученные в рамках диссертационной работы результаты исследования имеют большое значение для создания аналогичных систем запуска регистрации и “онлайн” обработки сигналов на современных экспериментах по физике элементарных частиц.

Методология и методы исследования

Главный методический подход, реализованный в работе, заключается в последовательном сочетании этапов разработки, изготовления и испытания основных модулей системы первичного триггера. Для проектирования схем и трассировки печатных плат использовалась система автоматизированного проектирования Altium Designer, которая позволяет проводить моделирование работы небольших схем. Для разработки и написания кода алгоритма первичного триггера использовалось ПО фирмы AMD (Xilinx) ISE 13.7. Для предварительной проверки работы кода использовалась ПО Modelsim. Изготовленные компоненты прошли все необходимые виды испытаний. Разработанная триггерная система на основе радиационно апробированных элементов (до 2 кГр и 10^{12} потока нейтронов/см²) принята к эксплуатации в эксперименте СОМЕТ. Работоспособность и стабильность заявленных параметров системы первичного триггера проверены на стенде и выведенном пучке электронов.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Разработанная концепция системы первичного триггера электромагнитного калориметра позволит запускать регистрацию событий эксперимента СОМЕТ по поиску нарушения законов сохранения лептонного числа.

2. Разработанный и реализованный на базе элементов ПЛИС алгоритм анализа данных системы первичного триггера электромагнитного калориметра использует сигналы с компактных групп кристаллов и работает в режиме реального времени.
3. Созданная и успешно испытанная система первичного триггера электромагнитного калориметра для эксперимента по нарушению закона сохранения лептонного числа СОМЕТ обеспечивает энергетическое разрешение в режиме реального времени лучше 5% при работе с необходимой частотой запусков детектора.
4. Результаты проведенных экспериментальных исследований энергетического разрешения и эффективности системы первичного триггера электромагнитного калориметра, а так же расчетных и экспериментальных исследований времени принятия решения и задержки выработки триггерного сигнала, удовлетворяют всем техническим и физическим требованиям.
5. Исследованная стабильность работы различных типов микросхем: стабилизаторов напряжения, ОУ, АЦП, флэш-памяти и ПЛИС, и всего модуля в условиях высокого радиационного облучения до 2 кГр и потока 10^{12} нейтронов/см², позволяет отобрать и использовать наиболее подходящие типы микросхем для обработки аналоговых и цифровых сигналов в системе первичного триггера электромагнитного калориметра.

Степень достоверности и апробация результатов

Работы, составляющие материал диссертации, многократно докладывались и обсуждались на совещаниях коллаборации эксперимента СОМЕТ (СОМЕТ Collaboration meeting). Результаты работы были представлены в виде докладов на 3 международных конференциях и опубликованы в их трудах: Topical Workshop on Electronics for Particle Physics (TWEPP-2016) (Карлсруэ, Германия, 2016г.); 2018 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference Proceedings (IEEE NSS/MIC) (Сидней, Австралия, 2018г.); Topical Workshop on Electronics for Particle Physics (TWEPP-2019) (Сантьяго де Компостела, Испания, 2019г.).

Исследования были поддержаны Российским фондом фундаментальных исследований (Соглашения № 13-02-92109 ЯФ_а, 2013–2014; №14-22-03071 офи_м, 2014–2016; 17-02-01073 А, 2017–2019; 18-52-00004 Бел_а, 2018–2019).

Публикации

Основные результаты по теме диссертации изложены в семи печатных и электронных изданиях, пять из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК (включая периодические научные издания, индексируемые Web of Science и Scopus) [11; 13–16] и две в сборниках тезисов докладов научных конференций, опубликованных в электронных изданиях индексируемых Web of Science и Scopus [17; 18]. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ [19].

В рецензируемых научных изданиях, включённых в перечень ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации:

1. Анализ данных электромагнитного калориметра эксперимента COMET в режиме реального времени. / Л. Эпштейн, Р. Ахметшин, Д. Григорьев [и др.] // Текст: электронный // Сибирский физический журнал. Серия: Физика высоких энергий, ускорителей и высокотемпературной плазмы. — 2017. — Т. 12, № 4. — С. 5–13. — URL: <https://doi.org/10.25205/2541-9447-2017-12-4-5-13>. — Дата публикации: 12.2017.
2. Система предварительного отбора событий электромагнитного калориметра эксперимента COMET. / Л. Эпштейн, Д. Шёлковый, Д. Григорьев, Ю. Юдин // Текст: электронный // Известия НАН Беларуси. Серия физико-математических наук. — 2019. — Т. 56, № 1. — С. 97–109. — URL: <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2019-55-1-97-109>. — Дата публикации: 2019.
3. COMET Phase-I technical design report / L. Epshteyn, R. Abramishvili, G. Adamov [et al.] // Текст: электронный // Progress of Theoretical and Experimental Physics. — 2020. — Т. 2020, № 3. — С. 033C01. — URL: <https://doi.org/10.1093/ptep/ptz125>. — Дата публикации: 13.03.2020.
4. Study of the COMET experiment / L. B. Epshteyn, D. N. Grigoriev, D. V. Shoukavy // Текст: электронный // Moscow University Physics Bulletin. — 2025. — Т. 79, S1. — С. 1–7. — URL:

- <https://doi.org/10.3103/S002713492470067X>. — Дата публикации: 20.02.2025.
5. Эпштейн, Л. Система первичного триггера электромагнитного калориметра эксперимента СОМЕТ / Л. Эпштейн, Д. Григорьев, Д. Шёлковый // Текст: электронный // Журнал технической физики. — 2025. — Т. 95, № 11. — С. 2256—2264. — URL: <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/61610>. — Дата публикации: 21.10.2025.
 6. Государственная регистрация программы для ЭВМ №2023616419 от 27.03.2023. «Программное обеспечение для триггерной системы электронного калориметра эксперимента СОМЕТ». URL: <https://fips.ru/EGD/642562ef-dca4-4f7a-8e58-f19aa8608d7e>.

Личный вклад

Автор принимал определяющее участие в получении научных результатов, лежащих в основе диссертации, для проверки которых были созданы стенд и тестовые программы. Результаты разработки и испытаний на стенде и выведенном пучке были опубликованы в статье [13], написанной автором лично, при совместном обсуждении с соавторами.

Для проверки концепции и подбора параметров триггерного алгоритма было проведено моделирование системы первичного триггера. Автор принимал активное участие в моделировании и анализе данных после испытаний системы, описанных в статье [14].

В основном модуле первичного триггера автором были лично реализованы алгоритмы цифровой обработки сигналов (ЦОС), выполняемые на базовых логических элементах ПЛИС, о чем было получено свидетельство [19]. Авторский вклад соискателя в статье [11] заключается в полном описании структуры системы первичного триггера электромагнитного калориметра.

Непосредственно автором была проведена оптимизация конструкции и алгоритма системы первичного триггера электромагнитного калориметра. Автор лично занимался отладкой и калибровкой модулей, тестированием на выведенном пучке частиц и финальными испытаниями первичного триггера в составе всей системы. Результаты испытаний окончательной конструкции и алгоритма были описаны автором лично и приведены в публикациях [15; 16].

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения и 4 приложений. Полный объём диссертации составляет 99 страниц, включая 65 рисунков и 7 таблиц. Список литературы содержит 47 наименований.

Глава 1. Общее описание эксперимента COMET

Эксперимент COMET [11], который будет проводиться на ускорителе протонов с рекордной интенсивностью в J-PARC (Японии) [8], рисунок 1.1, является одним из прецизионных экспериментов, направленных на поиск физики элементарных частиц за пределами Стандартной модели. Главная задача проекта — поиск когерентной конверсии мюона в электрон в поле ядра без излучения нейтрино: $\mu^- + N(A, Z) \rightarrow e^- + N(A, Z)$ ($\mu - e$ конверсия) [3], что является нарушением закона сохранения лептонного числа (Charged Lepton Flavour Violation — CLFV), с чувствительностью к единичному событию (ЧЭС) $\sim 3 \times 10^{-17}$, которая превосходит результаты лучшего предыдущего эксперимента — SINDRUM II на 4 порядка [5].



Рисунок 1.1 — Место проведения эксперимента COMET

Конверсионный электрон является моноэнергетическим, и его энергия $E_{\mu-e}$ определяется выражением

$$E_{\mu-e} = m_{\mu} - B_{\mu} - E_{recoil} \quad (1.1)$$

где m_{μ} — масса мюона, B_{μ} — энергия связи мюонного атома в $1S$ -состоянии, зависящая от материала, E_{recoil} — энергия отдачи ядра. В эксперименте COMET на Этапе-I в качестве материала, в котором останавливаются мюоны, будет

использоваться алюминий, для которого $E_{\mu-e}$, согласно формуле 1.1, составляет $105.66 \text{ МэВ} - 0.47 \text{ МэВ} - 0.22 \text{ МэВ} = 104.97 \text{ МэВ}$. Поскольку начальное и конечное ядра одинаковы, переход в основное состояние в последнем ядре является когерентным процессом, поэтому скорость перехода увеличивается пропорционально количеству нуклонов в ядре.

Из-за сложности разрабатываемых транспортных поворотных магнитов было принято решение разделить эксперимент на 2 этапа, как показано на рисунке 1.2 [13]. На первом этапе будет использоваться только половина одной С-образной транспортной системы, соответствующей повороту транспортируемых частиц на 90° . На втором этапе будет использоваться полномасштабная транспортная линия соленоидов с поворотом на 360° . Физическая задача Этапа-I — достичь чувствительности 3×10^{-15} . Так как на этом этапе поворот только на 90° , то дрейфовые трубки не смогут адекватно работать из-за большой фоновой загрузки. При таких условиях можно использовать детектор на основе цилиндрической дрейфовой камеры, так как большая часть фона не долетает до внутренней стенки камеры. Но при этом после завершения физического набора данных в конце работы Этапа-I цилиндрическая дрейфовая камера будет заменена на систему StrECAL по трем причинам:

- Во-первых, необходимо проверить в реальных условиях параметры прототипов дорогостоящих систем, которые планируется использовать на Этапе-II.
- Во-вторых, на Этапе-I будет использоваться только четверть от общего количества кристаллов.
- В-третьих, необходимо произвести измерения фонов для понимания ситуации на Этапе-II с помощью детекторной секции, состоящей из пяти станций координатного детектора на основе дрейфовых трубок и электромагнитного калориметра на базе сцинтилляционных кристаллов.

Система дрейфовых трубок должна точно измерять импульс частицы по отклонению в магнитном поле и определять координаты частицы. Дополнительно, с помощью информации о dE/dx , полученной с системы дрейфовых трубок, совместно с информацией о E/p , предоставленной с калориметра, становится возможным идентифицировать, какая именно частица прошла через детектор. И так как фон не релятивистский, то будут отличия в dE/dx и E/p в зависимости от типа частиц [11].

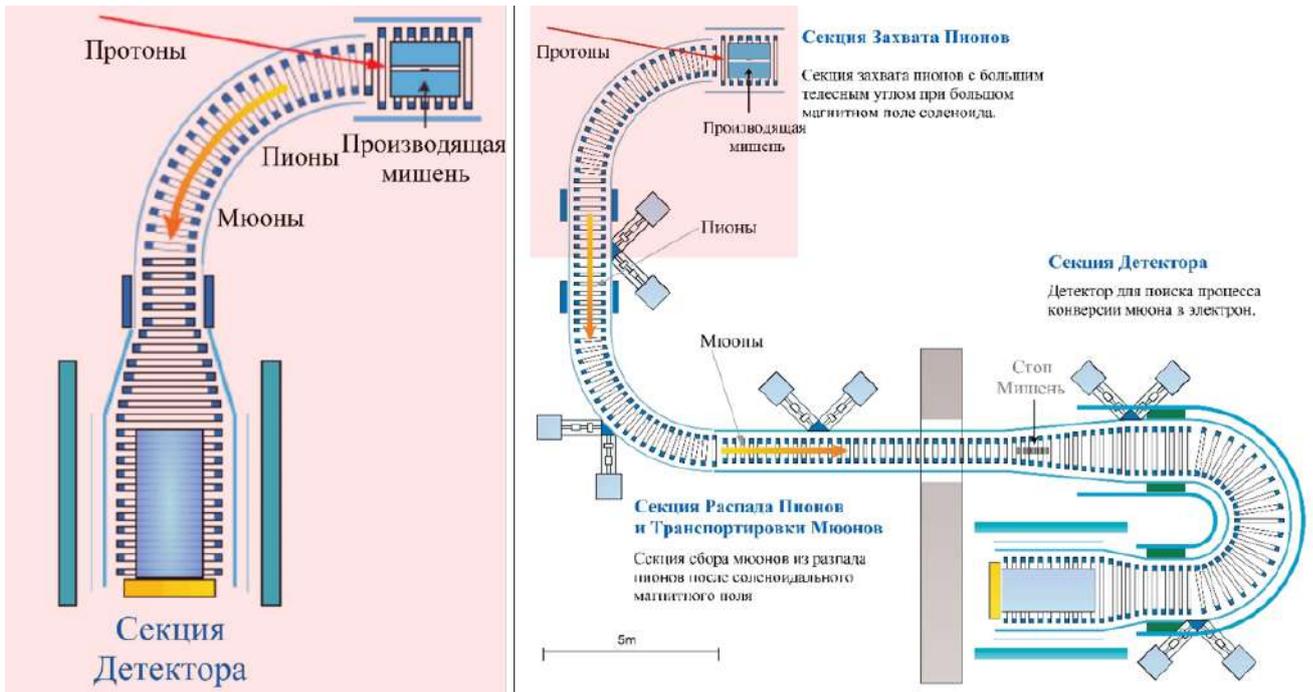


Рисунок 1.2 — Два этапа эксперимента СОМЕТ. Слева изображена структура Этапа-I, справа структура Этапа-II

1.1 Фоны

Источниками фона являются процессы, которые могут создавать электроны в области энергии эксперимента. Существует три типа источников фона: физический фон, пучковый фон и космические частицы.

Физический фон

Физические фоновые события создаются электронами от распадов мюонов в мюонных атомах. Один из них — мюонный распад на орбите (Decay in orbit — DIO), когда мюон распадается на электрон (DIO-электрон) и два нейтрино. В этом распаде энергия электрона может превышать половину массы мюона из-за связи с ядром, которое принимает на себя импульс отдачи вылетающего электрона. Спектр энергии электронов $E_{\mu-e}$ спадает пропорционально $(m_{\mu} - B_{\mu} - E_{\mu-e})^5$ вблизи конечной точки спектра [20]. На рисунке 1.3 [21] показан импульсный спектр DIO-электрона в мюонном атоме вблизи сигнальной области, образованном в алюминии, и ожидаемый импульсный спектр эксперимента СОМЕТ Этапа-I. Чтобы отличить конверсионные электроны с импульсом 105 МэВ/с от DIO-электроны, требуется разрешение детектора по

импульсу лучше 200 кэВ/с для обеспечения планируемой чувствительности Этапа-I.

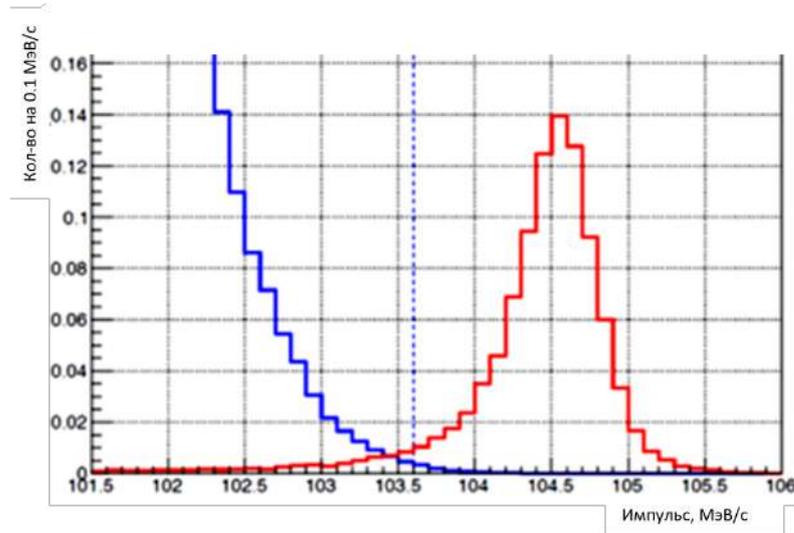
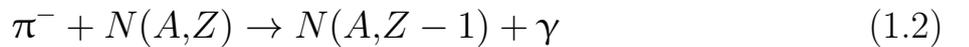


Рисунок 1.3 — Ожидаемый импульсный спектр электронов $\mu - e$ конверсии и DIO-электронов в эксперименте COMET Этапа-I [11]. Красная и синяя линии соответствуют импульсным спектрам $\mu - e$ конверсии и DIO-электронам соответственно. Справа от синей пунктирной линии сигналы имеют 1% примеси событий DIO. Вертикальная ось нормирована на площадь $\mu - e$ электронного спектра

Пучковый фон

Пучок протонов взаимодействует с графитовой мишенью, в результате чего рождаются пионы, мюоны, электроны и антипротоны в мюонном пучке, которые являются кандидатами на роль источников фона в широком диапазоне импульсов. Пионы потенциально производят сигнальные электроны за счет радиационного пионного захвата:



с последующей конверсией фотона в электрон-позитронную пару:



Мюоны, импульсы которых превышают 77 МэВ/с, могут рождать псевдо-сигнальные электроны за счет распада на лету. Электроны, испускаемые при распаде π^0 , которые образуются в протонной мишени, смешиваются с транспортируемым пучком и рассеиваются от дисков мишени. Если энергия этих электронов близка к области энергии сигнала, их тоже необходимо учитывать.

Когда энергия протонов превышает 5,6 ГэВ, антипротоны рождаются в протонно-ядерных реакциях. При энергии протонного пучка до 8 ГэВ сечение рождения антипротонов мало [11]. Если эти антипротоны задерживаются в материале и захватываются ядром, они выделяют огромную энергию и часто генерируют пионы при аннигиляции протона с антипротоном.

При этом сам пучковый фон достаточно быстро спадает во времени после взаимодействия протонов с мишенью. На рисунке 1.4 [22] показано распределение по времени частиц на выходе из 90-градусного соленоида. Из рисунка видно, что через ~ 400 -500 нс пучковый фон уменьшается более чем в 100 раз.

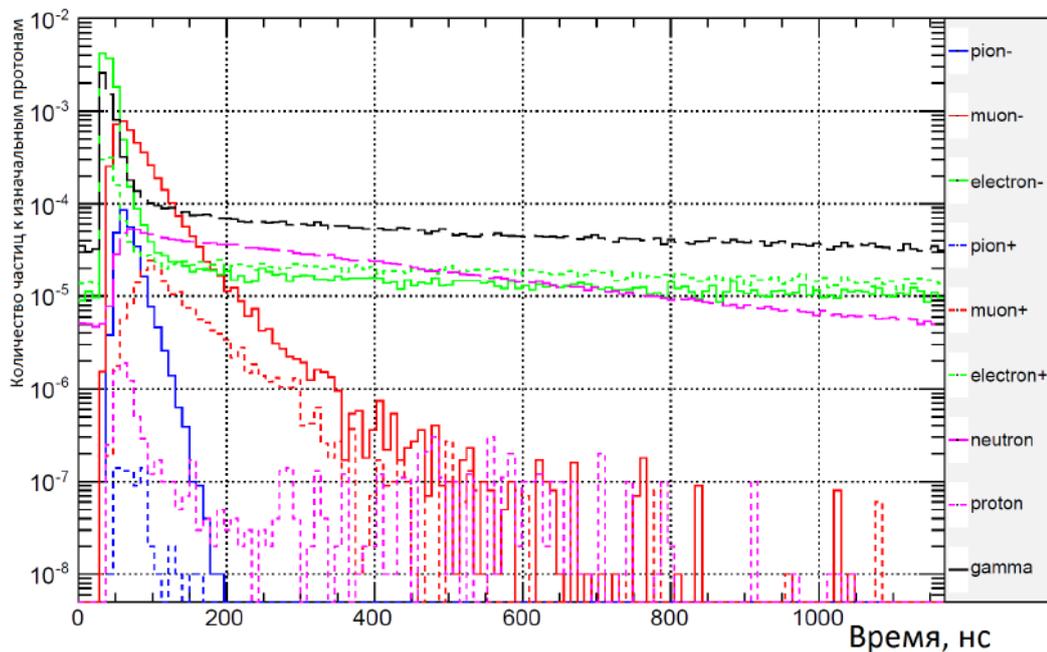


Рисунок 1.4 — Распределение по времени различных частиц пучка на выходе из первого 90-градусного изогнутого соленоида с использованием графитовой протонной мишени

Частицы космического излучения

Электроны с энергией 105 МэВ могут рождаться в результате распада или взаимодействия космических мюонов с окружающими материалами в области детектора. Кроме того, сами мюоны, обладающие импульсом 105 МэВ, могут быть ошибочно идентифицированы как электроны. Чтобы идентифицировать такие частицы в детекторе, будет использоваться система активной защиты от частиц космического излучения [11].

1.2 Формирование мюонного пучка

1.2.1 Протонный пучок

Протонный пучок с энергией 8 ГэВ для эксперимента СОМЕТ будет обладать разной мощностью: на Этапе-I — 3.2 кВт, на Этапе-II — 56 кВт. Время между сгустками протонов должно быть больше времени жизни мюонного атома (864 нс), а сами пучки должны иметь низкий коэффициент вымирания (чтобы исключить фон мгновенного пучка) и длительность импульса намного меньше времени жизни мюонного атома. Пучки протонов, генерируемые линейным ускорителем в J-PARC [8], нарезаются на сгустки и отправляются в синхротрон. Из синхротрона пучки частиц вводятся в главное кольцо (ГК) с помощью магнитного кикера. Инжектированные сгустки заполняют четыре из девяти сепаратрис ГК, как показано на рисунке 1.5 [11], и имеют временные зазоры между ними равные 1170 нс и $3/2 \times 1170$ нс. Пучки протонов в ГК ускоряются до 8 ГэВ и направляются в разработанный для эксперимента СОМЕТ канал.

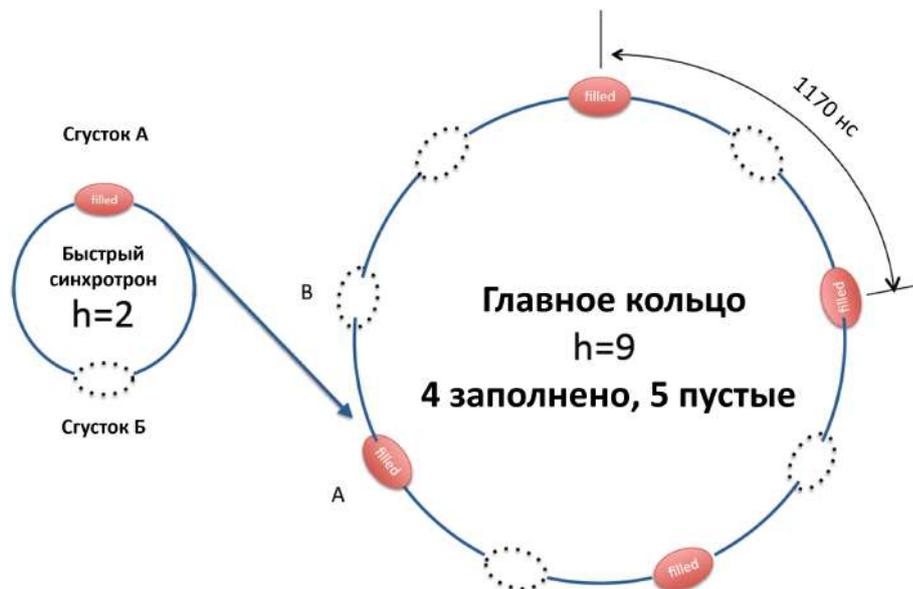


Рисунок 1.5 — Схема заполнения ГК протонными пучками длительностью 100 нс в четырёх из девяти сепаратрис с временными интервалами 1170 нс и $3/2 \times 1170$ нс между пучками, применяемая в эксперименте СОМЕТ.

На рисунке 1.6 [23] показана общая структура эксперимента СОМЕТ Этапа-I. Пионы, рожденные в результате попадания пучков протонов в мишень, собираются “захватывающим” соленоидом. Захваченные пионы распадаются на мюоны, которые затем транспортируются к соленоиду детектора через транспортный мюонный соленоид. После этой секции пучок частиц попадает на мюонную мишень в соленоиде детектора.

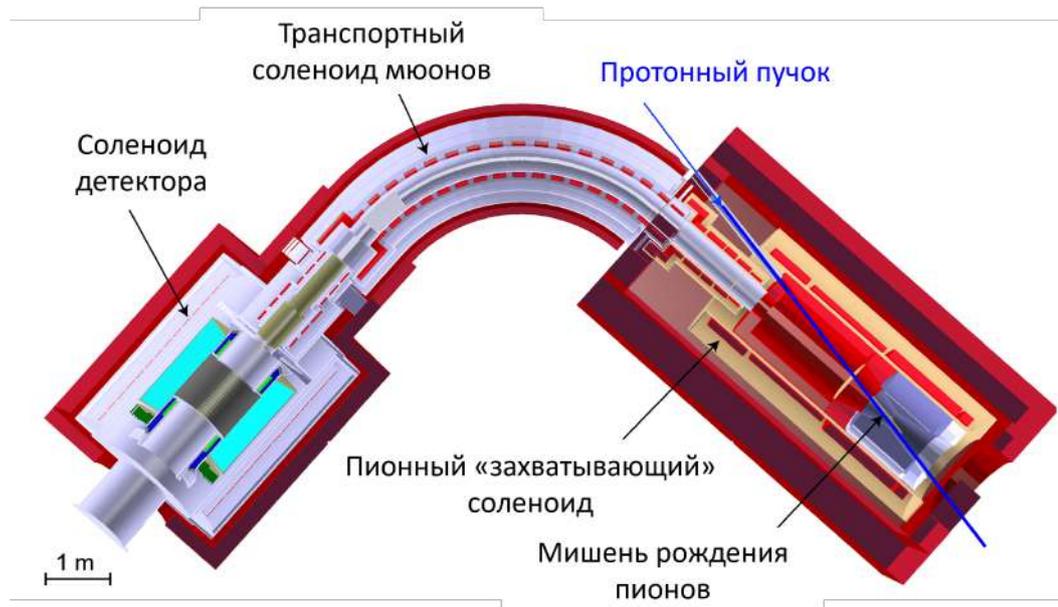


Рисунок 1.6 — Общая структура эксперимента СОМЕТ Этапа-I

1.2.2 Мюонная мишень

Мюонная мишень расположена в центре соленоида детектора и предназначена для максимальной эффективности торможения мюонов и минимизации потерь энергии конверсионных электронов при выходе из мишени, чтобы свести к минимуму разброс импульсов электронов.

Чтобы исключить фоновые события, связанные с пучком, окно измерения открывается примерно через 0.7 мкс после первичного протонного импульса, как видно из рисунка 1.7 [24]. Кроме того, время жизни мюонного атома должно быть больше быстрого фона. Таким образом, материалы мишени с высоким атомным номером (Z) не подходят для останавливающей мишени, поскольку время жизни мюонного атома уменьшается с увеличением Z , как показано на рисунке 1.8 [25].

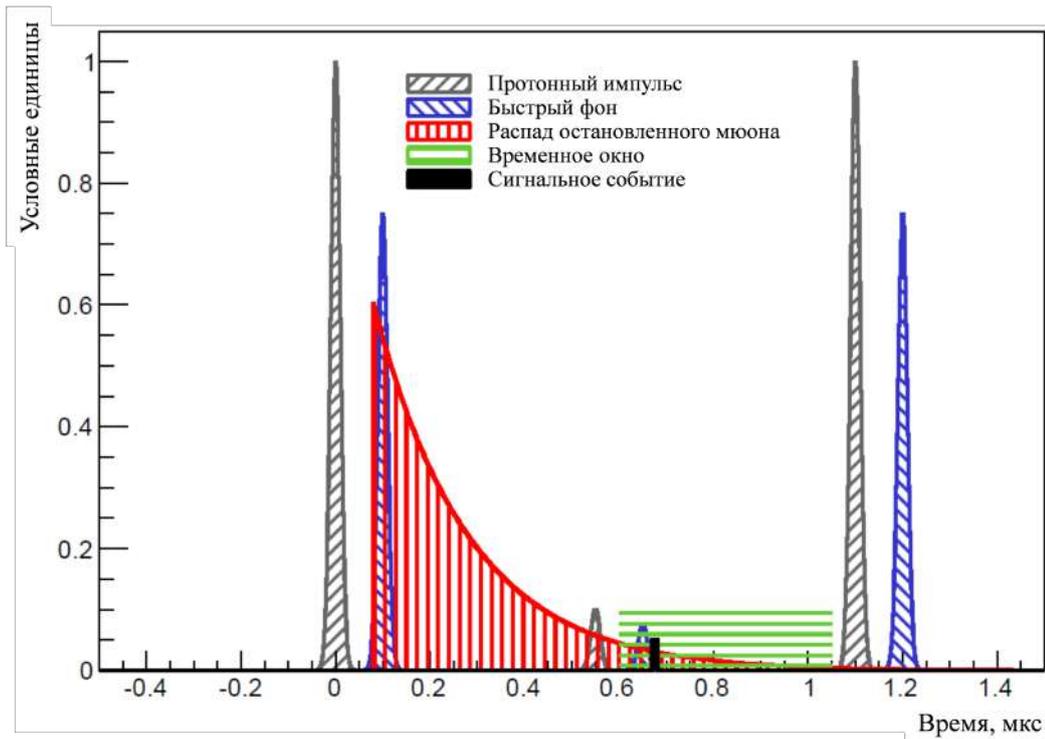


Рисунок 1.7 — Временная структура в эксперименте COMET

С другой стороны, время жизни мюонного атома должно быть меньше времени перепуска протонных пучков, чтобы не было наложений. Поэтому получается двойное ограничение на выбор материала по времени жизни мюонного атома: $t_{\text{фона}} < T_{\text{атома}} < t_{\text{перепуска}}$.

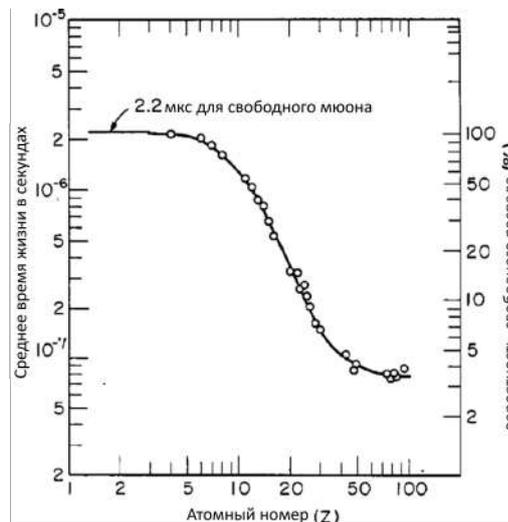


Рисунок 1.8 — Время жизни мюонного атома в зависимости от Z

Из описанных выше ограничений, в качестве материала мишени для остановки мюонов из конструктивных материалов наиболее подходящими являются алюминий ($Z = 13$, $T_{\text{атома}} = 0.86$ мкс) и кремний ($Z = 14$, $T_{\text{атома}} = 0,8$ мкс).

В качестве материала мишени был выбран алюминий, так как он дешевле, проще в изготовлении и имеет лучшую радиационную стойкость.

В таблице 1.1 приведены полученные из моделирования методом Монте-Карло оценки ожидаемого количества фоновых событий и чувствительности при указанных параметрах [11]. Средняя экспериментальная чувствительность (СЭЧ) с 90% доверительной вероятностью была получена в результате предположения, что количество измеренных событий соответствует распределению Пуассона, а количество наблюдаемых событий совпадает со средним фоном. Неопределенности в величинах в этой таблице не рассматриваются.

Таблица 1.1 — Ожидаемое количество фоновых событий и чувствительность эксперимента СОМЕТ Этапа-II

Параметры	Энергия пучка	8 ГэВ
	Мощность пучка	56 кВт
	Набор данных	~ 9 месяцев
Фон	Распад на орбите	0.068
	Радиационный мюонный захват	0
	Радиационный захват пионов	0
	Пучок e^- , e^+ , μ , π , распад на лету	0.0029
	Антипротон	0.296
	Космическое излучение	0.294
	n, p после распада μ^-	-
	Общий фон	0.662
Чувствительность	ЧЕС	2.6×10^{-17}
	СЭЧ	7.8×10^{-17}

Глава 2. Электромагнитный калориметр

2.1 Электромагнитный калориметр

Электромагнитный калориметр (ECAL) состоит из сцинтилляционных кристаллов. Расположение калориметра показано на рисунке 2.1 [16]. Калориметр должен выполнять следующие задачи:

- Измерять энергию электронов (E) с хорошим разрешением.
- Предоставлять информацию об отношении энергии кластера в электромагнитном калориметре, ассоциированного с треком, к импульсу этого трека (E/p).
- Обеспечивать идентификацию типа частиц на основе совместного использования информации об удельных потерях энергии (dE/dx), полученной с системы дрейфовых трубок, и параметра (E/p).

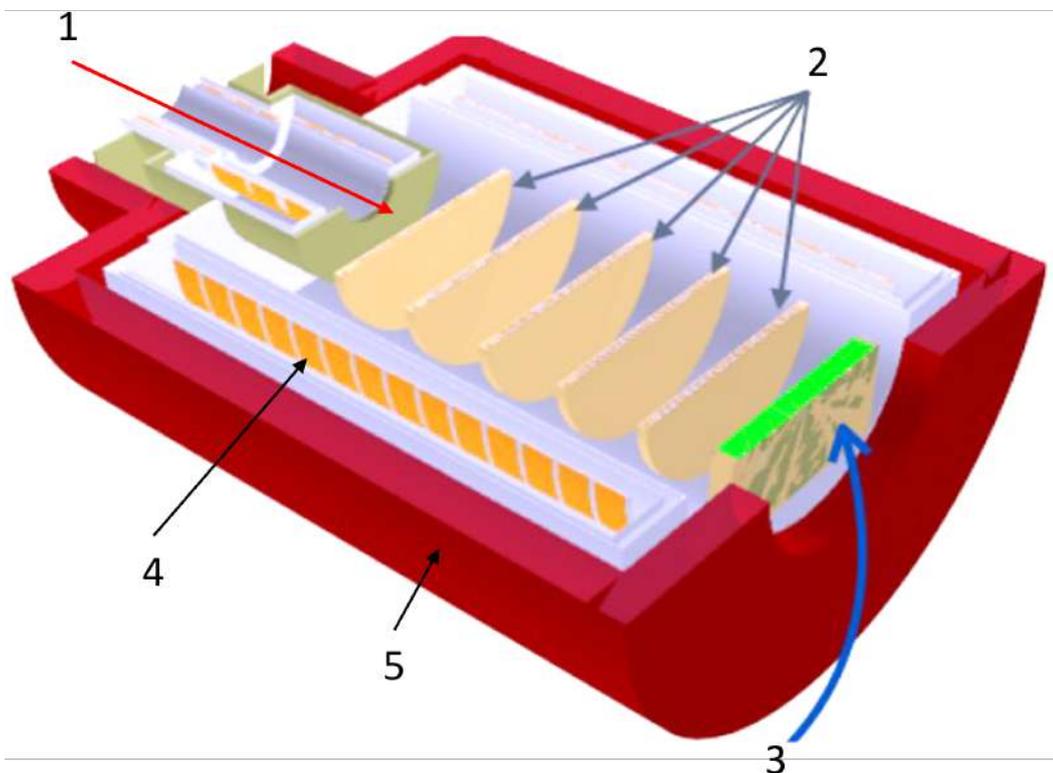


Рисунок 2.1 — Детекторная секция эксперимента COMET: 1 – пучок электронов, 2 – координатная система на основе дрейфовых трубок, 3 – электромагнитный калориметр, 4 – соленоид детектора, 5 – ярмо

Основной задачей электромагнитного калориметра является выработка сигнала запуска детектора, а главным аргументом для принятия решения является величина энергосвечения, так как основные фоновые события имеют энергию меньше, чем сигнальные. Также калориметр должен позволять определять положение и момент времени (T_0) попадания сигнального электрона в кристаллы, что упростит восстановление траектории движения в системе дрейфовых трубок.

Электромагнитный калориметр должен иметь энергетическое разрешение (σ_E/E) лучше, чем 5% на энергии 105 МэВ и координатное разрешение кластера лучше, чем ~ 1 см [11].

2.1.1 Структура электромагнитного калориметра

Кристаллы электромагнитного калориметра должны обладать высоким световыходом, а также быстрым откликом, способствующим уменьшению наложения сигналов. По совокупности параметров было принято решение использовать для электромагнитного калориметра кристаллы $Lu_{2(1-x)}Y_{2x}SiO_5(Ce)$ (LYSO) [26]. Влияние энергосвечения при собственной радиоактивности кристаллов пренебрежимо мало по сравнению с шумами электроники.

Схематическое изображение ЕСАЛ приведено на рисунке 2.2 [16]. Мелкая сегментация требуется для уменьшения количества наложенных событий в каждом кристалле, а также обеспечения хорошего пространственного разрешения. ЕСАЛ будет состоять из кристаллов, имеющих сечение 2×2 см² и длину 12 см, которая соответствует 10.5 радиационным длинам. ЕСАЛ будет покрывать область, вписанную в окружность радиусом 50 см, и состоять из 1920 кристаллов, которые могут быть сформированы в модули.

Конструкция элементов калориметра показана на рисунке 2.3 [11]. К каждому полированному кристаллу крепится один лавинный фотодиод (ЛФД) фирмы Hamamatsu S8664-1010 [27], с активной площадью 10×10 мм², с использованием прозрачного силиконового каучука толщиной 2 мм (ELJEN Technology, EJ-510) в качестве оптического контакта между кристаллом и ЛФД. Затем кристалл вместе с силиконовой прокладкой и печатной платой, на которую прикрепляются ЛФД, оборачиваются двумя слоями 76 мкм

зеркальной пленки из тефлоновой ленты от фирмы Saint-Gobain с высоким коэффициентом отражения, рисунок 2.3(а). Для мониторинга и калибровки системы на каждую печатную плату помещается светодиод, излучающий свет с длиной волны, аналогичной длине волны сцинтилляционного фотона LYSO (420 нм).

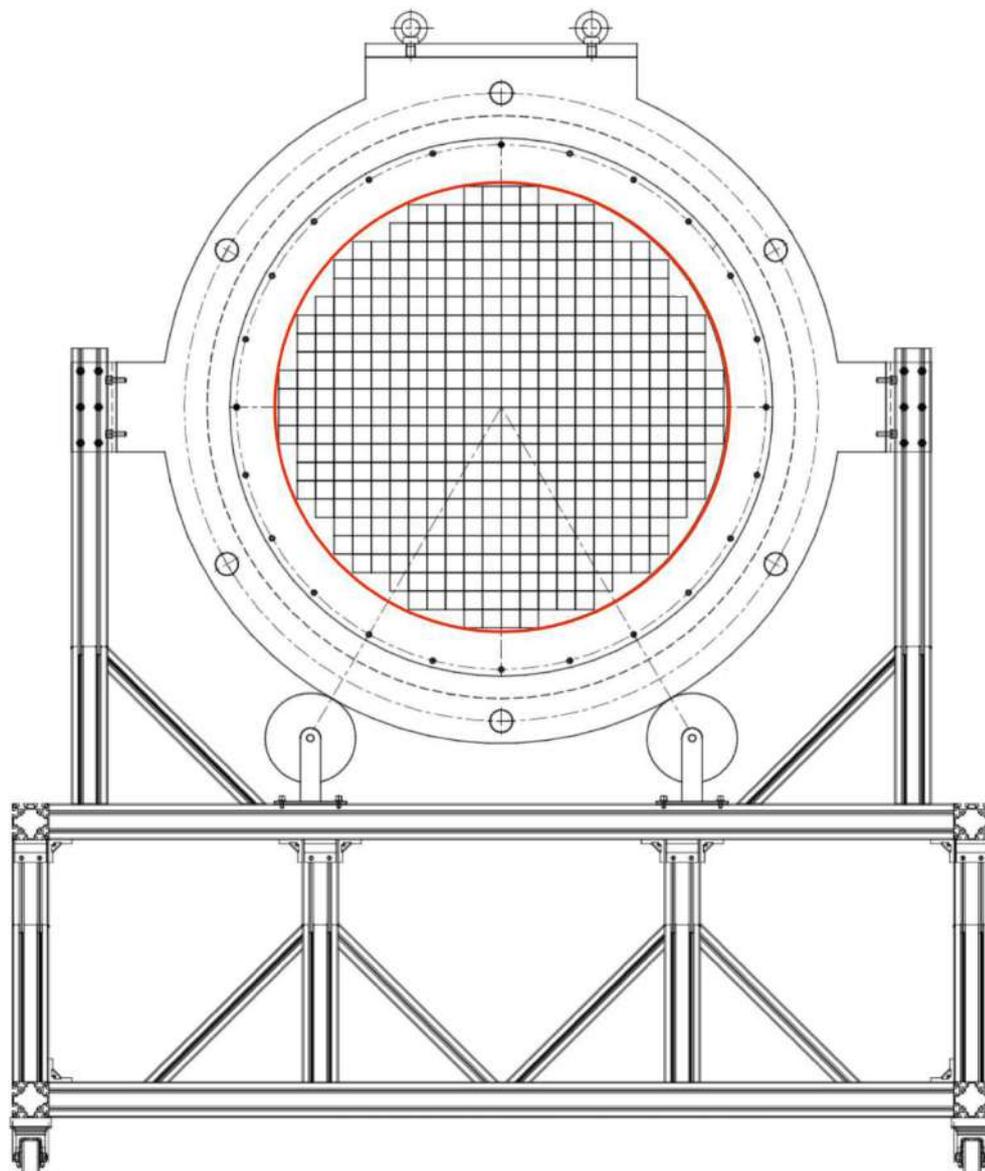


Рисунок 2.2 — Схематическое изображение расположения кристаллов LYSO электромагнитного калориметра

Четыре обернутых кристалла используются для создания модуля 2×2 , который обернут алюминизированным лавсаном толщиной 20 мкм, рисунок 2.3(б). Модули дополнительно скомпонованы так, чтобы образовывать супермодуль из 4×4 модулей или 64-х кристаллов, рисунок 2.3(в). Таким образом,

калориметр будет состоять из 30 супермодулей по 64 кристалла. Прототип супермодуля был успешно протестирован на стенде и пучке частиц, как будет описано далее в Главе 3.

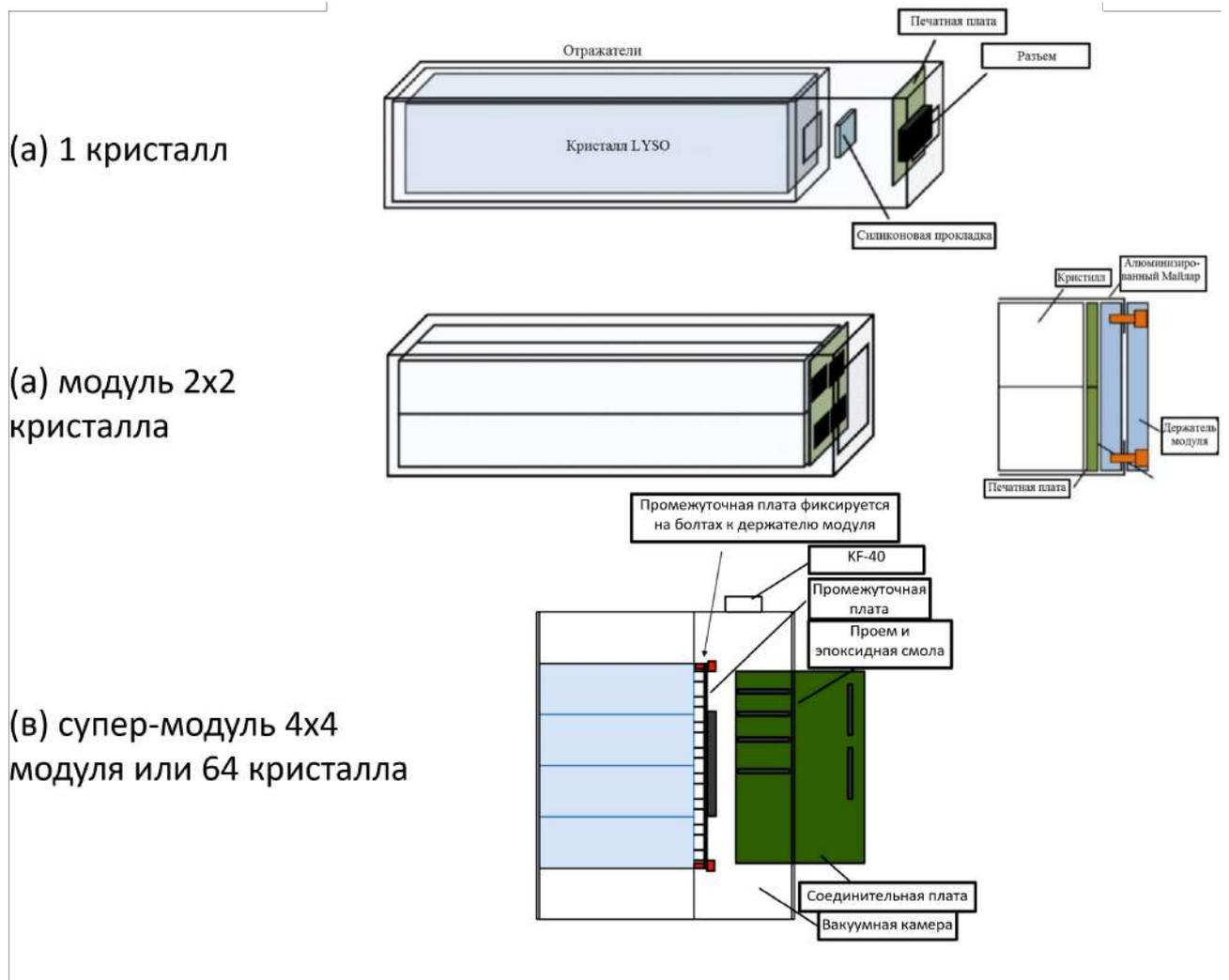


Рисунок 2.3 — Схематическая конструкция модульной структуры кристаллов

2.1.2 Электроника калориметра

Предварительная электроника

Для выполнения поставленных задач необходима быстрая и малощумящая аналоговая электроника. При оптимальных технологиях обработки кристаллов и конструкции чувствительного элемента калориметра (кристалл + ЛФД) коэффициент преобразования ($K_{пр}$) выделенной в кристалле энергии в электрический сигнал получается ≈ 0.032 пКл/МэВ при

номинальном напряжении смещения ЛФД (при котором коэффициент усиления фототока равен 50). Входным сигналом предварительной электроники является импульс тока с ЛФД. Ток в импульсе спадает экспоненциально с постоянной времени ~ 40 нс. Параметры усилительного канала предварительной электроники должны удовлетворять следующим требованиям:

1. Энергетический эквивалент шумов усилительного канала должен быть не менее чем в 3-4 раза меньше флуктуаций утечек электромагнитного ливня в кристалле, составляющих около 1.6 МэВ [12]. Учитывая $K_{пр}$, приведенный ко входу эквивалентный шумовой заряд усилительного канала должен быть не более 0.014 пКл (8.8×10^4 электронов);
2. Для возможности измерения основных фоновых событий, диапазон регистрируемых сигналов составляет от 0 до 6 пКл, что соответствует энерговыделению в кристалле от 0 до 190 МэВ;
3. Интегральная нелинейность усилительного канала во всем диапазоне входных сигналов должна быть не более 1%.

ЗЧУ интегрирует входные токовые импульсы с постоянной времени ~ 200 мкс, поэтому на его выходе отклики нескольких входных импульсов накладываются друг на друга. Эти наложения нужно по возможности устранить, чтобы для большинства сигналов обеспечить измерение их амплитуды, а также разделять наложенные сигналы, поступившие с небольшим интервалом по времени [28]. Моделирование и лабораторные испытания показали, что наилучшей регистрации таких сигналов удаётся достичь, если из выходного сигнала ЗЧУ сформировать сигналы, близкие по форме к входным токовым импульсам (“восстановить” форму входных импульсов), при этом обеспечивается предельно высокая точность измерения амплитуды сигналов.

На рисунке 2.4 изображена функциональная схема электронного тракта [12]. Источником сигнала является ЛФД. В нем основным источником шума является темновой ток, типичное значение которого менее 10 нА. Поэтому в качестве входного устройства усилительного канала используется зарядочувствительный усилитель (ЗЧУ), который позволяет достичь наибольшего отношения сигнал/шум при таких свойствах источника сигнала.

Уровень собственных шумов и быстродействие ЗЧУ оказывают определяющее влияние на качество работы всего усилительного тракта в целом. При разработке данного усилительного тракта фактором, в наибольшей сте-

пени ограничивающим возможности понижения уровня шума ЗЧУ, было энергопотребление, так как необходимо разместить платы предварительной электроники в ограниченном объёме позади матрицы кристаллов калориметра и обеспечить работу большого количества таких плат без принудительного охлаждения, как показано на рисунке 2.5 [18].

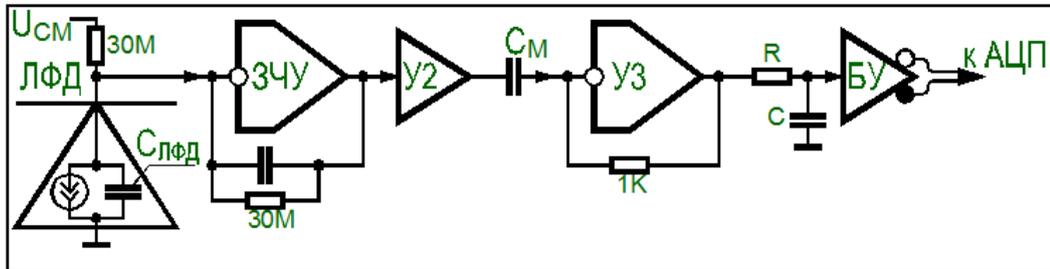


Рисунок 2.4 — Функциональная схема электронного тракта ЗЧУ с лавинным фотодиодом

Разработанная предварительная электроника совместно с прототипом калориметра были испытаны на выведенном пучке электронов [12]. Коэффициенты преобразования входного заряда в амплитуду выходного сигнала были измерены и получились ~ 140 мВ/пКл с разбросом значений менее 5%, а коэффициенты преобразования энерговыделения в амплитуду соответственно ~ 3.9 мВ/МэВ.

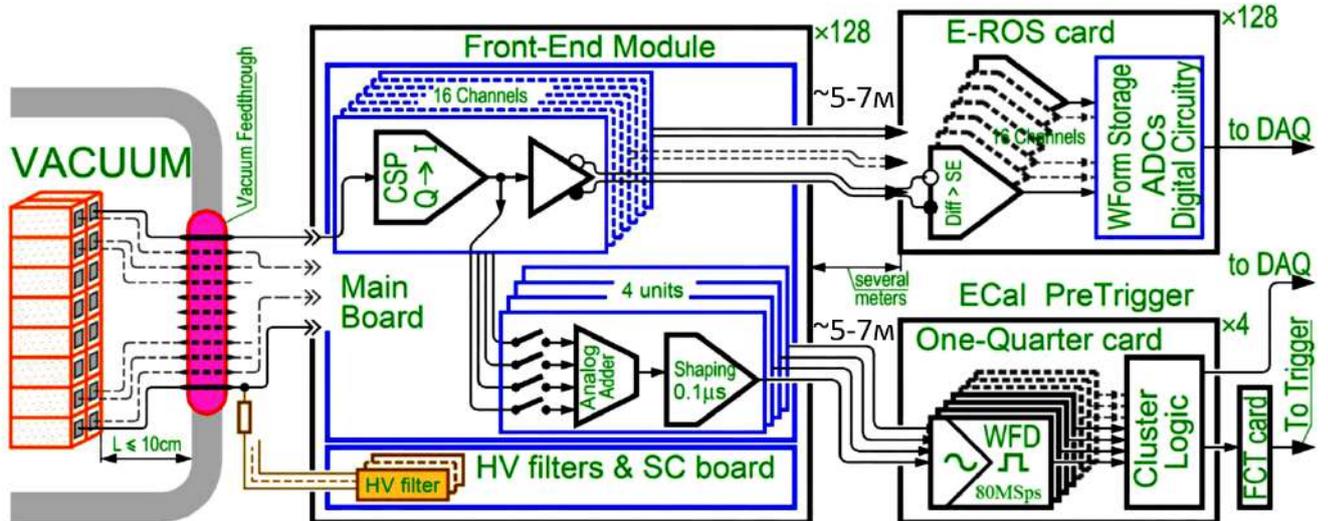


Рисунок 2.5 — Функциональная схема электронного тракта электромагнитного калориметра

Для измерения вклада шумов предварительной электроники в амплитудное разрешение для каждого канала был набран спектр измеренных амплитуд, из подаваемых на вход калибровочных токовых импульсов, с последующей

подгонкой функцией Гаусса. Усредненное значение $\sigma_{\text{шума}}$ получилось равное примерно 0.32 МэВ в энергетическом эквиваленте. Результаты испытаний показали, что параметры ЗЧУ полностью удовлетворяют поставленным требованиям.

Предварительная электроника для калориметра СОМЕТ реализована в виде 16-канальной платы размером $160 \times 120 \text{ мм}^2$. Фотография платы приведена на рисунке 2.6 [29]. На плате размещено по 8 усилительных каналов на верхней и нижней сторонах, четыре 4-входовых аналоговых сумматора, формирующих сигналы для триггерной системы с временем нарастания фронта 50 нс. Все выходные сигналы являются дифференциальными для уменьшения влияния внешнего шума (наводок), так как передаются на расстояния 5-7 метров.

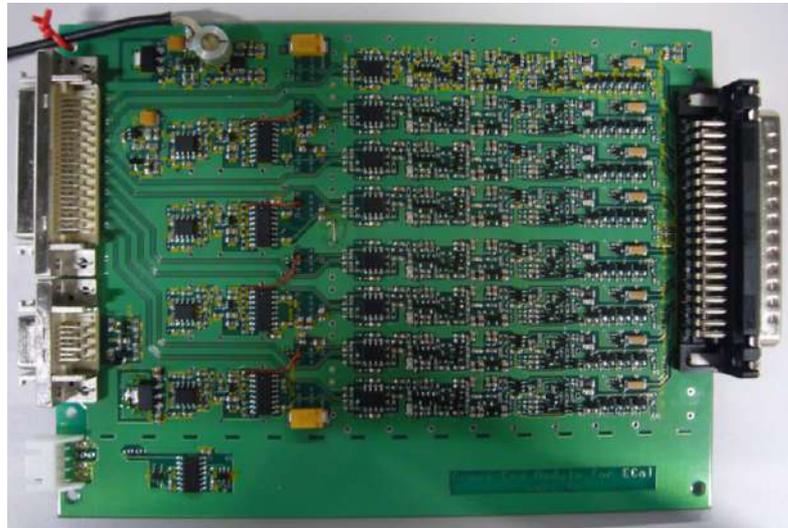


Рисунок 2.6 — Фотография платы предварительной электроники электромагнитного калориметра СОМЕТ

Оцифровывающая электроника

Дифференциальный сигнал с выхода предварительной электроники передается в оцифровывающую плату EROS [30]. Разработка платы EROS проводится группой КЕК-Electronics совместно с Консорциумом инструментальных средств с открытым исходным кодом (OpenIt).

Для данной системы была разработана и предложена к использованию схема согласования сигналов между выходом ЗЧУ и входом плат EROS. Для первых протипов платы EROS схема согласования была реализована в виде отдельной платы, фотография которой представлена на рисунке 2.7. В настоящий момент данная схема входит в состав самой платы EROS.



Рисунок 2.7 — Фотография платы согласования сигналов ЗЧУ-EROS

Функционально плата EROS включает в себя: согласование сигнальных уровней, предварительное усиление и формирование импульсов, дискриминацию, хранение и оцифровку входных сигналов. Все эти функции управляются контроллером считывания на базе ПЛИС, как показано на рисунке 2.8 [11].

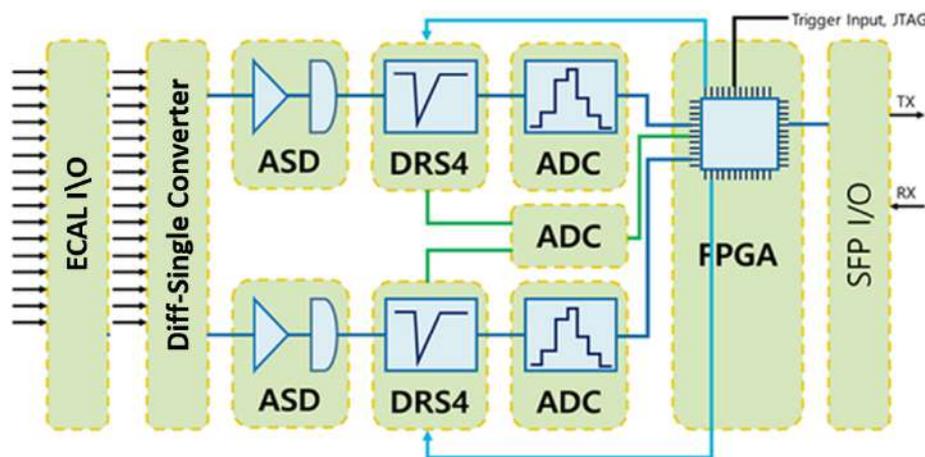


Рисунок 2.8 — Блок схема структуры платы EROS

Усиленные и сформированные сигналы запоминаются микросхемой DRS4 [31], разработанной в Институте Пауля Шеррера (PSI, Швейцария) для различных экспериментов по физике элементарных частиц. Микросхема DRS4 представляет собой циклическую аналоговую память ёмкостью 1024 ячейки, реализованную на основе матрицы переключаемых конденсаторов. Микросхема обеспечивает дискретизацию входных сигналов с частотой до нескольких гигагерц, что позволяет выполнять последующее офлайн-распознавание наложенных событий. В платах EROS было принято решение использовать частоту дискретизации/записи в микросхему DRS4 — 1 ГГц. Также необходимо учитывать, что обработка и восприятие информации,

поступившей от центрального триггера, занимает ~ 100 нс. То есть максимальное бегущее временное окно относительно момента события, в течение которого данные записываются в память и затем корректно вычитываются, составляет $T = 10^3 * 10^{-9} - 10^{-7} = 900$ нс. Сигнал триггера должен прийти в оцифровывающие платы не позднее этого времени от момента события. Одна плата EROS обрабатывает 16 каналов. Параметры для каждого чипа, например, дискриминация сигналов, скорость дискретизации оцифровки и другие, контролируются внутри ПЛИС. После срабатывания триггера записанные в DRS4 данные оцифровываются в АЦП (AD9637) и совместно с данными коррекции и соответствующими метаданными отправляются по оптоволоконному кабелю через интерфейс SFP по схеме последовательного соединения в ССД. Где данные сохраняются в постоянном хранилище для дальнейшей обработки. ПЛИС имеет несколько других линий ввода/вывода для сигнала запуска передачи данных и сигнала JTAG. Учитывая высокий уровень нейтронного и гамма-облучения, на плате отсутствует конфигурационная флеш-память, поэтому для загрузки конфигурационного файла сразу в ПЛИС в формате битового потока используется JTAG.

2.2 Триггерная система и система сбора данных

Триггерная система и система сбора данных эксперимента СОМЕТ были сконструированы так, чтобы в наибольшей степени использовать коммерчески доступные комплектующие, а также готовые блоки, разработанные для других экспериментов. При этом имеется возможность для масштабирования триггерной системы и системы сбора данных (ССД), поэтому одна и та же концепция (а в идеале и большая часть оборудования) может быть использована в экспериментах как Этапа-I, так и Этапа-II.

2.2.1 Триггерная система

Блок-схема триггерной системы эксперимента COMET с детектором на основе дрейфовых трубок и электромагнитного калориметра показана на рисунке 2.9 [16]. Триггерная система детектора состоит из модуля центрального триггера (FC7), плат управления и синхронизации триггера (FCT), системы первичного триггера электромагнитного калориметра, модуля передачи “быстрого” сигнала триггера (FDB), первичного триггера системы активной защиты от космического излучения и триггерных интерфейсных плат измерительной электроники (Trigger IF).

Сигнал триггера формируется на основе данных калориметра. Система защиты от космического излучения должна обеспечивать сигнал “метку” события, вызванного космическими частицами, а также сигнал запуска для отладки детектора. Каждая плата, связанная с триггером, управляется ПЛИС для получения данных от детектора, выполнения цифровой обработки данных и передачи сформированного пакета и решения в модуль центрального триггера по гигабитным оптическим линиям.

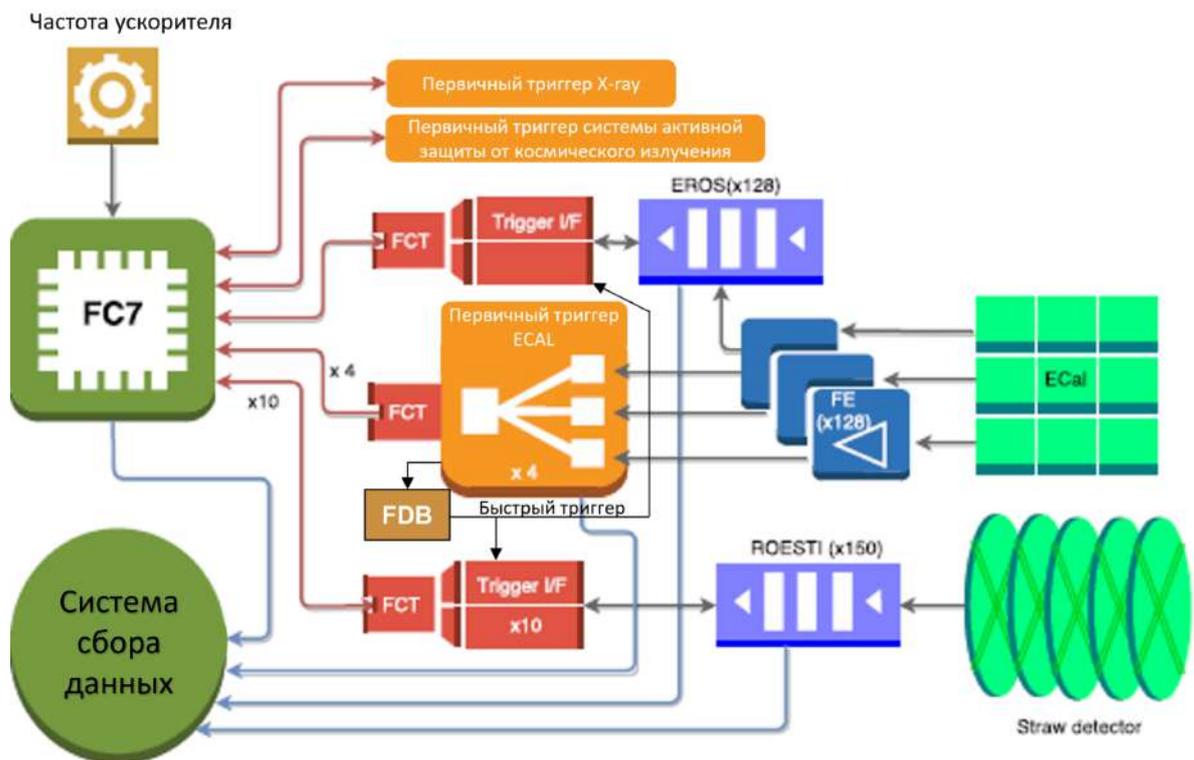


Рисунок 2.9 — Блок-схема триггерной системы эксперимента COMET со StrECAL

Все модули триггерной системы и измерительных трактов синхронизированы FC7 через платы FCT, которые выполняют функцию интерфейса, и связывают все модули с центральным триггером. В отсутствии сигнала от ускорителя FC7 передает для синхронизации тактовую частоту от кварцевого генератора, расположенного на плате. Во всех случаях сигнал запуска обрабатывается центральным триггерным процессором, реализованным в ПЛИС платы FC7.

Триггерная система детектора, состоящая из нескольких подсистем, должна располагаться вблизи периферийной электроники или, по меньшей мере, вблизи детектора, чтобы уменьшить задержку срабатывания. Эти зоны в эксперименте СОМЕТ представляют собой области высокого уровня радиации (см. параграф 3.4). Поэтому аппаратура триггерной системы детектора должна быть радиационно-устойчивой. С другой стороны, в основе плат триггерной системы используются ПЛИС в коммерческом исполнении, для которых в большинстве случаев не применяются методы радиационной защиты, и в общем доступе нет сведений от производителя о радиационной устойчивости.

Поэтому для возможности применения этих микросхем необходимо было исследовать устойчивость их работоспособности при разных дозах облучения и найти оптимальное соотношение между допустимой дозой, которую могла бы получить электроника, и расстоянием до чувствительных элементов детектора с целью сведения к минимуму задержки выработки сигнала триггера. Более подробно про исследование возможности работоспособности микросхем при разных дозах облучения описано в параграфе 3.4.

Плата глобальной синхронизации и окончательного решения — FC7

Плата FC7 [32] разработана группой детектора CMS в Европейской организации ядерных исследований (CERN). Это основная плата в триггерной системе, отвечающая за четыре задачи: окончательное решение о запуске считывания данных со всех подсистем детектора, распределение сигналов запуска, синхронизацию всей электроники и онлайн-контроль пучка частиц.

Модуль центрального триггера принимает решение о запуске на основе данных с систем детектора, включая системы активной защиты от космического излучения и рентгеновского монитора, и выдает номер события для возможности разделения записанных данных при дальнейшем анализе на компьютере.

К плате FC7 будет подключено две дополнительные коммерчески доступные мезонинные платы через разъемы FMC-400, каждая из которых имеет восемь разъемов приемопередатчиков SFP+ малого форм-фактора для подключения к другим модулям с помощью оптоволоконных линий. Таким образом, в FC7 может получать данные с 16 линий связи. Протокол мультигигабитной приемопередачи (MGT) для эксперимента COMET был разработан на основе протокола Aurora, предоставленного компанией Xilinx [33]. Скорость передачи данных составляет 4,8 Гбит/с, которая сформирована внутри ПЛИС при эталонной тактовой частоте 120 МГц. Эта опорная частота получается из синусоидальной частоты 12 МГц, которая передается от протонного ускорителя J-PARC для синхронизации с работой комплекса. Формат данных быстрого контроля FC7 отличается для исходящих и входящих данных, и показан в Таблице A.1 Приложения A.1.

Как упоминалось выше, каждая плата должна быть синхронизирована, чтобы гарантировать одновременность прихода данных со всех систем. FC7 взаимодействует с другими электронными модулями на опорной частоте 40 МГц для временной синхронизации в триггерной системе StrECAL и обмена триггерными данными через интерфейсную плату с первичным триггером электромагнитного калориметра.

Плата быстрого управления и синхронизации — FCT

Каждая из 16 линий MGT центрального триггера соединена с платой FCT, фотография которой приведена на рисунке 2.10 [11]. FCT основана на ПЛИС с реализацией MGT протокола и предназначена для размещения внутри зоны с высоким уровнем радиации. Плата FCT обеспечивает стандартизированный интерфейс и выполняет связующую функцию между FC7 и каждой подсистемой детектора. Через платы FCT происходит синхронизация систем и передача данных от FC7 в системы детектора и обратно. Плата FCT является общей для электроники системы сбора данных и триггера StrECAL и будет использоваться всеми вспомогательными подсистемами в детекторе. Одна плата FCT обслуживает один канал MGT, то есть для эксперимента со StrECAL, согласно блок-схеме на рисунке 2.9, требуется 16 плат FCT. К конкретным модулям подсистем каждая плата FCT подключается через разъем FMC. Формат передаваемых данных через разъем FMC описан в Приложении A.2.



Рисунок 2.10 — Фотография платы FCT

Система первичного триггера ЕСАЛ

Система первичного триггера электромагнитного калориметра, изображенная на рисунке 2.9, состоит из следующих электронных модулей: оцифровывающая электроника, основной модуль первичного триггера и платы коммутатора триггерных сигналов. Эта система работает в конвейерном режиме и выполняет в реальном времени следующие функции:

- Усиление, формирование и оцифровывание сигналов с выхода предварительной электроники;
- Формирование триггерных групп согласно запрограммированной таблице;
- Отбор событий, удовлетворяющих определенным требованиям по амплитуде и времени появления;
- Вычисление для отобранных событий амплитуды кластера и его расположения;
- Передача вычисленной информации в модуль окончательного решения.

Алгоритм работы основного модуля первичного триггера реализован на основе конфигурируемой программы, записанной в ПЛИС фирмы AMD (Xilinx). Электроника и используемые алгоритмы работы системы будут подробно описаны в Главе 3.

2.2.2 Система сбора данных

Системы Сбора Данных (ССД) основана на стандартной сети Ethernet и реализована с использованием коммерчески доступных готовых сетевых компонентов. Схема ССД и управления для детектора на основе StrECAL показаны на рисунке 2.11 [11]. ССД должна обрабатывать данные от более чем 150 устройств. Для построения ССД принята двухуровневая конфигурация. Первый уровень состоит из оптических сетевых коммутаторов 1G/10G и внешних пользовательских компьютеров (ПК). Второй уровень состоит из ПК для создания событий с подключенными картами экспресс-связи периферийных компонентов (PCIe), ПК для онлайн-анализа и массива дисков для записи полученных данных.

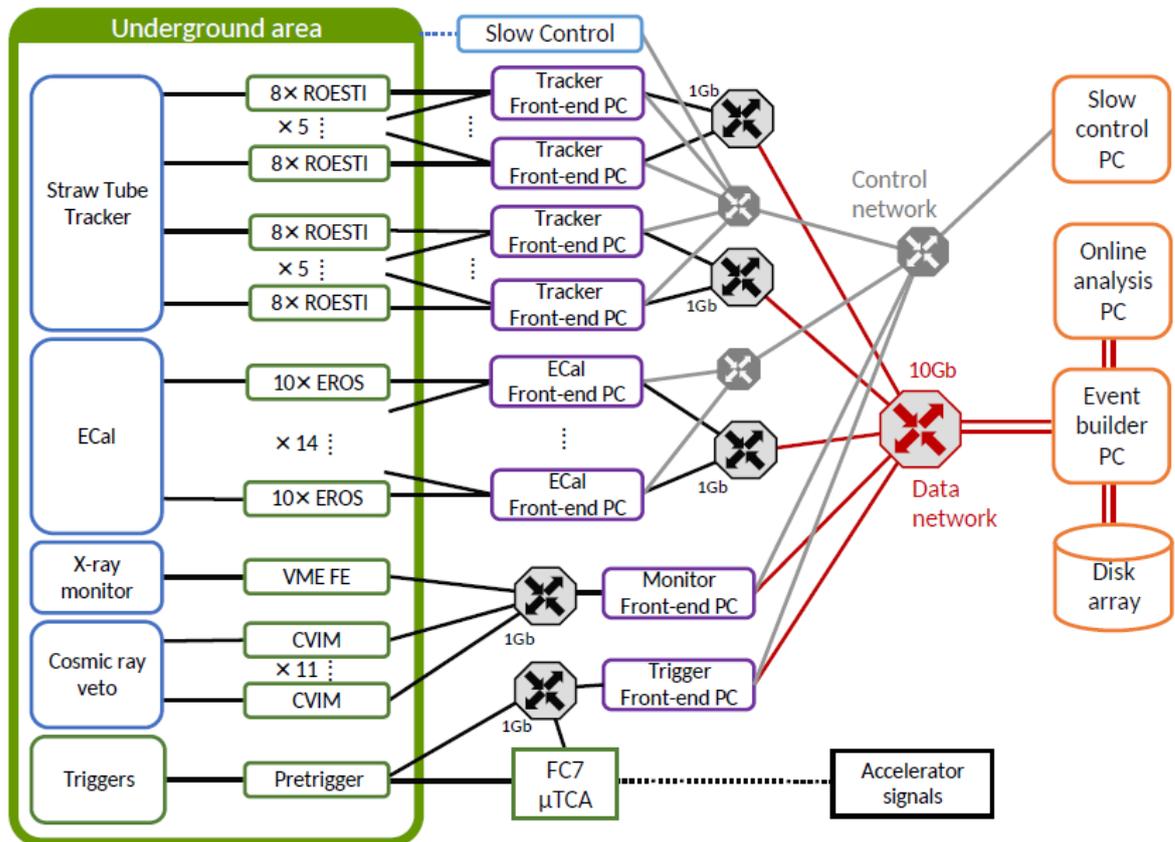


Рисунок 2.11 — Схема Системы Сбора Данных со StrECAL в эксперименте COMET

Подземная зона, где находится детектор и будет проходить эксперимент, является областью с высоким уровнем радиации, что не позволяет использовать стандартное оборудование. Поэтому все коммутаторы и ПК будут размещены за пределами подземной части, на этаже комнаты управления.

Поскольку передача данных в ССД односторонняя, а сеть управления “медленная”, это не должно создавать проблем с задержкой, при условии, что все длинные кабельные линии проходят по одним и тем же маршрутам. При использовании стандартных оптических кабелей для гигабитного Ethernet потребуется 1 сервисный канал, выделенный для передачи оцифрованных данных. Оптические кабели предпочтительнее, так как они имеют меньшее поперечное сечение, исключают возможность перекрестных помех внутри жгута из кабелей и проблемы заземления, и главное - не создают контуров, однако также должна быть возможность использовать витую пару.

Компьютер формирователя событий выполняет функции контроллера заходов. ПК отправляет команды для запуска, остановки заходов и т.д., используя протоколы управления ССД MIDAS [34]. Эти команды передаются через сетевые коммутаторы на набор ПК, предназначенные для считывания данных с отдельных частей детектора. Все данные передаются по сети с использованием стандартных протоколов (Ethernet, UDP, TCP/IP).

При возникновении сигнала триггера данные о событии сохраняются в буферах входной электроники каждой системы. Когда в буфере есть целое событие, оно будет отправлено в виде пакета (или пакетов) данных на ПК. В некоторых случаях данные сначала будут передаваться по пользовательским каналам передачи данных (внутри периферийной электроники по принципу «гирлянды»), но они будут преобразованы в стандартные сетевые пакеты, как только это будет возможно.

Глава 3. Система первичного триггера электромагнитного калориметра

Первичный триггер электромагнитного калориметра должен удовлетворять следующим основным физическим требованиям: высокая эффективность к сигнальным событиям и снижение загрузки до требуемого уровня. Энергетическое разрешение имеет решающее значение как для запуска, так и для анализа.

Напомним, что $\mu - e$ конверсия является двухчастичным процессом, в котором энергия сигнальных электронов фиксирована и равняется $E_{\mu-e} = 104.97$ МэВ. Для достижения заявленной в Главе 1 чувствительности к единичному событию необходимо получение интенсивного пучка мюонов, в частности, в условиях первого этапа эксперимента СОМЕТ требуется 10^9 остановившихся мюонов в мишени в секунду. В таких условиях, и поскольку энергия ДЮ-электронов может достигать области сигнала, распад мюона в связанном состоянии с ядром является основным источником фона при поиске процесса $\mu - e$ конверсии, как было указано в параграфе 1.1. Поэтому первичный триггер эксперимента СОМЕТ должен иметь высокое энергетическое разрешение не хуже 5% в реальном времени, чтобы эффективно отсеивать эти фоновые события с целью снижения интенсивности потока экспериментальных данных до приемлемого уровня, сохраняя при этом высокую эффективность к полезным событиям на уровне не ниже 90%.

Работа первичного триггера основана на алгоритме, который формирует сигнал триггера в случае превышения величины энерговыделения в кластере над энергетическим порогом. Согласно рисунку 1.3, для подавления фона требуется использование триггера с высоким энергетическим порогом, что позволит пропускать лишь небольшую долю ДЮ-событий. Изменяя величину порога триггера, обеспечивается компромисс между допустимой загрузкой ССД и высокой эффективностью отбора полезных событий. Для изучения фоновых процессов и контроля эффективности применяется набор пороговых значений с прореживанием частоты срабатываний триггера.

3.1 Технические требования, предъявляемые к электронике первичного триггера электромагнитного калориметра

Исходя из вышеописанного, можно сформулировать требования, предъявляемые к электронике первичного триггера электромагнитного калориметра:

1. Энергетическое разрешение лучше 5% при энергии электронов около 105 МэВ.
2. Эффективность к полезным событиям не ниже 90%.
3. Время прихода триггерного сигнала в оцифровывающую электронику от момента события не более 900 нс (см. параграф 2.1).
4. Необходима устойчивая работа в зоне повышенного радиационного излучения на уровне до 10^{12} нейтронов/см² и поглощенной дозы гамма-квантов до 2 кГр с учетом фактора безопасности 10.
5. Использование Ethernet (Raw/UDP/TCP-IP) для чтения данных и удаленного управления электроникой.

3.2 Описание общей структуры реализации системы первичного триггера электромагнитного калориметра

С целью уменьшения объема информации, обрабатываемой в системе первичного триггера, в предварительной электронике производится аналоговое суммирование сигналов с каждого модуля 2×2 кристаллов (подпараграф 2.1.2), и суммарный сигнал является базовой единицей — триггерной ячейкой. Типичная форма аналогового сигнала триггерной ячейки представлена на рисунке 3.1 [16].

Так как энергия попадающей в калориметр частицы распределяется между несколькими кристаллами, то для формирования кластера необходимо произвести суммирование энерговыделения в этих кристаллах. Для определения общего энерговыделения в кластере используется сумма, состоящая из 2×2 триггерных ячеек (4×4 кристаллов) — триггерная группа. Таким образом, если взять сумму энерговыделений из 4×4 рядом расположенных кристалла,

то при попадании частицы в модуль 2×2 кристалла, энергия будет всегда учтена. Тем самым каждый кристалл будет всегда являться центральной частью какой-то триггерной группы, как показано на рисунке 3.2 [18].

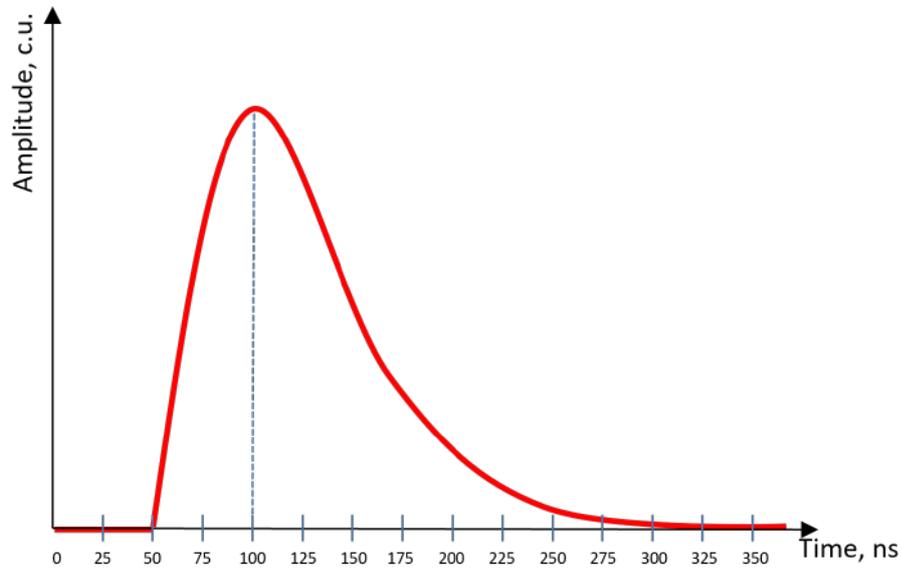


Рисунок 3.1 — Типичная форма суммарного сигнала триггерной ячейки

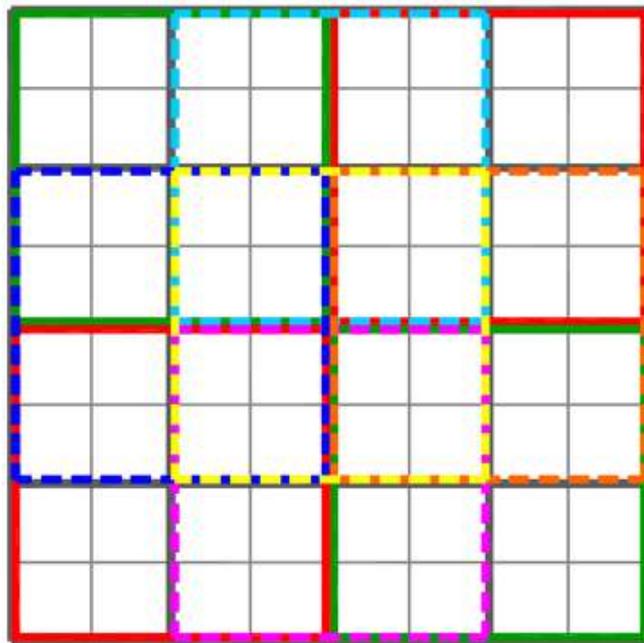


Рисунок 3.2 — Пример формирования триггерной группы

Сигнал триггерной ячейки формируется в предварительной электронике аналоговым суммированием, таким образом, на выходе из каждой платы предварительной электроники получается 4 аналоговых сигнала, которые поступают на вход триггерной платы. Так как каждая триггерная ячейка участвует в нескольких суммах, то для уменьшения шумов, сигналы с оцифрованных ячеек суммируются в триггерную группу (2×2 триггерные ячейки,

16 кристаллов) цифровым образом в ПЛИС. Более подробно о выборе размера триггерной группы описано в подпараграфе 3.3.1 [14].

В электромагнитном калориметре эксперимента COMET используется 1920 кристаллов, что соответствует 480 триггерным ячейкам. Разместить обработку всех каналов на одной или, даже, двух печатных платах технически сложно. С другой стороны, калориметр имеет 4-х кратную симметрию и разместить обработку порядка 120 каналов на одной плате вполне возможно. Поэтому было принято решение разделить калориметр на 4 сектора, каждому из которых будет соответствовать 1 большая плата.

Для перекрытия границ секторов, между триггерными платами передаются 12 цифровых сигналов от одной платы в соседнюю, область передаваемых сигналов показана на рисунке 3.3 [17]. Конкретная карта передаваемых сигналов будет определена после фиксирования геометрии калориметра.

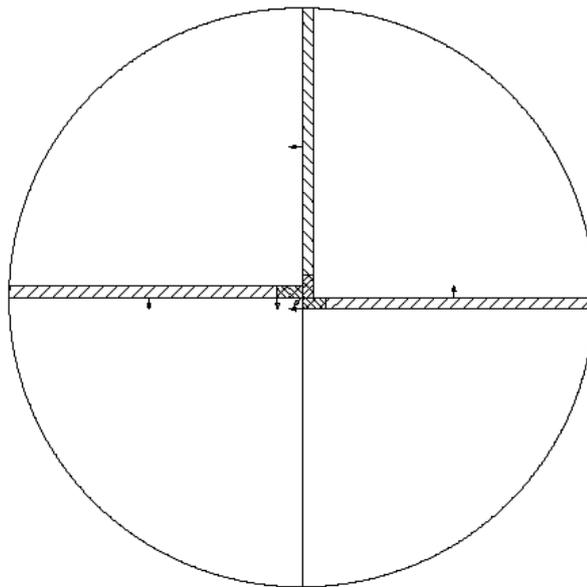


Рисунок 3.3 — Схематическое разделение калориметра по платам триггера и передача сигналов для перекрытия границ секторов

Таким образом, на плате системы первичного триггера ECAL размещено $480/4 = 120$ АЦП. Для физических задач достаточно иметь разрядность АЦП 8 бит. Более детально описание аналоговой части дано в подпараграфе 3.3.1. Все оцифрованные сигналы с калориметра обрабатываются в реальном времени в ПЛИС разработанным алгоритмом. При обнаружении энерговыделения в заданном диапазоне $E_{min} < E < E_{max}$ в модуль центрального триггера с помощью интерфейсной платы передается 64 бита данных, как показано в таблице

А.3 Приложения А.3, для принятия решения о записи информации о данном событии в ССД со всех систем детектора.

Поскольку энергия, выделенная в калориметре, может распределяться между несколькими триггерными ячейками, а также в одном событии может регистрироваться несколько частиц, требуется передавать информацию о числе сработавших ячеек в заданных энергетических диапазонах.

Для облегчения обслуживания триггерной электроники было принято решение аналоговую часть и оцифровывающие элементы триггерных сигналов калориметра вынести в отдельные маленькие платы типоразмера евромеханики 3U (габариты оцифровывающей платы: 70×100 мм), показанные на рисунке 3.4 [17], а обработку оцифрованных данных сделать на материнской плате, которая была бы аналогом шины евро-крейта размером 6U, как показано на рисунке 3.5 [17].

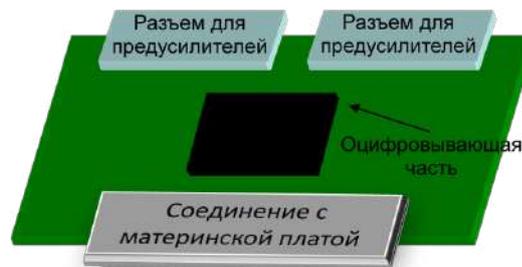


Рисунок 3.4 — Схематическое изображение оцифровывающей платы первичного триггера электромагнитного калориметра

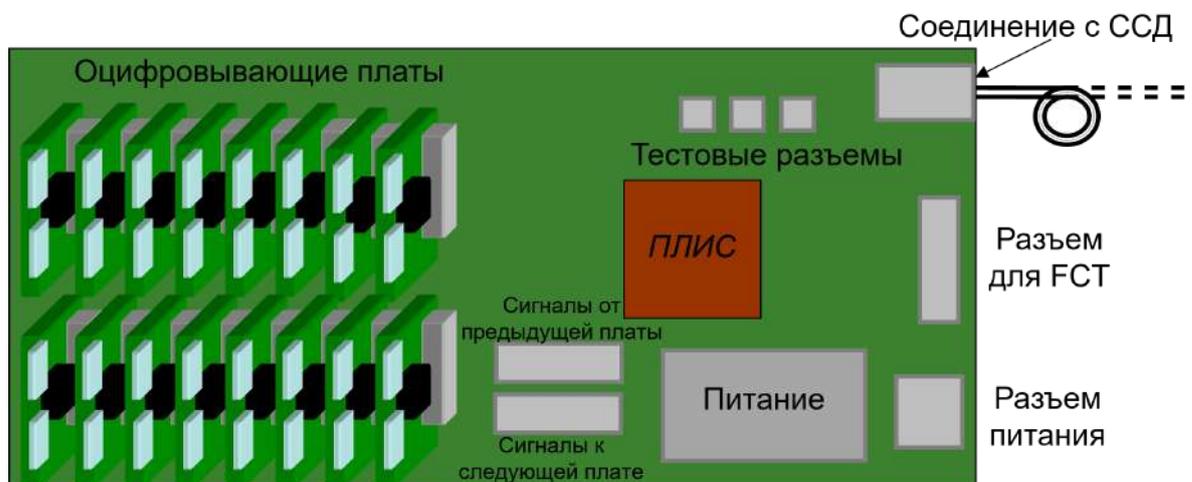


Рисунок 3.5 — Схематическое изображение материнской платы первичного триггера электромагнитного калориметра

Таблица 3.1 — Сравнительная характеристика АЦП, существующих на момент разработки первичного триггера

Название микросхемы	Кол-во бит	Эффективное число бит	Частота дискретизации	Задержка выходного сигнала	Количество каналов	Тип выходного сигнала
AD9212[36]	10 бит	9.87 бит	40 МГц	8 тактов	8	LVDS
AD9287[37]	8 бит	7.85 бит	80 МГц	8 тактов	4	LVDS
ADS5277[38]	10 бит	9.7 бит	40 МГц	7 тактов	4	LVDS

Так как для использования в оцифровывающих платах были выбраны 8-битные АЦП, то в алгоритме поиска энерговыделений кластеров была введена коррекция суммарной разрядности, обеспечивающая сохранение точности. Подробное описание реализации алгоритма приведено в подпараграфе 3.5.2.

На рисунке 3.7 показаны результаты испытаний выбранной схемы построения оцифровывающих плат (приложение Б.3). На левом графике показана измеренная зависимость значения на выходе АЦП от входной амплитуды, усредненная по всем каналам, в диапазоне эквивалентном энерговыделению от 0 до 105 МэВ. На правом графике представлена зависимость отклонения экспериментальных точек от аппроксимирующей прямой.

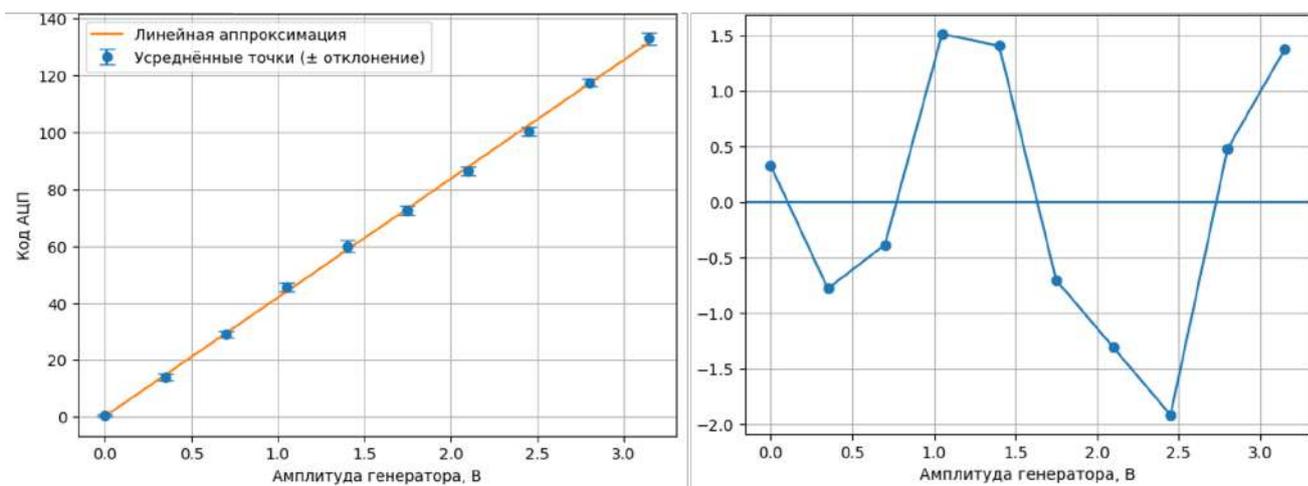


Рисунок 3.7 — Результаты испытаний выбранной схемы построения оцифровывающих плат. Слева: зависимость значения на выходе АЦП от входной амплитуды триггерного канала. Справа: зависимость отклонения экспериментальных точек от аппроксимирующей прямой

Интегральная нелинейность оценивалась относительно линейной аппроксимации, полученной методом наименьших квадратов. Максимальное отклонение не превышает ± 1.9 наименьшего значащего бита (Least Significant Bit — LSB), что соответствует примерно 0.75% полного диапазона 8-битного АЦП. Среднеквадратичное значение интегральной нелинейности составляет 1.14 LSB. На основе измеренных величин была рассчитана дифференциальная нелинейности триггерного канала, составляющая ± 0.17 LSB. Значение дифференциальной нелинейности существенно меньше 1 LSB, что подтверждает монотонность характеристики и отсутствие пропусков кодов.

На рисунке 3.8 представлено амплитудное распределение, соответствующее энерговыделению 105 МэВ, построенное по 14100 событиям. Из гистограммы следует, что $\sigma_{\text{шума}}$ в триггерных каналах составляет 2.5 ед.АЦП, что соответствует 1.92 МэВ при коэффициенте пересчёта, полученном из измерений, равном 0.77. С учётом интегральной нелинейности вклад шумов в энергетическое разрешение составляет примерно 2%, что в 2.5 раза меньше полного требуемого разрешения (5%) и не является определяющим фактором.

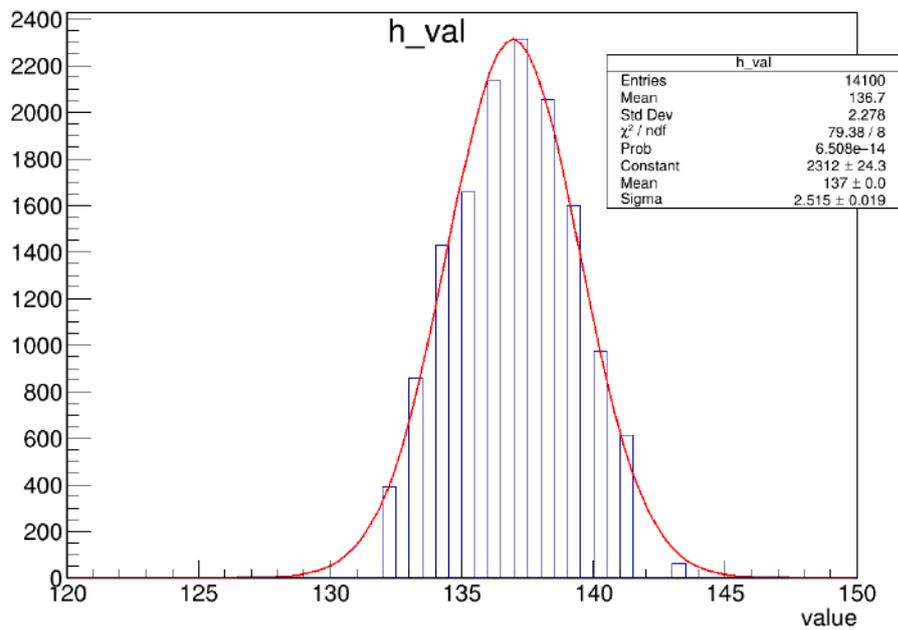


Рисунок 3.8 — Амплитудное распределение эквивалентное энерговыделению в 105 МэВ

Каждая оцифровывающая плата содержит два 4-х канальных 8-ми битных аналого-цифровых преобразователя. На рисунке 3.9 [16] приведены фо-

тографии оцифровывающей и материнской плат. В одну материнскую плату можно установить до 16 оцифровывающих плат.

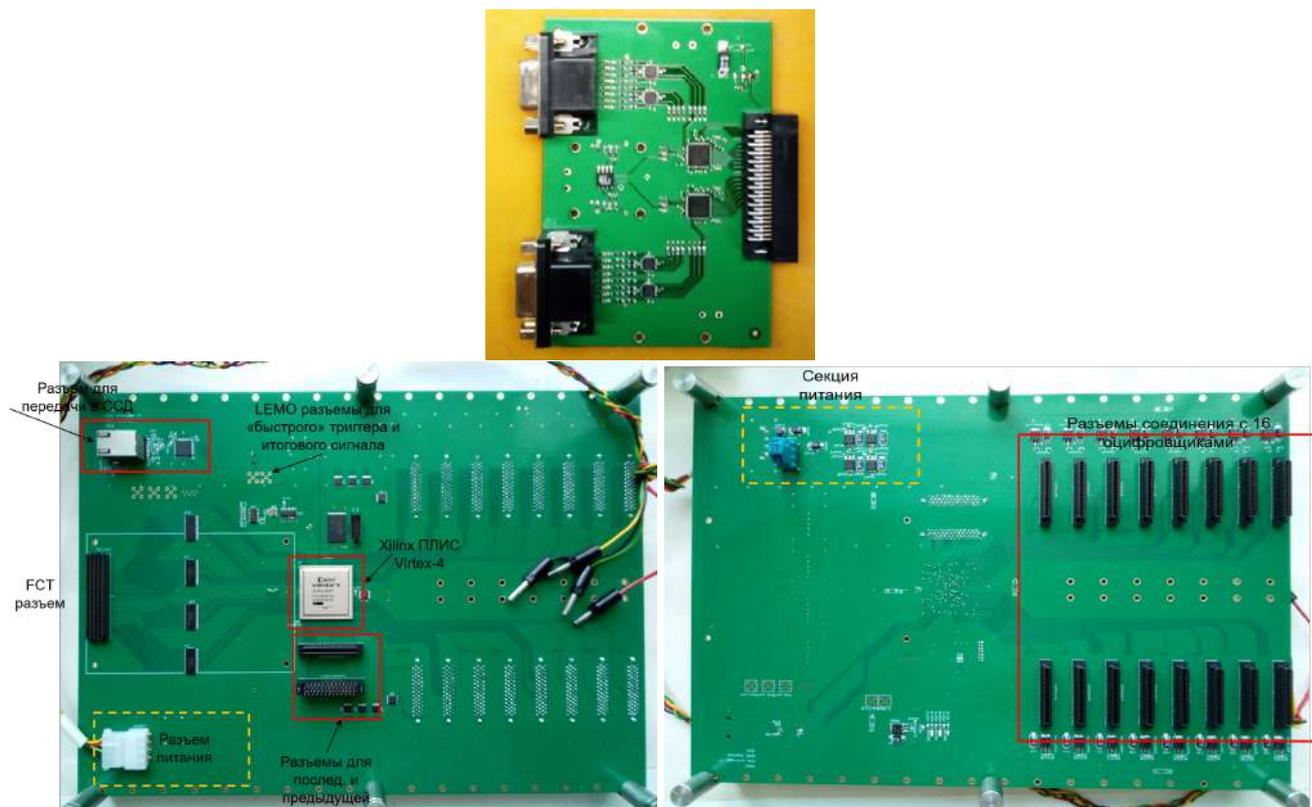


Рисунок 3.9 — Фотографии электроники первичного триггера калориметра. Сверху: Оцифровывающая плата первичного триггера. Снизу: Материнская плата первичного триггера, виды сверху (слева) и снизу (справа)

3.3.2 Цифровая часть первичного триггера

Цифровая часть первичного триггера решает следующие задачи:

- Принимает данные от АЦП с заданной тактовой частотой;
- Загружает опорные константы в регистры управления АЦП и внутренние регистры ПЛИС при включении питания;
- Выполняет процедуры обработки данных, поступивших со всех 128 каналов, в реальном времени;
- Вырабатывает сигнал триггера для оцифровывающих плат калориметра (EROS) и системы дрейфовых трубок (ROESTI).
- Передает триггерную информацию через FCT в центральный триггер для принятия окончательного решения.

Цифровой узел первичного триггера, блок-схема которого показана на рисунке 3.10, построен на основе ПЛИС фирмы AMD (Xilinx) серии Virtex-4 [39]. Весь код для ПЛИС был написан на языке программирования VHDL [40].

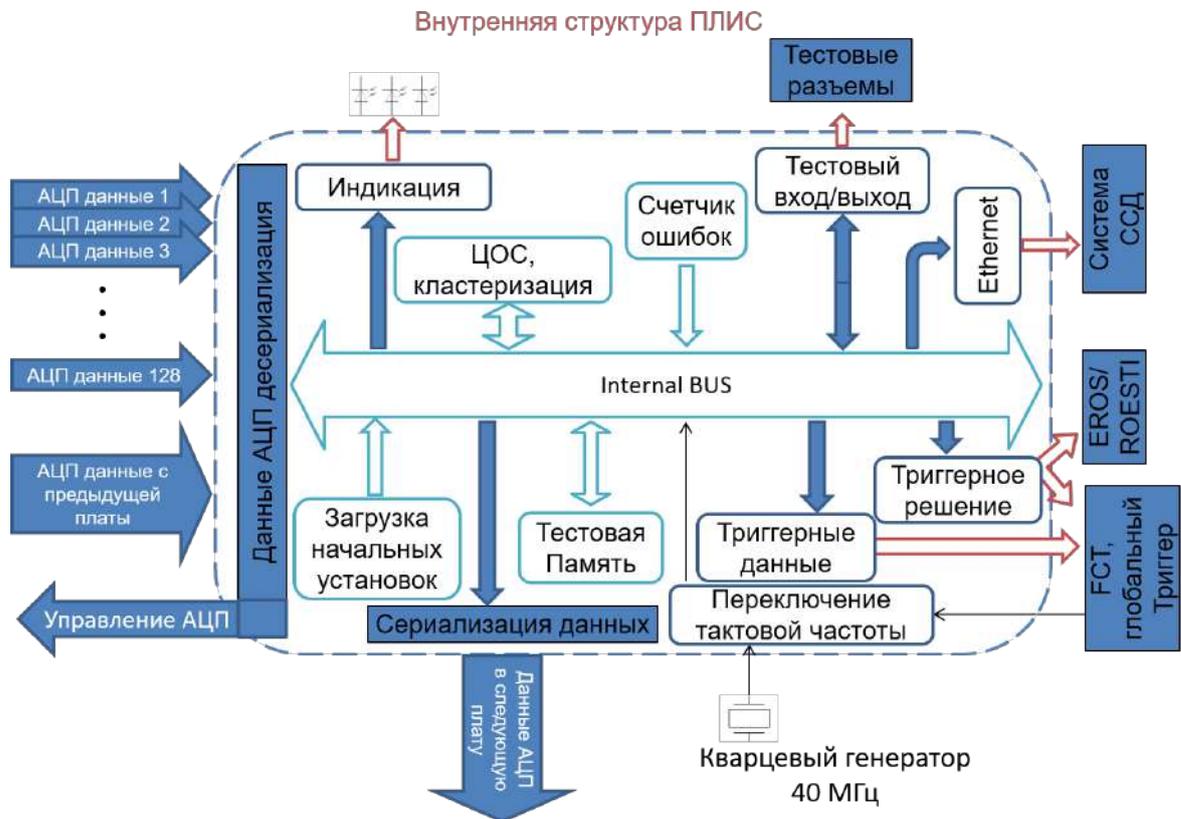


Рисунок 3.10 — Блок-схема внутренней структуры ПЛИС первичного триггера электромагнитного калориметра

Для решения перечисленных задач в состав проекта для ПЛИС первичного триггера включены:

- Модуль приема данных, обеспечивающий фиксацию поступающих от АЦП значений с помощью входных приемников ISERDES (Input Serializer Deserializer — входная сериализация-десериализация);
- Модуль загрузки начальных установок, который при включении питания производит запись опорных констант в регистры ПЛИС и в регистры управления АЦП (по последовательной шине SPI);
- Блок цифровой обработки данных. С его помощью реализуется алгоритм обработки данных, поступающих от АЦП, необходимый для выработки триггерного решения;
- Модули триггерных данных и решения, отвечающие за передачу триггерной информации через FCT в центральный триггер для принятия окончательного решения и сигналов триггера в оцифровывающие платы EROS;
- Блок переключения тактовой частоты — для работы в автономном режиме с кварцевым генератором, при отсутствии тактовой частоты от центрального триггера.
- Блок счетчика ошибок, показывающий количество ошибок внутренней работы цифровой части.
- Модули тестовой памяти и тестовых входов/выходов используются для отработки разных комбинаций данных.

Оцифрованные сигналы с АЦП поступают на входы ПЛИС, всего 128 входных дифференциальных сигналов стандарта LVDS. Все оцифрованные данные проходят этап десериализации — преобразование из последовательного набора бит в параллельный, с использованием встроенной библиотечной мегафункции (заранее спроектированный компонент определенного функционального назначения с перестраиваемыми параметрами) ISERDES, работающей в режиме удвоенной тактовой частоты (DDR — Double Data Rate), то есть входные данные сменяются на обоих фронтах тактовой битовой частоты 320 МГц (DCO — Data Clock Output) — переднем и заднем, как показано на рисунке 3.11а [41]. Тактовая битовая частота вместе с фреймовой частотой (FCO — Frame Clock Output), равной 80 МГц, передаются в ПЛИС с каждого чипа АЦП для использования в модулях десериализации. Каждый такой модуль преобразования имеет один последовательный вход и максимально шесть

параллельных выходов, соответствующих разрядам поступивших данных. Но так как с АЦП поступают 8-битные данные, то необходимо использовать сборку из двух таких модулей, как показано на рисунке 3.11б, где первый модуль является “мастером”, а второй “подчинённым”. Такая же модульная сборка используется для приема данных с предыдущей платы триггера.

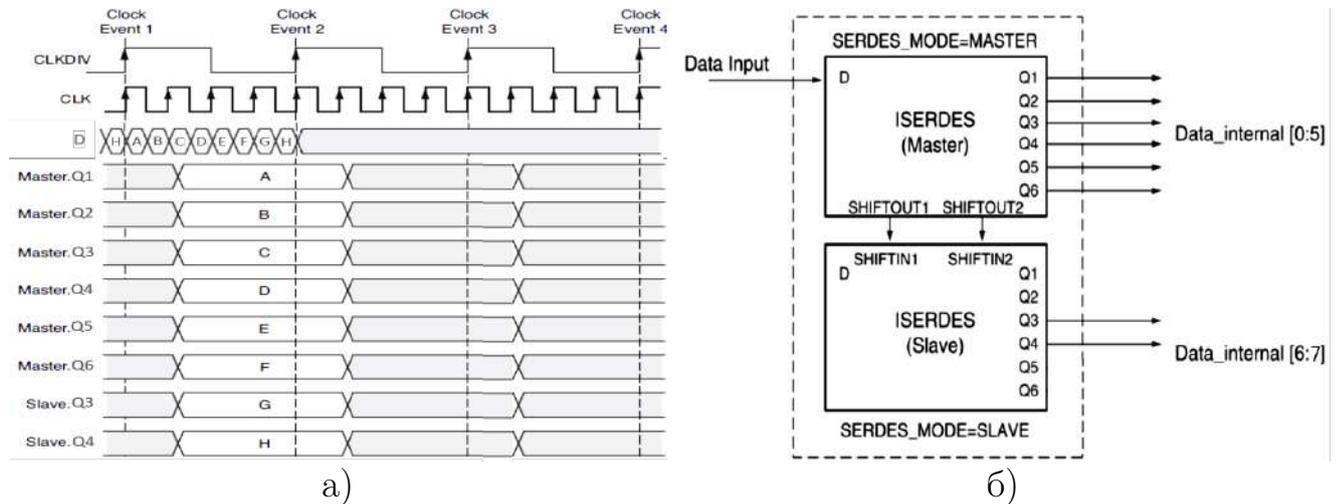


Рисунок 3.11 — Сборка модулей ISERDES: а) принцип работы модуля ISERDES; б) соединение двух модулей ISERDES

Одним из важнейших параметров модуля ISERDES является задержка поступающих данных относительно фреймовой частоты, `IOBDELAY_VALUE`, для правильного преобразования последовательности битов в параллельный код. Для ее определения была проведена калибровка и настройка всех 128 каналов. По результатам калибровки была сформирована таблица констант задержки поступающих данных, используемая во время работы системы первичного триггера. После модулей десериализации в ПЛИС сделана буферная часть, состоящая из нескольких регистров, для синхронизации поступающих данных с внутренней тактовой частотой ПЛИС.

Преобразованные данные с каналов поступают в модуль цифровой обработки сигналов, где анализируются в конвейерном режиме специальным алгоритмом, описанным в подпараграфе 3.5.2.

Внутренняя логика ПЛИС работает на 3-х частотах — 40, 80 и 160 МГц, получаемых от центрального триггера через интерфейсную плату быстрого управления и синхронизации. Частота 40 МГц используется для установки начальных параметров в проекте ПЛИС после включения питания, 80 МГц передается на АЦП для оцифровки аналоговых сигналов с плат предваритель-

ной электроники и используется для десериализации данных, а на частоте 160 МГц работает вся внутренняя логика алгоритма кластеризации.

Для синхронной передачи оцифрованных данных с разных каналов и уменьшения количества передаваемых линий в следующую плату, используется сборка из модулей OSERDES, которая работает по обратному принципу, — преобразование параллельного набора бит в последовательный, как показано на рисунке 3.12 [41].

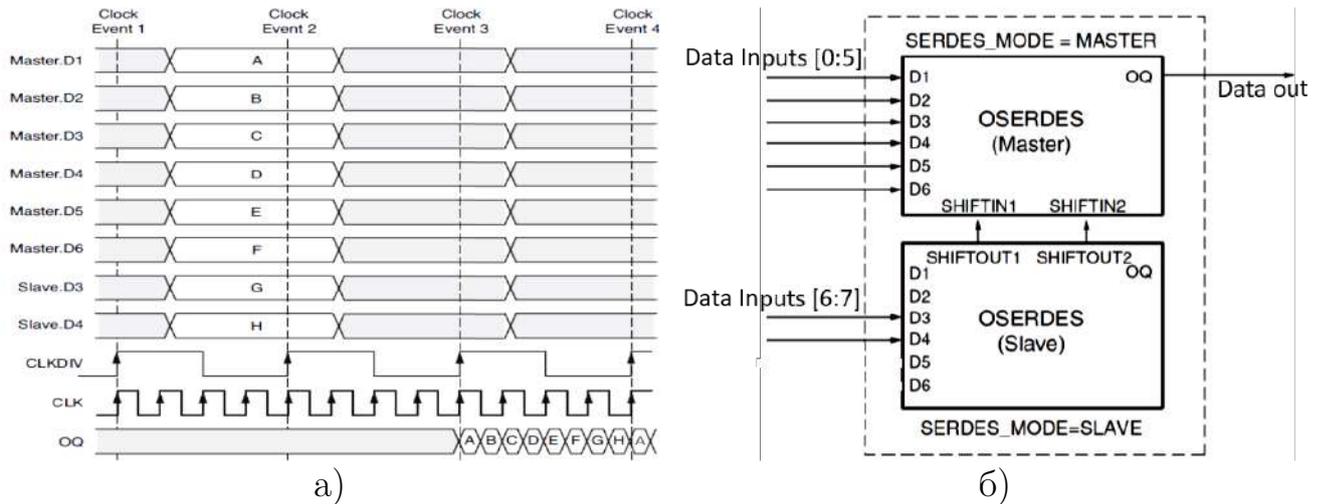


Рисунок 3.12 — Сборка модулей OSERDES: а) принцип работы модуля OSERDES; б) соединение двух модулей OSERDES

Так как в эксперименте предполагается использование 4-х триггерных сборок (4 крейта с оцифровывающими и материнскими платами), то для группирования сигналов “быстрого” триггера и передачи единого сигнала оцифровывающим платам EROS/ROESTI, была разработана плата триггерного коммутатора, фотография которой приведена на рисунке 3.13. Плата триггерного коммутатора реализована на базе ПЛИС фирмы Intel (Altera) серии Cyclone III. Данная плата принимает сформированные сигналы “быстрого” триггера от четырех материнских плат первичного триггера и формирует триггерную посылку, состоящую, либо из заголовка и команды, либо одиночного импульса необходимого уровня, для передачи в интерфейсные платы оцифровывающей электроники калориметра и дрейфовых трубок.

Учитывая, что система первичного триггера будет располагаться в зоне, защищенной от сильной радиации (параграф 3.4), то на плате можно использовать флеш-память для записи программного кода ПЛИС. Кроме того, есть возможность использования JTAG для загрузки конфигурационного файла в ПЛИС в формате битового потока.

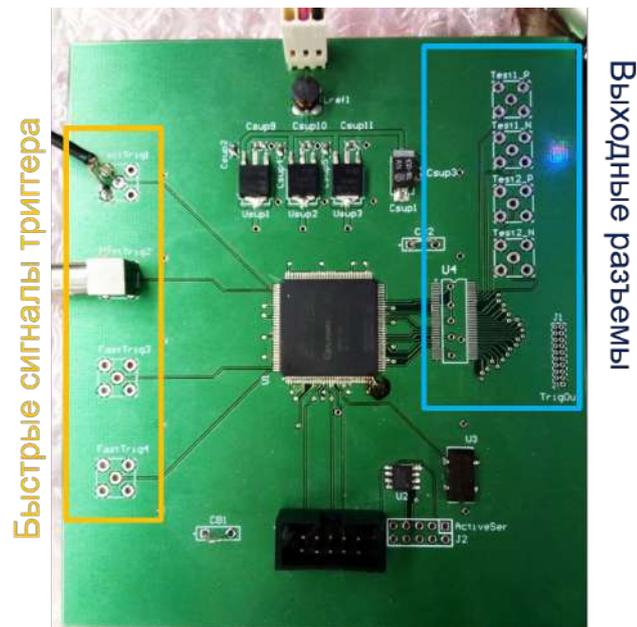


Рисунок 3.13 — Плата коммутатора “быстрого” триггерного сигнала

3.4 Испытания радиационной стойкости

Согласно расчетам, в месте расположения детектора ожидаются большие дозы облучения из-за очень высокой интенсивности пучка [42]. Известно, что гамма- и нейтронное излучение оказывают воздействие на электронные компоненты, приводя к нестабильным режимам работы или их выходу из строя.

Гамма-излучение вызывает ионизационные эффекты в электронных компонентах, приводящие к накоплению фиксированного заряда на границах раздела вследствие длительного кумулятивного воздействия. Такое явление называется эффектом суммарной ионизирующей дозы. Эффект суммарной дозы или Total Ionizing Dose (TID) — это, в основном, не подлежащие восстановлению повреждения, поэтому необходим тщательный выбор электронных компонентов, в которых эффект от суммарной ионизации будет мал.

При взаимодействии нейтронов с ядрами атомов кремния в электронных компонентах, содержащих транзисторы (например, ПЛИС, АЦП и ОУ), происходит быстрое высвобождение электрического заряда, способное привести к изменению состояния транзисторов. Данное явление известно как Single Event Upset (SEU), или одиночный сбой. SEU не является необратимым повреждением для компонентов, допускающих перезагрузку или перезапись логической конфигурации. Однако такое воздействие может приводить к искажению те-

кущей цифровой информации в памяти или возникновению ошибок в работе логических схем.

В области детектора в эксперименте ожидается значительный поток нейтронов и гамма-квантов. Для обеспечения стабильного сбора данных необходимо учитывать влияние SEU в платах электроники. С целью снижения воздействия эффекта TID требуется выбирать электронные компоненты, обладающие повышенной радиационной стойкостью. Для выполнения этих требований участниками коллаборации были проведены моделирование радиационной обстановки с имитацией экспериментальных условий для оценки уровней излучения, а также испытания электронных компонентов и соединений на радиационную стойкость.

Моделирование радиационного фона

Предварительное моделирование было выполнено для оценки излучения в области детектора с использованием пакета RHITS [43].

На рисунке 3.14 [42] показаны радиационные уровни нейтронового и гамма-излучения, слева и справа, соответственно. При моделировании было получено, что для области расположения электроники первичного триггера (в пределах 5 метровой длины сигнальных кабелей) на Этапе-I эксперимента COMET, поток нейтронов будет приблизительно 10^{12} нейтронов/см² и поглощенная доза гамма-квантов 2 кГр, с учетом фактора безопасности 10.

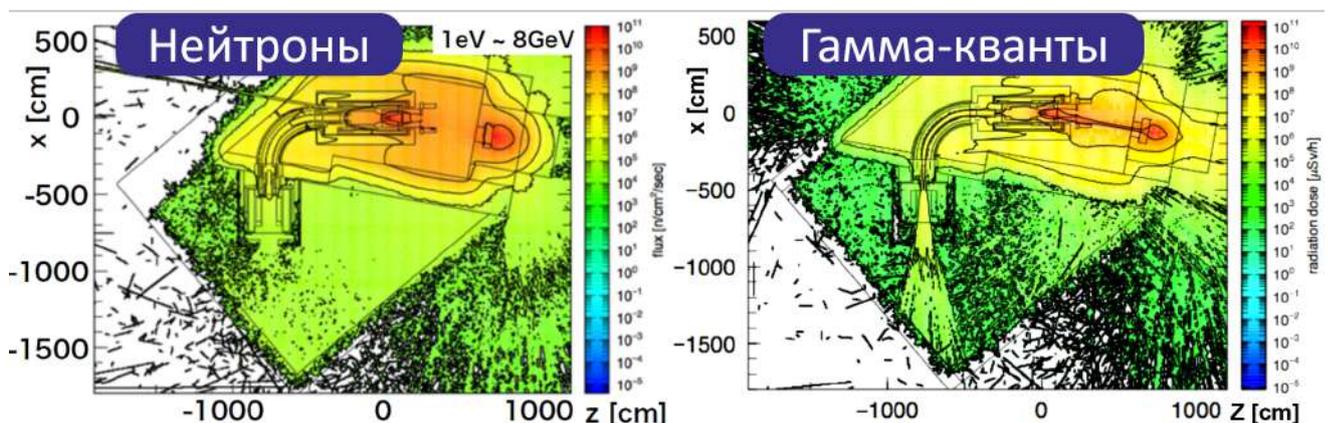


Рисунок 3.14 — Радиационные уровни потоков нейтронов (слева) и гамма-квантов (справа), посчитанные в RHITS для Этапа-I эксперимента COMET

Таким образом, исходя из вышесказанного, возможности расположения электроники первичного триггера сильно ограничены и предполагаемые варианты показаны на рисунке 3.15 голубыми квадратами — А, В и С.

В ходе многочисленных обсуждений с участниками коллаборации было принято решение расположить триггерную электронику в районе области В на специальной платформе с использованием радиационной защиты по следующим причинам:

- Данная область имеет минимальные ожидаемые уровни дозы потока нейтронов около 10^6 нейтронов/см² и поглощенной дозы гамма-квантов 1 кГр с учетом фактора безопасности 10;
- Оптимизация длины кабелей между платами предварительной электроники калориметра и платой глобального триггера, расположенного на этаж выше.

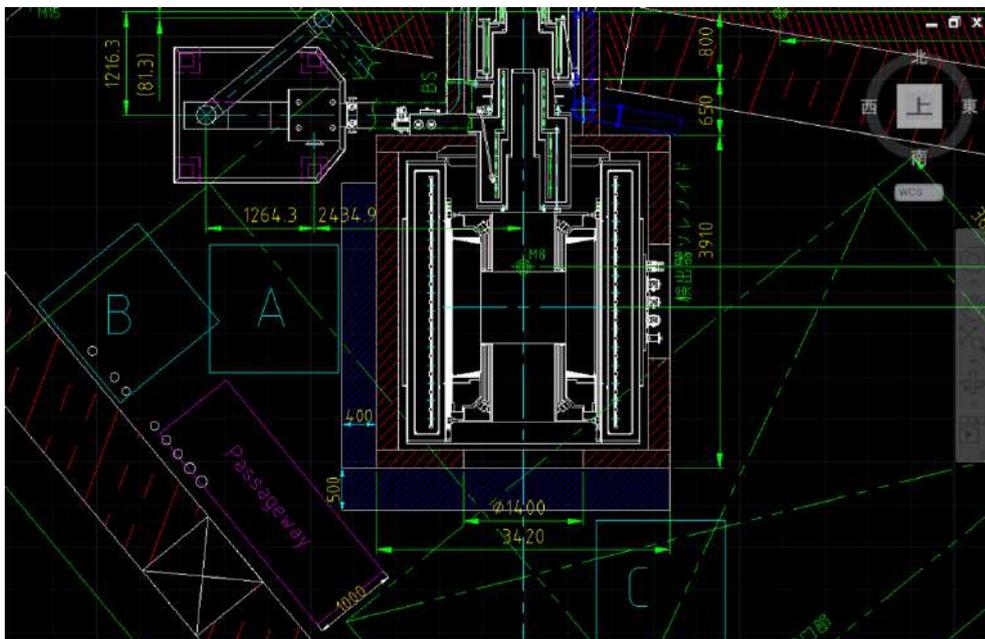


Рисунок 3.15 — Возможные места размещения триггерной системы обозначены А, В и С

Облучение гамма-квантами

Помимо нейтронного излучения значительную угрозу для электроники представляет гамма-излучение, поэтому необходимо было рассмотреть влияние и этого типа излучения на компоненты электроники. Некоторые электронные компоненты, используемые в прототипе, уже были исследованы компаниями-производителями или другими группами участвующими в эксперименте [44]. Поэтому в данных испытаниях проверялась устойчивость к требуемому уровню облучения только у части элементов прототипа, как, например, АЦП, стабилизаторы напряжения и т.п.

Тестовое облучение гамма-квантами было проведено в лаборатории промышленных ускорителей на установке серии ЭЛВ [45] в ИЯФ СО РАН,

Новосибирск. Пучок гамма-квантов формировался за счет тормозного излучения электронов с энергией 1 МэВ на металлической мишени. Зона облучения составляла $120 \times 10 \text{ см}^2$. Облучение проводилось в три этапа:

- На первом этапе проверялось, могут ли компоненты работать с дозой гамма-излучения до 200 Гр.
- На втором этапе были проведены дополнительные тесты облучения с общей дозой до 2 кГр.
- На третьем этапе, проверялось при какой дозе компоненты будут приходить в нерабочее состояние.

В этих тестах испытывались следующие компоненты:

- 4 типа стабилизаторов положительного напряжения — LT1963AEST3.3 (Analog Devices), NCP1117DT33 (ON Semiconductor), NCP1117DT25 (ON Semiconductor), NCP1117DT18 (ON Semiconductor) и 3 типа стабилизаторов отрицательного напряжения — LM337IMP (ON Semiconductor), TPS72301DBV (Texas Instruments) и LT1964ES5 (Analog Devices). На рисунке 3.16 показана фотография мезонинной платы с несколькими образцами стабилизаторов, по 4 каждого типа;
- 4 операционных усилителя компании Analog Devices ADA4932;
- 2 экземпляра АЦП компании Analog Devices AD9212; флэш-память EP4C40F29 для программирования и ПЛИС серии Cyclone IV — EP4C40F29 фирмы Intel (Altera).

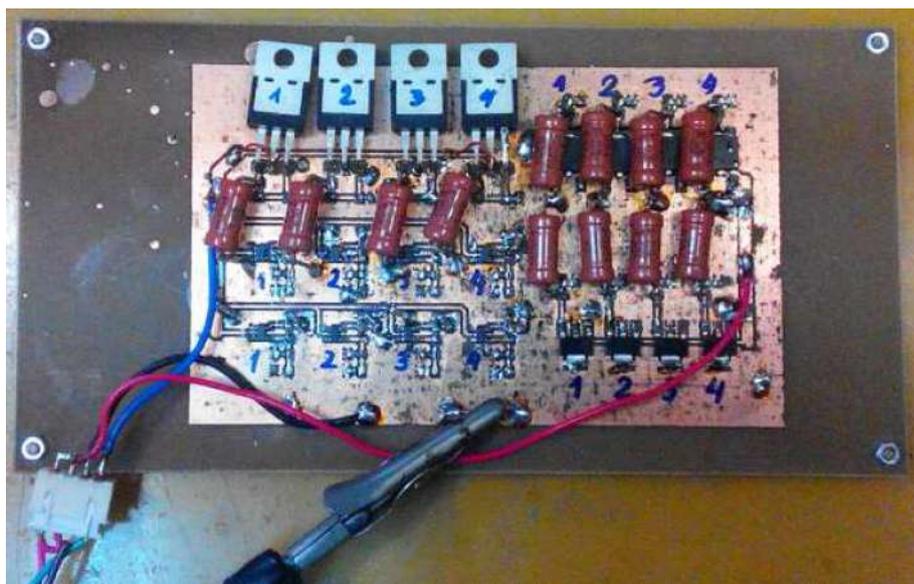


Рисунок 3.16 — Фотография мезонинной платы с образцами стабилизаторов для испытаний устойчивости к требуемому уровню облучения

На рисунке 3.17 показана блок-схема проверки воздействия гамма-излучения.

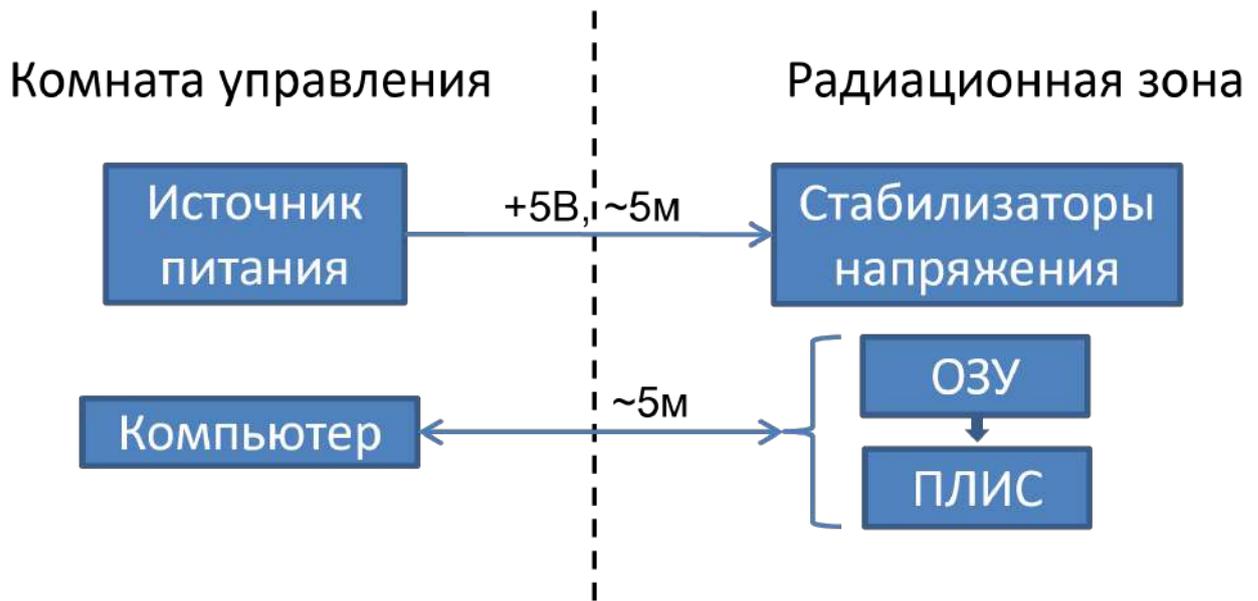


Рисунок 3.17 — Блок-схема для проверки воздействия гамма-излучения

Для проверки работоспособности стабилизаторов с них снимались показания, при помощи осциллографа и вольтметра, после каждой серии облучения. Работоспособность ОУ и АЦП проверялась с помощью подачи сигнала на вход и наблюдения сигналов на выходе микросхем после каждой новой дозы облучения. Флэш-память и ПЛИС тестировались с использованием проверки чек-суммы программируемых цифровых данных, используя режимы “чтения” конфигурационного файла из микросхем в режимах “JTAG” и “Active Serial”. С помощью первого проверялась работоспособность ПЛИС, а с помощью второго работоспособность флэш-памяти.

Все компоненты выдержали этап облучения до 200 Гр. В таблице В.1 Приложения В приведены результаты тестирования стабилизаторов напряжения. Как видно из таблицы, не все компоненты выдержали дозу 0.5 кГр. А дозу в почти 2 кГр с отклонением меньше 10% в показаниях, выдержали только 2 типа стабилизаторов. Цифровые микросхемы и ОУ полностью выдержали дозу облучения до 2 кГр, как показано в таблице В.1.

Облучение нейтронами

Используя один из прототипов электроники первичного триггера, были проведены испытания работоспособности под воздействием облучения нейтронами на установке Tandem университета Кобе, Япония [46], показанной на рисунке 3.18. Нейтроны рождаются в реакции ${}^9\text{Be}(d, n)$, при этом энергия

дейтронов составляет 3 МэВ. Информация о потоке нейтронов предоставлялась сотрудниками университета.



Рисунок 3.18 — Установка Tandem в университет Кобе, Япония

Облучению нейтронами подвергались основные узлы электроники первичного триггера: ОЗУ и ПЛИС фирмы Altera, и некоторые типы стабилизаторов. Так же остальные активные компоненты, такие как ОЗУ и ПЛИС фирмы Xilinx, АЦП и ОУ, тестировались другими группами.

На рисунке 3.19 показана блок-схема измерений. В радиационную зону во время эксперимента входить нельзя, поэтому использовалась система двух компьютеров. С главного компьютера, который находился в комнате управления, по удаленному доступу (ssh) запускался написанный автором скрипт на компьютере, который располагался в безопасной области радиационной зоны. Программа передавала команды для проверки записанных данных в ПЛИС и ОЗУ непрерывным циклом в течение всего времени испытания. Если было обнаружено несовпадение контрольных сумм, записанного в ОЗУ и ПЛИС конфигурационных файлов с исходным кодом, программа должна была переписать испортившийся конфигурационный файл в ОЗУ и ПЛИС, соответственно. При перезаписи программа так же должна была записывать в отдельный файл время перезаписи, чтобы можно было оценить примерную частоту сбоев.

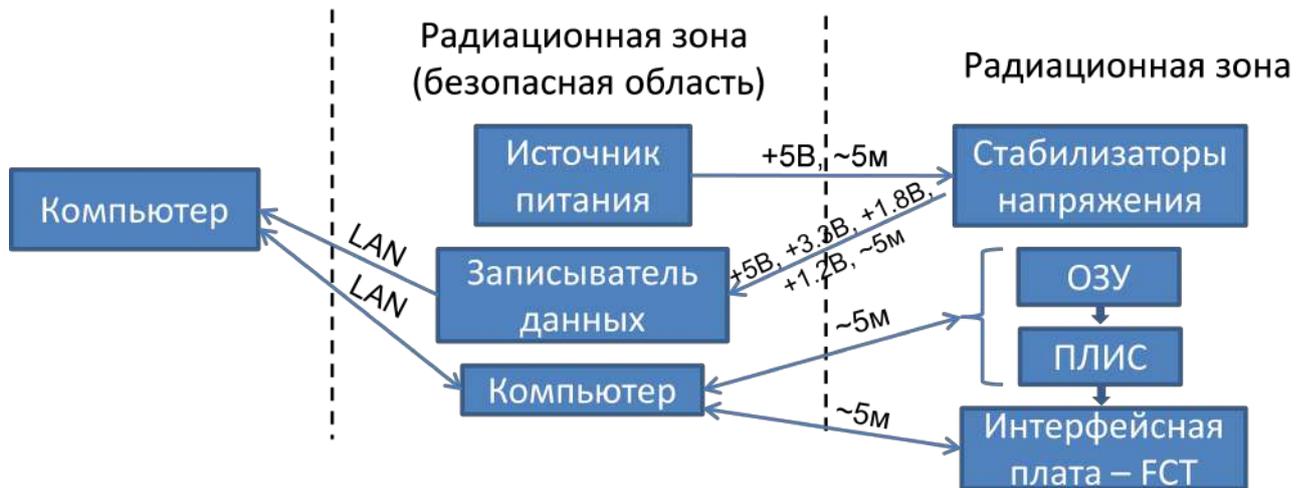


Рисунок 3.19 — Блок-схема для тестирования нейтронами

В радиационной зоне находились платы первичного триггера и интерфейсная плата. На рисунке 3.20 показан испытательный стенд. Красной пунктирной линией выделена плата первичного триггера, а синей интерфейсная плата.

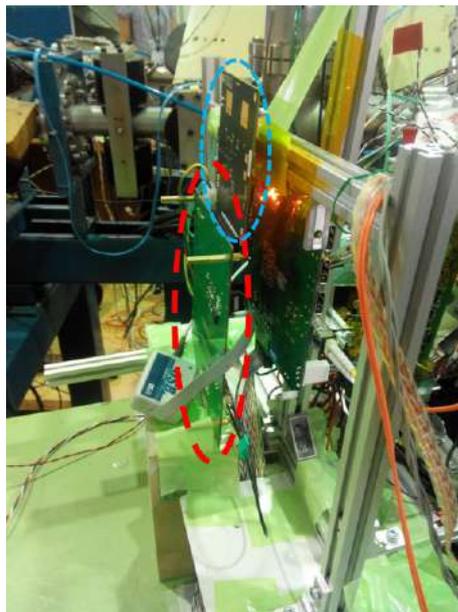


Рисунок 3.20 — Стенд для испытания работоспособности под воздействием облучения нейтронами

Стабильность работы внутренней логики и передачи данных между платами и компьютером так же подвергалась проверке. Для этого с некоторой периодичностью триггерная плата должна была вырабатывать определенную последовательность битов и передавать ее через интерфейсную плату в компьютер. При возникновении сбоя, в файл “логов” должно было фиксироваться время для измерения частоты ошибок.

Все элементы триггера проверялись на стабильность работы при потоке нейтронов примерно 10^{12} нейтр./см² для области расположения электроники на Этапе-I эксперимента СОМЕТ. На рисунке 3.21 приведен график набора нейтронной дозы.

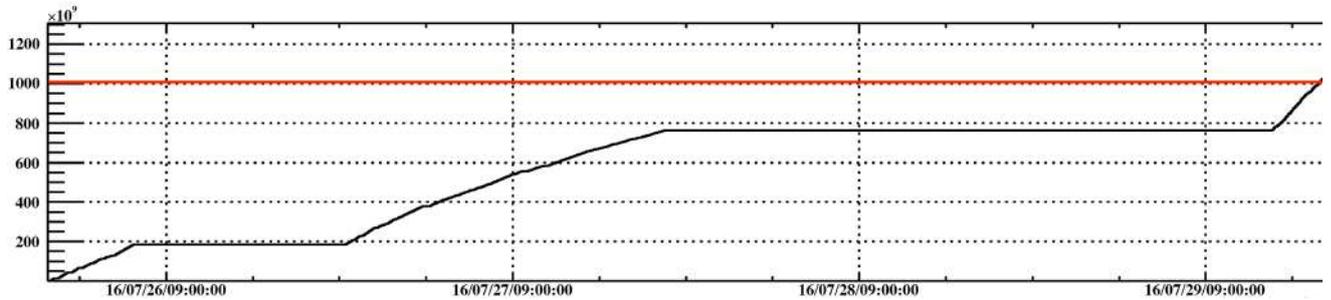


Рисунок 3.21 — График набора нейтронной дозы

Радиационное тестирование с нейтронами показало, что сбоев в работе у выбранных элементов триггерной системы (ПЛИС, ОЗУ и стабилизаторы) не происходило и их можно использовать для эксперимента.

3.5 Алгоритм поиска кластеров

При энергиях около 100 МэВ электромагнитный ливень, вызванный попадающей частицей, будет распределяться по многим кристаллам калориметра. Для восстановления полной энергии входящих в калориметр частиц необходимо суммировать энергосодержание по нескольким кристаллам, которые смежны с кристаллом с максимальным энергосодержанием. Для определения энергии кластеров в режиме реального времени, триггеру доступны только сигналы триггерных ячеек. Поэтому важно выбрать оптимальное количество триггерных ячеек, которые должны быть отнесены к одному кластеру для суммирования энергии.

3.5.1 Моделирование алгоритма системы первичного триггера

Для построения оптимального алгоритма кластеризации было проведено моделирование методом Монте-Карло [14]. В моделировании сравнивалось три размера кластера:

- 1×1 триггерных ячеек, соответствующих 2×2 кристаллам (1 модуль калориметра);
- 2×2 триггерных ячеек, соответствующих 4×4 кристаллам (4 модуля калориметра);
- 3×3 триггерных ячеек, соответствующих 6×6 кристаллам (9 модулей калориметра).

В первом случае за кластер принималась одна триггерная ячейка с максимальным энерговыделением. Для случая с размером 2×2 , кластер определялся следующим образом: сначала производилось суммирование по всем возможным комбинациям триггерных ячеек размером 2×2 со сдвигом на одну триггерную ячейку (2×2 кристалла), как показано на рисунке 3.22 [13]. Затем выбиралась триггерная группа с максимальной суммой, которая в итоге принималась за сработавший кластер. В случае с размером кластера 3×3 триггерные ячейки, поиск кластера происходил аналогично случаю 2×2 , с единственной разницей в том, что суммирование происходило по всем возможным комбинациям 3×3 триггерные ячейки.

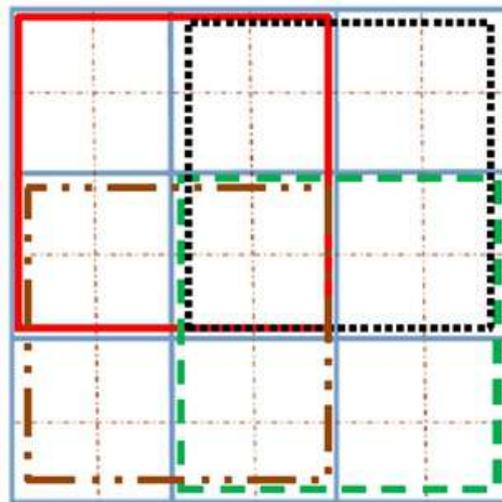


Рисунок 3.22 — Суммирование по всем возможным комбинациям 2×2 триггерных ячеек

Моделирование было выполнено с использованием официального инструментария эксперимента COMET — ICEDUST [11]. Был сгенерирован один миллион событий рождения электронов из мюонной стоп-мишени с импульсом 105 МэВ/с и изотропным распределением направления движения, рисунок 3.23.

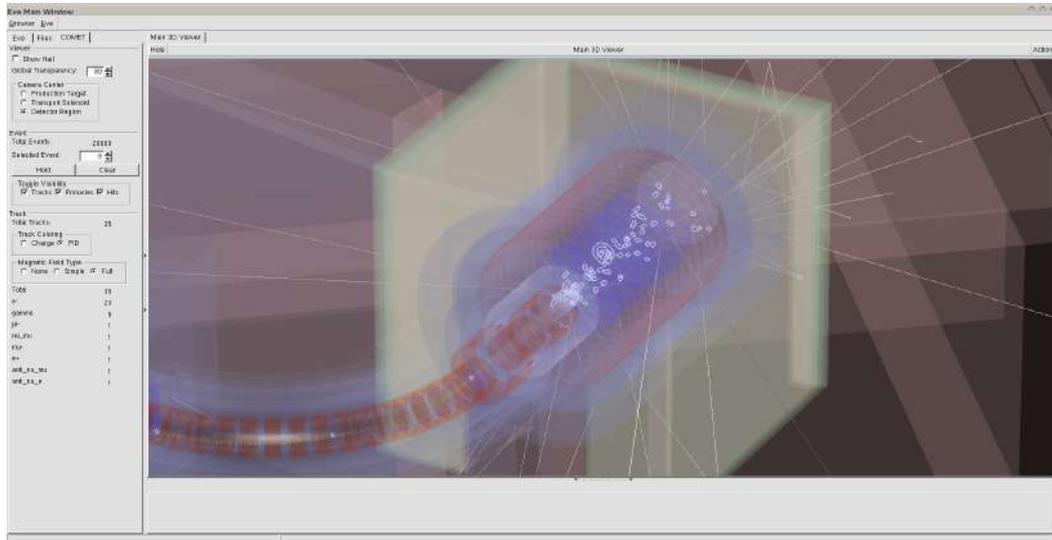


Рисунок 3.23 — Иллюстрация моделирования одного события в ICEDUST

На рисунке 3.24 показан пример распределения энерговыделения в кластерах с максимальным размером 3×3 триггерных ячейки в зависимости от угла попадания, так как он включает и распределения по 2×2 , а на рисунке 3.25(а) [14] показано распределение полного энерговыделения для каждого размера кластера.

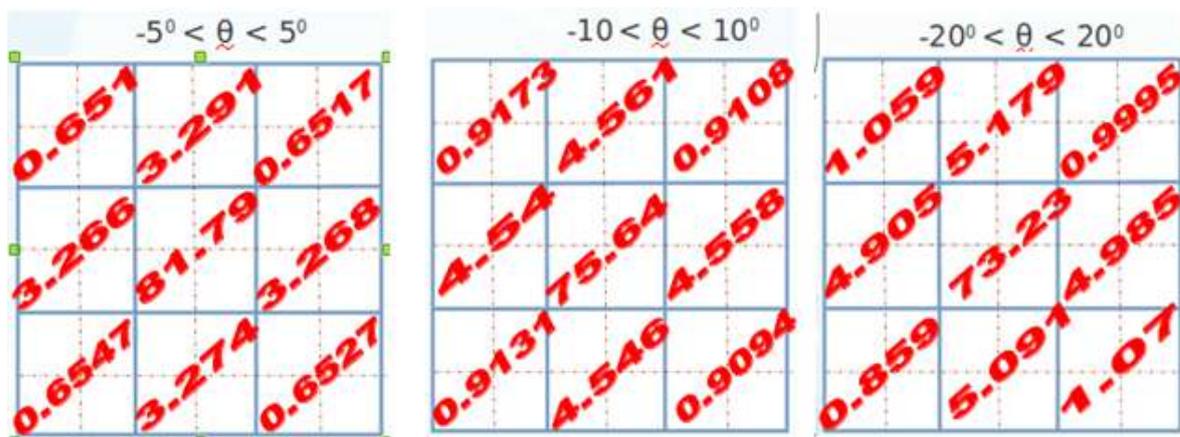


Рисунок 3.24 — Примеры распределения энерговыделения по триггерным каналам (МэВ) в кластере калориметра 3×3 в зависимости от угла попадания

Также, проводилось моделирование эффективности запуска в зависимости от порога, накладываемого на восстановленную энергию для каждого

размера кластера. Результаты моделирования показаны на рисунке 3.25(б). Эффективность триггера определялась, как доля сигнальных событий с энергией выше выбранного порога срабатывания. Из рисунков 3.25(а) и 3.25(б) следует, во-первых, что в случае размера кластера 1×1 спектр энергосодержания очень широкий, следовательно, энергетическое разрешение данного кластера будет недопустимо большим (больше 5%):

$$R = \frac{FWHM}{E_{peak} * 2.35} 100\% = \frac{48.8}{88.1 * 2.35} 100\% = 23.6\% \quad (3.1)$$

где FWHM — полная ширина на уровне половинной амплитуды (англ. full width at half maximum).

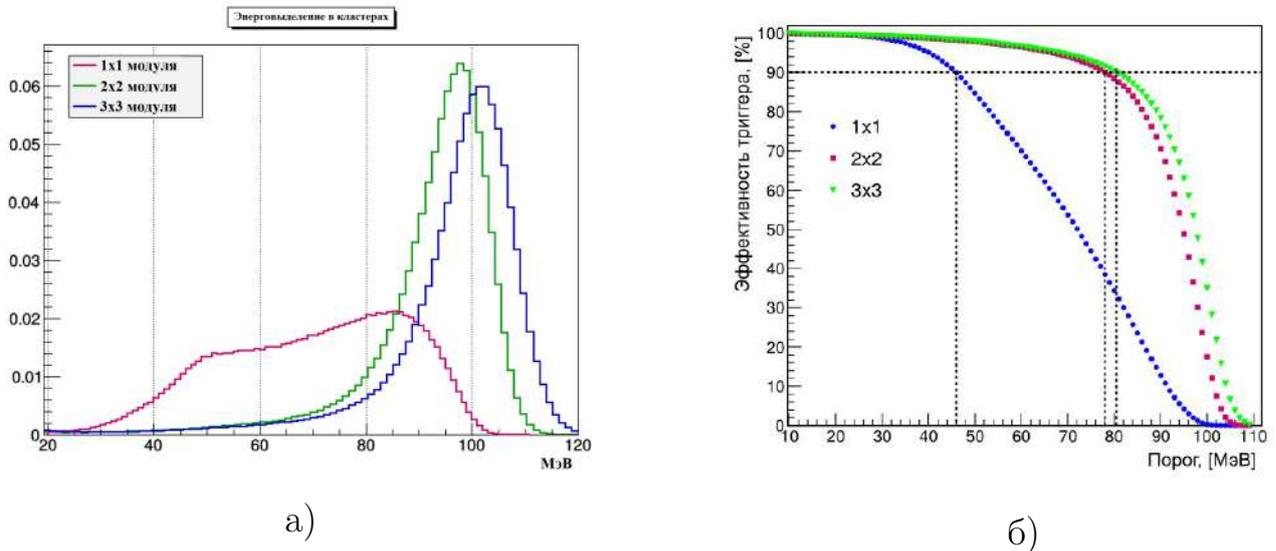


Рисунок 3.25 — а) Спектр энергосодержания в кластерах 3-х разных размеров.
б) Поведение эффективности запуска в зависимости от порога

Во-вторых, 90% эффективности триггера для сигнальных событий соответствует порогу 46 МэВ для одиночной триггерной ячейки, 78 МэВ для кластера 2×2 триггерных ячеек и 80.5 МэВ — 3×3 триггерных ячеек. Обращаясь к рисунку 3.25(б), стоит отметить, что величина порога 46 МэВ, соответствующая 90% эффективности триггера на основе единичной триггерной ячейки, находится в области пика энергетического распределения электронов от DIO распада мюонов в алюминии, рисунок 3.26 [14], следовательно, триггер будет иметь большую фоновую нагрузку. Использование кластера из 2×2 или 3×3 триггерных ячеек решают эту проблему, так как в случае 90% эффективности первичного триггера пороговая энергия находится в области логарифмически спадающей части распределения.

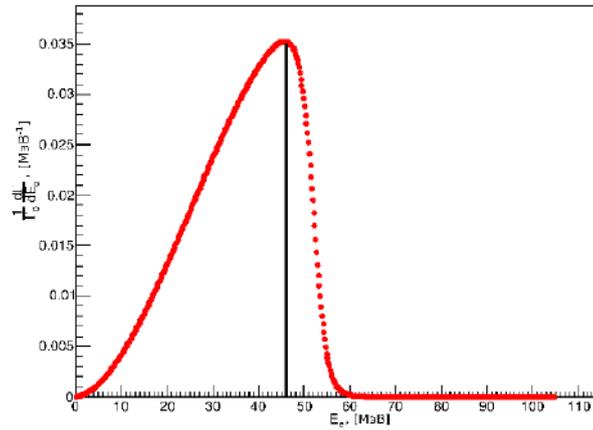


Рисунок 3.26 — Энергетический спектр электронов от распада мюонов, захваченных в алюминии. Прямая линия соответствует значению энергии 46 МэВ

Для количественного подтверждения проведено моделирование отклика первичного триггера на поток ДЮ-электронов, с целью оценки коэффициента подавления потока ДЮ-электронов в зависимости от эффективности триггера. Результаты моделирования для кластера 2×2 и 1×1 триггерных ячеек приведены на рисунке 3.27 [14].

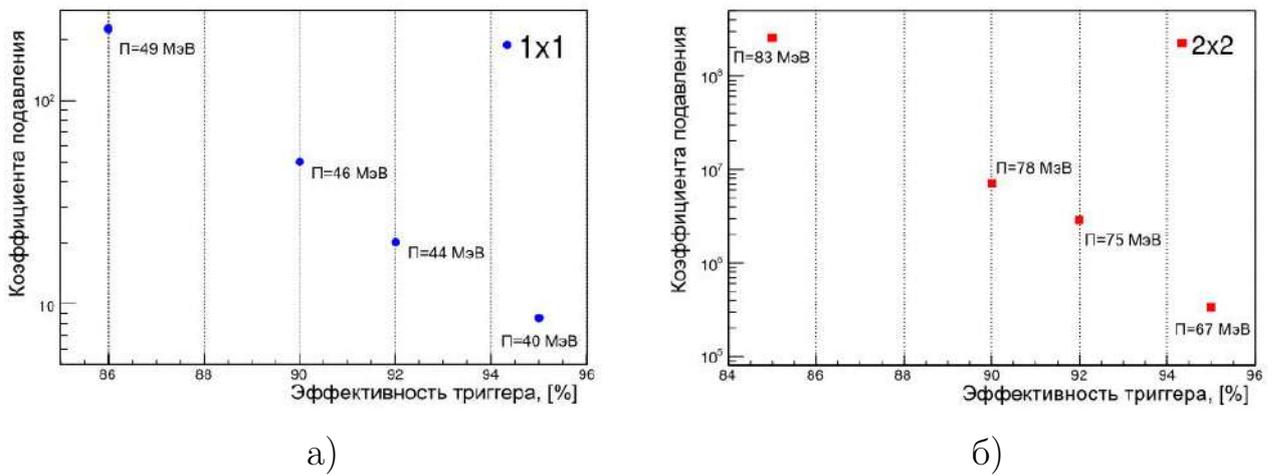


Рисунок 3.27 — Зависимость коэффициента подавления потока ДЮ-электронов от эффективности триггера: а) для кластера из 1×1 триггерных ячеек; б) для кластера из 2×2 триггерных ячеек. П — величина пороговой энергии, соответствующая данной эффективности триггера

Как следует из рисунка 3.27, при 90% эффективности триггера на основе единичной триггерной ячейки, коэффициент подавления потока равен

50. В то время как при 90%-93% эффективности триггера на основе кластера 2×2 триггерных ячеек поток ДЮ-электронов уменьшается на 6 порядков, т.е. обеспечивает нужный компромисс между загрузкой триггера и его высокой эффективностью к сигнальным событиям.

Исходя из описанного выше, кластер размера 1×1 не может использоваться для предварительной триггерной системы калориметра. В работе [14] проведено детальное сравнение работы первичного триггера на основе кластеров, состоящих из 2×2 и 3×3 триггерных ячеек. Шумы электроники были смоделированы следующим образом: в каждом событии и для каждого кристалла генерировалось случайное значение шума, размытое нормальным распределением с заранее заданной величиной $\sigma_{\text{шума}}$ (задавалась в диапазоне от 0.3 до 1.1 МэВ) и это значение было добавлено к значению энерговыделения в этом кристалле. Это было сделано в связи с тем, что шумы в “реальном” эксперименте могут отличаться (из-за разного вида помех) от шумов, измеренных с прототипом. Полученные значения “реалистичного” энерговыделения, собранных в модуле кристаллов, суммировались, что дало значение “измеренной” энергии соответствующей триггерной ячейки в этом сигнальном событии. Энергетическое разрешение для кластеров 2×2 и 3×3 оценивалось путем подбора соответствующего спектра с логарифмическим нормальным распределением.

Для низких уровней шума (меньше 0.7 МэВ) в кристалле кластер 3×3 обеспечивает лучшее энергетическое разрешение, чем кластер 2×2 . Для уровней шума в кристалле порядка 0.8 МэВ оба кластера обеспечивают практически одинаковое энергетическое разрешение. Для уровней шума 1 МэВ и выше кластер 2×2 обеспечивает лучшее энергетическое разрешение, поскольку он собирает шумы меньшего количества каналов, чем самый большой кластер. При обработке экспериментальных данных, полученных при тестировании прототипа калориметра, состоящего из 64-х кристаллов, на пучке электронов было определено, что величина шума на кристалл составляет $\sigma_{\text{шума}} = 1.15$ МэВ.

Если бы загрузка от фоновых событий была маленькой, то можно было бы суммировать энерговыделение в кристаллах по достаточно большой области. Один из основных эффектов, который приводит к появлению зависимости результатов реконструкции от загрузки, связан с наложением сигналов от разных, почти одновременно происходящих событий. То есть если две и более частицы от фоновых процессов попадают в кристаллы калориметра достаточ-

но близко по времени, то их сигналы могут перекрыться и дать “ложный” сигнал μ - e конверсии [28] и, соответственно, “ложный” сигнал запуска триггерной системы. Поэтому, при существующем времени спада сигналов возможно ещё уменьшить наложения, минимизируя размер кластеров.

Разработанный алгоритм обеспечивает необходимую эффективность и подавление фона при минимальном объеме кристаллов, то есть он оптимизирует область суммирования с учетом минимизации наложений. Поэтому, исходя из выше изложенного, в первичном триггере калориметра эксперимента СОМЕТ используется размер кластера 2×2 триггерных ячейки и описанный выше алгоритм поиска оптимального кластера.

3.5.2 Аппаратная реализация алгоритма

Разработанный алгоритм кластеризации реализован на основе ПЛИС и все оцифрованные данные входных каналов анализируются в реальном времени параллельно [16]:

- Сначала из поступивших сигналов вычитается значение пьедестала и происходит сглаживание-интегрирование посредством суммирования (усреднения) двух последовательных значений, с постоянной времени 25 нс.
- После этого входные сигналы суммируются в триггерные группы (4 триггерные ячейки) по заранее прописанным в таблицах группам. Например, для проведенных испытаний на выведенном пучке электронов (подробнее описано в параграфе 3.5) использовалась следующая таблица суммирования:

```

GroupSum (0) <= (Aver2 (0)+Aver2 (1)+Aver2 (4)+Aver2 (5)) ;
GroupSum (1) <= (Aver2 (4)+Aver2 (5)+Aver2 (8)+Aver2 (9)) ;
GroupSum (2) <= (Aver2 (8)+Aver2 (9)+Aver2 (12)+Aver2 (13)) ;
GroupSum (3) <= (Aver2 (1)+Aver2 (2)+Aver2 (5)+Aver2 (6)) ;
5 GroupSum (4) <= (Aver2 (5)+Aver2 (6)+Aver2 (9)+Aver2 (10)) ;
GroupSum (5) <= (Aver2 (9)+Aver2 (10)+Aver2 (13)+Aver2 (14)) ;
GroupSum (6) <= (Aver2 (2)+Aver2 (3)+Aver2 (6)+Aver2 (7)) ;
GroupSum (7) <= (Aver2 (6)+Aver2 (7)+Aver2 (10)+Aver2 (11)) ;
GroupSum (8) <= (Aver2 (10)+Aver2 (11)+Aver2 (14)+Aver2 (15)) ;

```

- Затем результат суммирования поступает на амплитудные дискриминаторы и сравнивается с заданным заранее пороговым уровнем. При появлении на выходе дискриминатора сигнала высокого уровня (логическая “1”), “взводится” флаг о превышении порога и сгруппированным амплитудам разрешается поступить в подмодули поиска амплитуд триггерных групп и кластера (группы с максимальной амплитудой):

```

Thresh_i: for iGroup in 0 to NumGroup-1 generate
  GroupValue_Up_LT(iGroup) <= '1' when (GroupSum(iGroup) >=
    ThresholdData_0) else '0';
  LT_Threshold : entity work.SRFF
  port map (
5    S => GroupValue_Up_LT(iGroup),
      CLK => Clock160,
      R => AllReset,
      q => GroupLT_Trig(iGroup)
  );
10 end generate Thresh_i;

```

Так же в этот момент формируется сигнал “быстрого” триггера, который передается в оцифровывающие платы измерительного канала с минимальной задержкой.

- Амплитуда триггерной группы определяется путём сравнения текущего значения суммарной амплитуды с её значением, полученным на предыдущем такте. Как только текущее значение становится меньше предыдущего, за амплитуду триггерной группы принимается значение суммарной амплитуды, зарегистрированное на предыдущем такте. В момент, когда амплитуда триггерной группы определена, вырабатывается относящийся к этой группе “флаг” и значение соответствующей группы записывается в регистр:

```

Amp_i: for iGroup in 0 to NumGroup-1 generate
  GroupValue_Amp_Done(iGroup) <= '1' when ((DelayGroupAmp(
    iGroup) > GroupSum(iGroup)) and (GroupLT_Trig(iGroup) =
    '1') and (GroupAmp_Trig(iGroup) = '0')) else 0;
  Amp: entity work.SRFF
  port map (
5    S => GroupValue_Amp_Done(iGroup),
      CLK => Clock160,
      R => AllReset,
      q => GroupAmp_Trig(iGroup)
  );

```

```

10 process(Clock160)
    begin
        if rising_edge(Clock160) then
            if ((GroupLT_Trig(iGroup) = '1') and (not
15 GroupAmp_Trig(iGroup) = '1')) then
                GroupChAmp(iGroup) <= DelayGroupAmp(iGroup);
            end if;
        end if;
    end process;
end generate Amp_i;

```

- Как уже упоминалось в подпараграфе 3.5.1, алгоритм поиска кластера проверяет все возможные комбинации триггерных групп и сравнивает их суммарные амплитуды, как показано на рисунке 3.28 [16]. Для сравнения используются 16-ти разрядные регистры, в которые записываются значения суммарной амплитуды (10 бит) и номер триггерной группы (6 бит). На следующую ступень сравнения передаются данные канала с большей суммарной амплитудой. После финального сравнения будут известны амплитуда и номер группы с максимальным энерговыделением, которые будут обновляться на каждом такте.

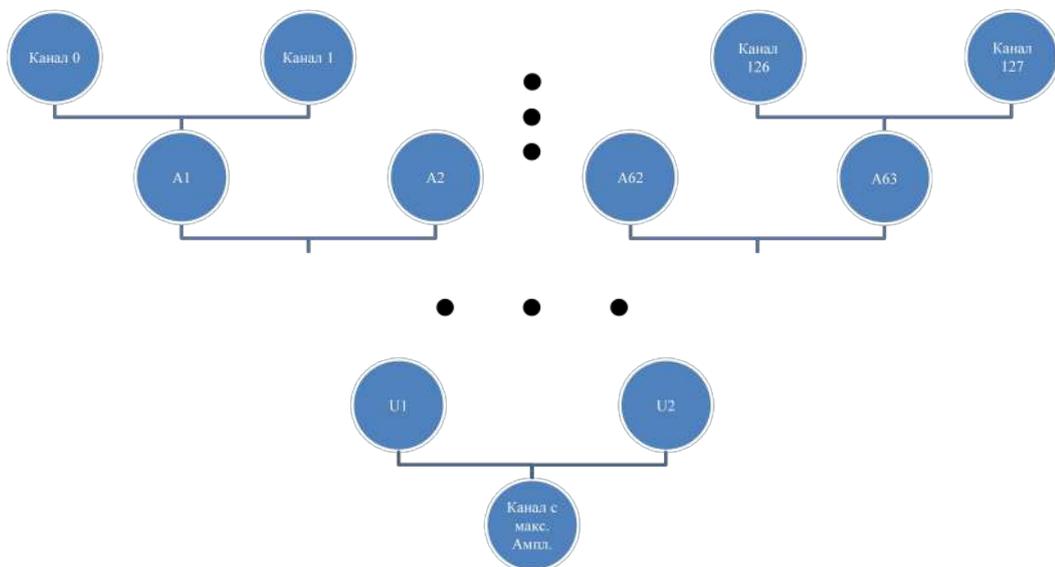


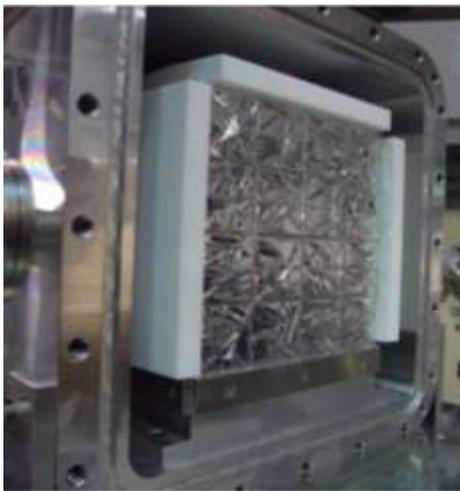
Рисунок 3.28 — Поиск триггерной группы с максимальной суммарной амплитудой

- После определения финальной амплитуды и соответствующего номера триггерной группы формируется посылка в центральный триггер для принятия окончательного решения о выработке сигнала записи данного события.

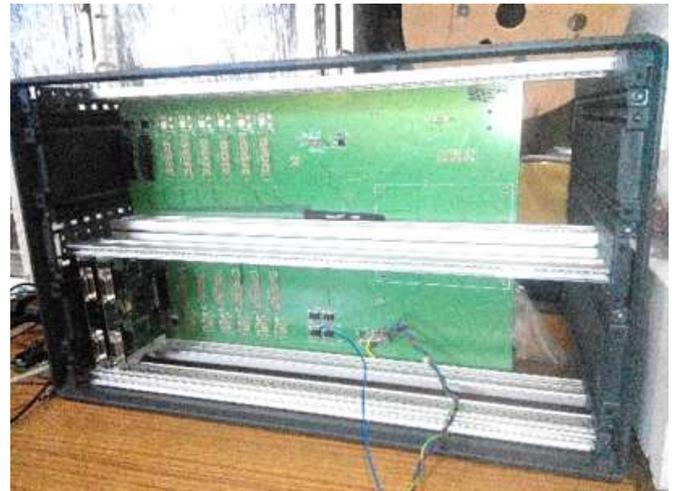
- Сброс всей системы в начальное состояние происходит в следующих случаях:
 - Введен “флаг” о превышении порогового значения дискриминатора, но “флага” об определении амплитуды данного канала или сигнала центрального триггера не было в течение 1 мкс (вариативно и может быть изменено) после этого;
 - Введены все “флаги” и сформированы оба триггерных сигнала. После этого через ~ 60 нс алгоритм вновь готов к работе.

3.6 Измерение энергетического разрешения и эффективности системы первичного триггера электромагнитного калориметра

Работа системы первичного триггера была испытана на выведенном пучке электронов в Научном центре для электрон-фотонных исследований (Университет Тохоку, Япония) [47]. Для испытаний использовались прототип калориметра, состоящий из 64-х кристаллов, 4 платы предварительной электроники и прототип системы первичной триггерной электроники (2 платы оцифровщиков и материнская плата), показанные на рисунке 3.29 [13; 29].



а)



б)

Рисунок 3.29 — Прототипы калориметра и триггерной системы: а) прототип калориметра из 64-х кристаллов; б) прототип системы первичного триггера

Методика проведения испытаний, рисунок 3.30 [29], заключалась в следующем:

- Электроны, выведенные из пучка, пролетали через первую систему определения положения;
- Затем, двигаясь через дрейфовые трубки, электроны пролетали через вторую систему определения положения;
- Электроны останавливались в кристаллах калориметра.

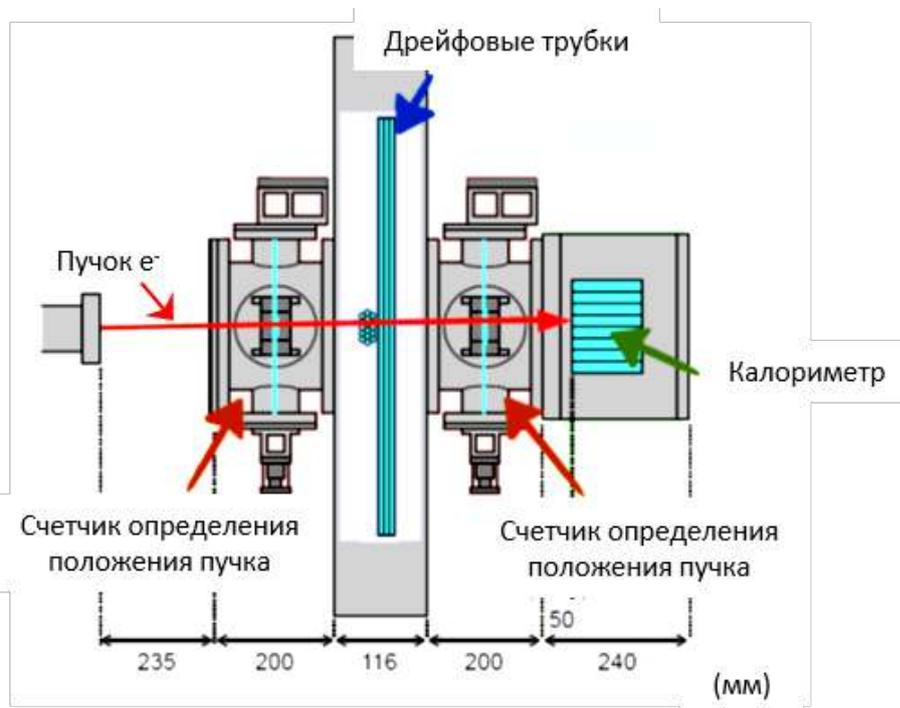


Рисунок 3.30 — Схема стенда для проведения испытаний

Функциональная блок-схема аппаратуры, используемой в проведенных испытаниях, представлена на рисунке 3.31. Испытание осуществлялось по двум следующим схемам:

1. Запуски от системы первичного триггера:

- Сигналы с фотодиодов поступали на платы предварительной электроники;
- Затем сигналы с плат предварительной электроники разветвлялись и подавались на вход оцифровывающей электроники EROS и на вход первичного триггера электромагнитного калориметра;
- Плата первичного триггера формировала сигнал (признак срабатывания) и передавала информацию о событии через интерфейсную плату (FCT) в центральный триггер (FC7) для выработки решения и номера события;

- Выработанное решение с номером события передавалось из FC7 через FCT в интерфейсную плату (IF) EROS, а затем и в сами платы EROS.

2. Запуски от счетчиков положения пучка:

Все те же самые пункты, описанные выше. Единственное отличие: плата центрального триггера формировала свои запуски, основываясь только на информации от системы счетчиков положения пучка для выработки предварительного решения. Информация же с платы первичного триггера калориметра считывалась через плату FC7 в ССД.

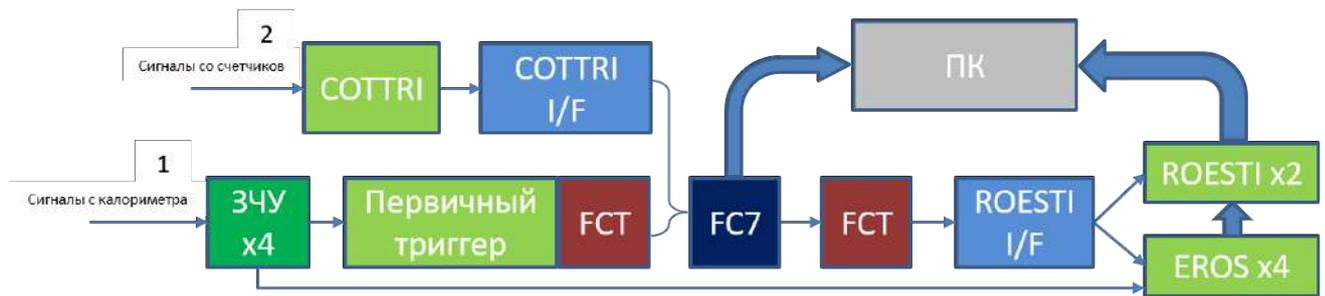


Рисунок 3.31 — Функциональная блок-схема аппаратуры, используемой при проведении испытаний прототипа первичного триггера на выведенном пучке электронов

В ходе измерений было набрано 10 заходов (5 точек по энергии с запусками от триггерной системы калориметра и 5 с запусками от внешней системы для измерения эффективности) примерно по 20 тысяч событий каждый.

На рисунке 3.32 изображены полученные гистограммы форм сигналов одного события в одной из плат EROS от 16 оцифрованных каналов и 2 триггерных каналов.

Эффективность первичного триггера вычислялась из соотношения количеств событий зарегистрированных внешней системой и событий зарегистрированных триггерной системой калориметра. Общая эффективность первичного триггера при зарегистрированном энерговыделении более 30 МэВ составила 99.4%, более 40 МэВ — 99.7%. Энергетическое разрешение определялось, как отношение σ распределения к среднему значению распределения за вычетом пьедестала, который определялся из графика линейности триггерных каналов относительно измерительных каналов, показанного на рисунке 3.33а [13; 18]. Энергетическое разрешение триггерной системы по записанным заходам получилось 4.5%, как показано на рисунке 3.33б [13].

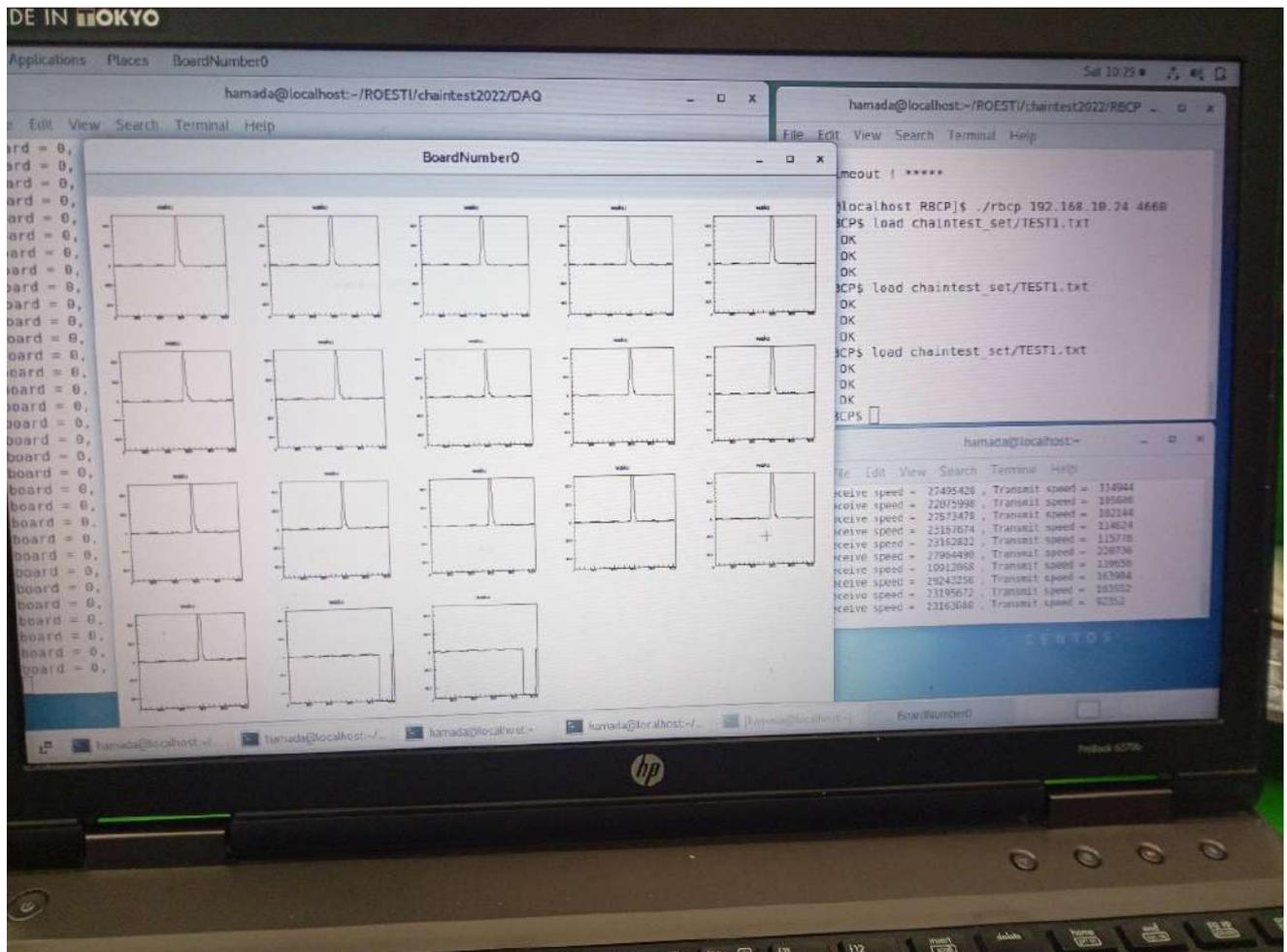


Рисунок 3.32 — Гистограммы форм сигналов одного события считанные с платы EROS

Испытания показали, что алгоритм кластеризации функционирует корректно, а данные, поступившие с плат предварительной электроники в оцифровывающую плату, успешно передаются в ССД при запуске процедуры чтения системой первичного триггера.

3.7 Измерение времени принятия решения и задержки выработки триггерного сигнала электромагнитного калориметра

Одними из важнейших требований, предъявляемых к разрабатываемой электронике, является эффективность регистрации полезных событий, подавление фоновых событий, а так же задержка по времени прихода сигнала триггера в оцифровывающую электронику.

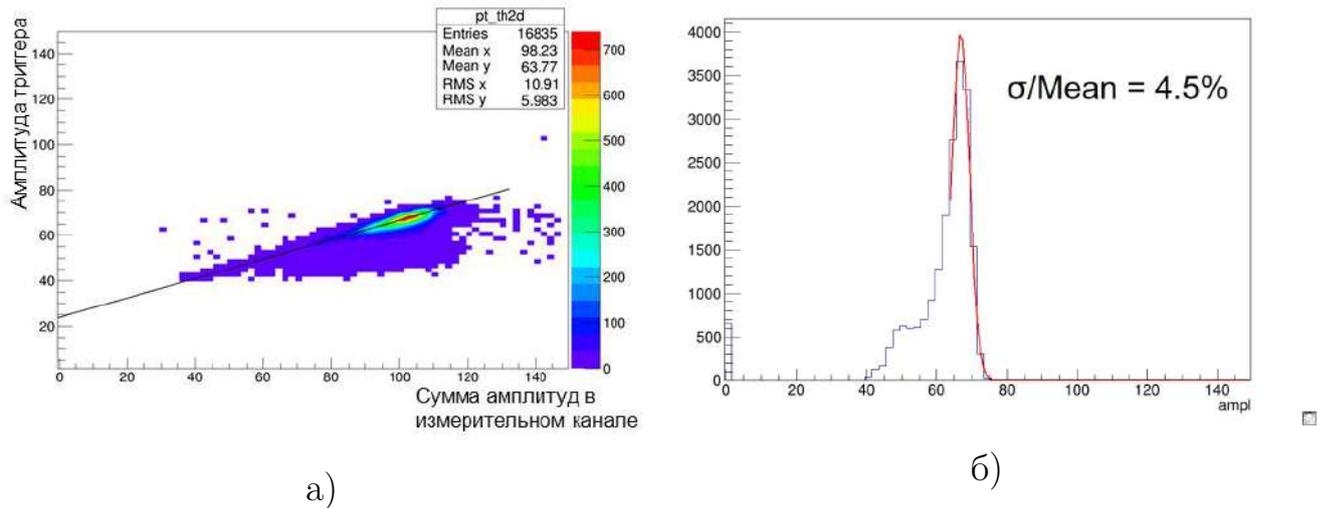


Рисунок 3.33 — а) график линейности каналов первичного триггера; б) распределение измеренных амплитуд в каналах АЦП за вычетом пьедестала

Поэтому были проведены исследования по измерению времени выработки триггерного сигнала и задержки его прихода в оцифровывающие платы электромагнитного калориметра и системы дрейфовых трубок [16].

Для проверки временной задержки прихода триггерного сигнала в блок оцифровки был собран стенд, показанный на рисунке 3.34, и проведена серия испытаний всего триггерного тракта электромагнитного калориметра.

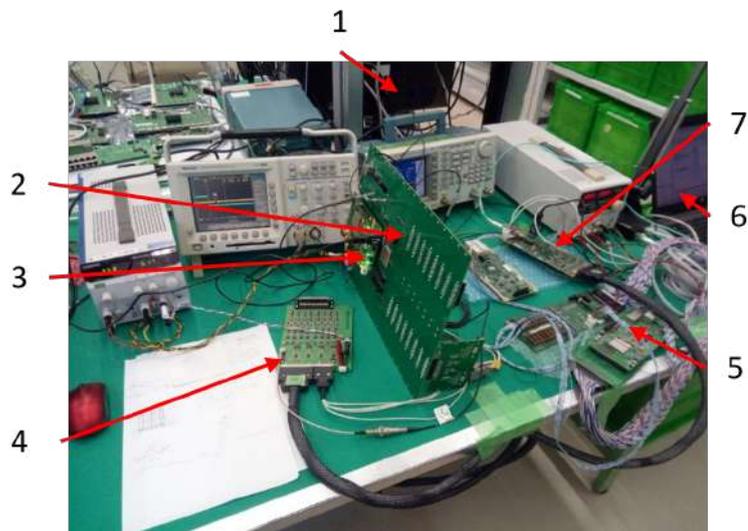


Рисунок 3.34 — Фотография стенда для испытаний первичного триггера электромагнитного калориметра: 1 — МТСА крейт с FC7, 2 — первичный триггер, 3 — плата FCT, 4 — предварительная электроника, 5 — FCT + EROS IF, 6 — ССД, 7 — плата EROS

Блок схема стенда для измерений временных параметров электронного триггерного тракта представлена на рисунке 3.35 [16]. Предполагаемые оценоч-

ные значения временных задержек электронного тракта электромагнитного калориметра показаны в таблице 3.2.

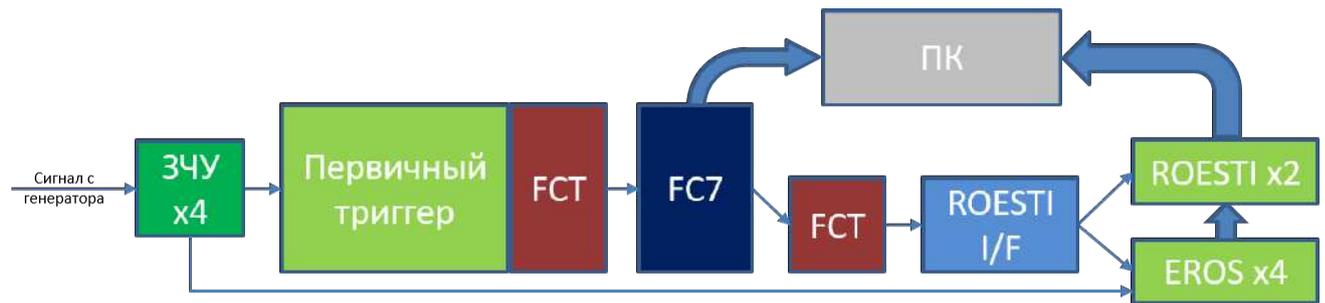


Рисунок 3.35 — Функциональная блок-схема аппаратуры для измерений времени принятия решения и задержки выработки триггерного сигнала

Таблица 3.2 — Предполагаемые оценочные значения временных задержек триггерных сигналов калориметра

Источник задержки		Такт, 25 нс	Время, нс	Общее время, нс
ECAL	Задержка АЦП	8	200	200
	Передача сигнала АЦП-ПЛИС	1	25	225
	Время нарастания сигнала	4	100	325
	Алгоритм кластеризации	4	100	425
Общее	Передача сигнала триггера в FC7	4	100	525
	Решение центрального триггера	1	25	550
	Передача решения платы EROS/ROESTI	4	100	650
	Обработка решения центрального триггера	1	25	675
Итого		27	675	

В качестве источника сигналов использовался генератор произвольных импульсов AFG3102 фирмы Tektronix. Сигнал с генератора подавался на калибровочный вход плат предварительной электроники электромагнитного калориметра, где усиливался и передавался по двум линиям:

- по одной сигнал передавался в оцифровывающие платы EROS;
- по другой линии сигналы передавались на вход системы первичного триггера, где происходило согласование уровней по напряжению между платами предварительной электроники и оцифровывающими платами первичного триггера для дальнейшей дискретизации с помощью АЦП.

Дискретизованные 8-ми битные значения сигналов в последовательном виде уровня LVDS поступали в ПЛИС первичного триггера, расположенную на материнской плате, где затем происходила обработка оцифрованных данных по шагам, описанным в подпараграфах 3.3.2 и 3.5.2.

Исходя из предъявляемых к триггерной системе требований, обусловленных структурой и режимом работы плат EROS/ROESTI, описанных в параграфе 2.1, общее время от момента события до прихода в оцифровывающую электронику должно быть не более 900 нс.

Первичные результаты испытаний показали несостоятельность триггерной системы. Было установлено, что полное время, затрачиваемое на передачу триггерного решения от момента события до поступления в оцифровывающую электронику, больше времени перезаписи информации в циклической памяти EROS, и составляет 1.6 мкс, как показано на рисунке 3.36.

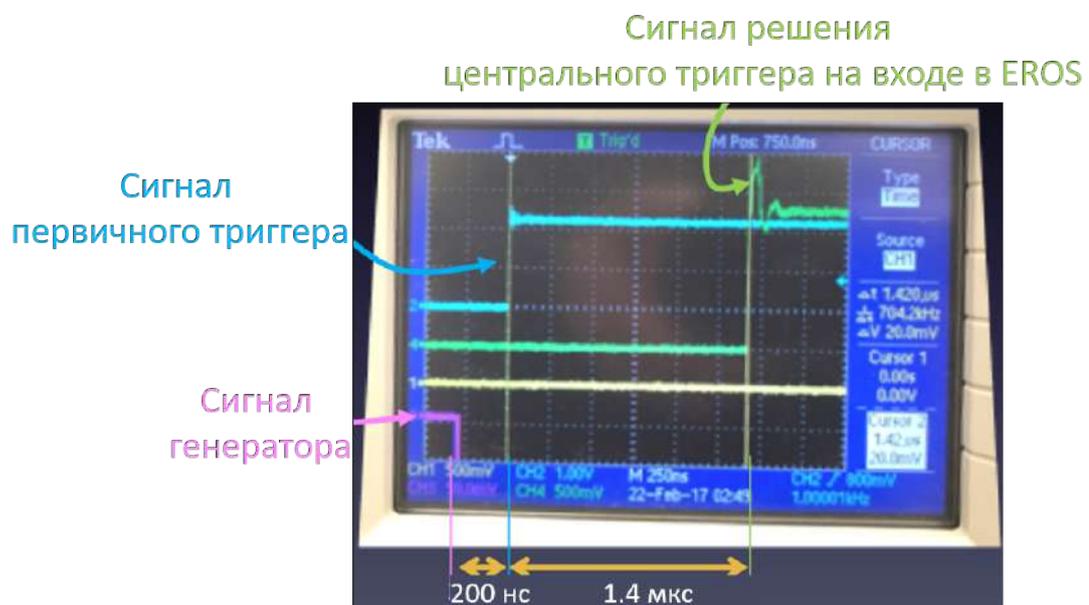


Рисунок 3.36 — Фотография осциллограммы сигналов в ключевых точках электроники промежуточных испытаний первичного триггера электромагнитного калориметра

Логика алгоритма первичного триггера (голубой сигнал) обрабатывает достаточно быстро — примерно за 200 нс относительно тестового импульса (ро-

зовый сигнал) с учетом времени, затраченного на распространение аналогового сигнала и оцифровку. Время, затраченное на передачу решения первичного триггера (зеленый сигнал), выходит за отведенные рамки, так что полная задержка, от момента события до прихода в оцифровывающую электронику сигнала центрального триггера составляет почти в 2 раза больше требуемого (3.1).

Поэтому была предложена модель двойного триггера: система первичного триггера вырабатывала “быстрый” сигнал-признак срабатывания для оцифровывающей электроники и передавала его через плату триггерного коммутатора непосредственно в платы оцифровки с целью остановки записи в циклическую память плат EROS/ROESTI. Триггерная информация передавалась через интерфейсную плату (FCT) из платы первичного триггера в центральный триггер (FC7) для выработки решения и номера события. Выработанное решение с номером события передавалось из платы центрального триггера (FC7) через интерфейсную плату (FCT) в интерфейсную плату EROS, а затем и в сами платы EROS.

По результатам испытаний были приняты решения о следующих модернизациях:

- добавление в алгоритм модели двойного триггера.
- для уменьшения времени работы первичного триггера был заменен первоначально выбранный тип АЦП в оцифровывающей электронике первичного триггера с AD9212 на AD9287, общая задержка уменьшилась на 100 нс;
- для уменьшения времени, затрачиваемого на передачу триггерных сигналов, был заменен алгоритм передачи данных между интерфейсными платами (FCT) и центральным триггером (FC7), с GBT на MGT, общая задержка уменьшилась на 500 нс.

Итоговая временная диаграмма электронного тракта электромагнитного калориметра показана на рисунке 3.37. Модернизированная блок-схема электронного тракта электромагнитного калориметра представлена на рисунке 3.38. На рисунке 3.39 [16] представлена осциллограмма сигналов в ключевых точках модернизированного электронного тракта электромагнитного калориметра [16]:

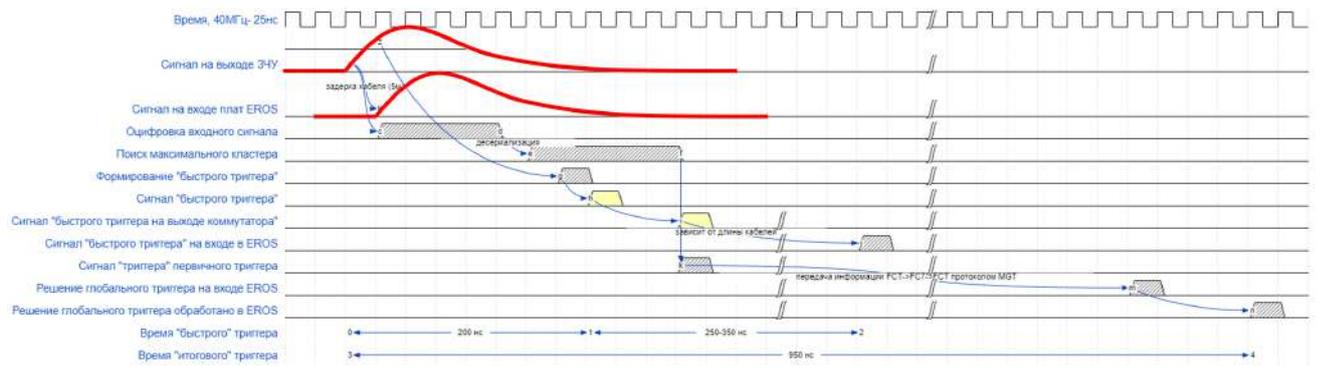


Рисунок 3.37 — Итоговая временная диаграмма электронного тракта электромагнитного калориметра

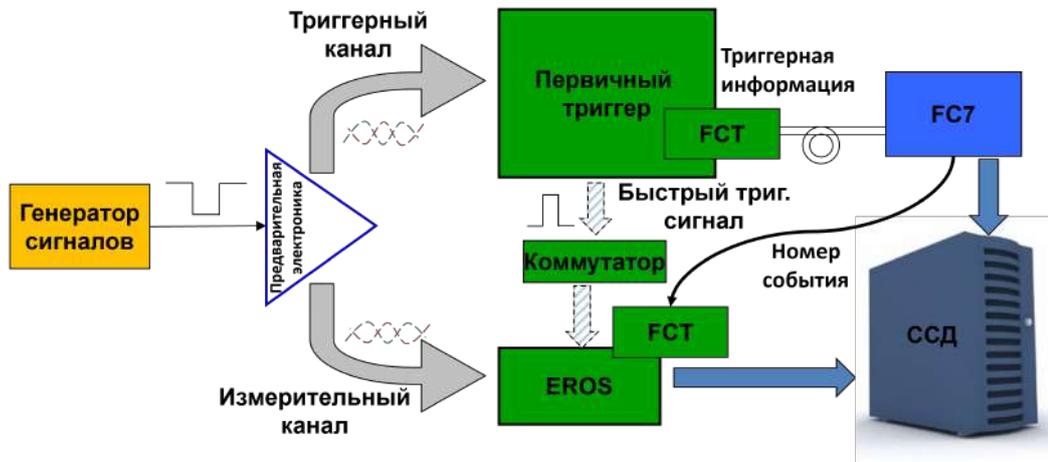


Рисунок 3.38 — Модернизированная блок-схема электромагнитного калориметра

- зеленым цветом показан сигнал генератора, который подавался на вход платы предварительной электроники и взят за начало отсчета временных измерений;
- розовым цветом показан сформированный сигнал “быстрого” триггера, который передается непосредственно на интерфейсные платы EROS/ROESTI через преобразователь уровня;
- желтым цветом показан сигнал остановки записи в циклическую память платы EROS;
- голубым цветом сигнал глобального триггера на входе в плату EROS.

Данные, поступившие в оцифровывающую плату от предварительной электроники, были успешно вычитаны в ССД. На рисунке 3.40 приведено изображение программного обеспечения системы сбора данных, MIDAS, с набранными гистограммами с одной платы оцифровщика EROS: 16 оцифрованных каналов данных и 2 триггерных канала.

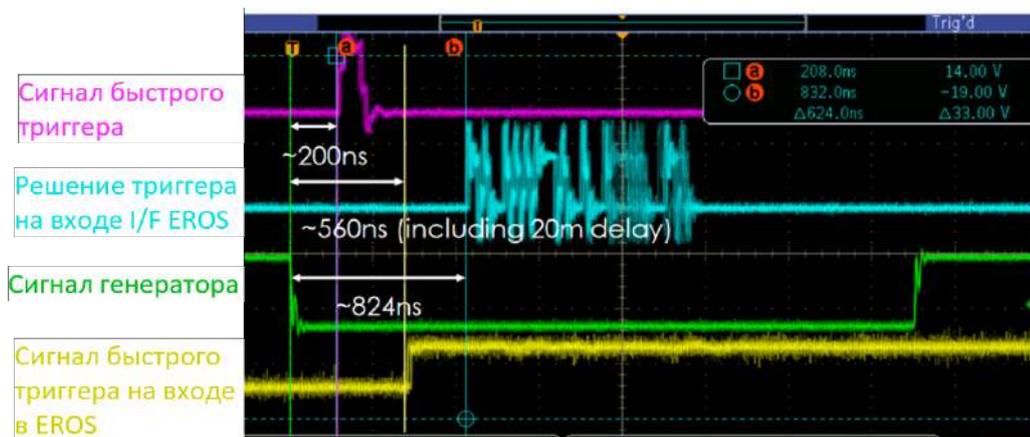


Рисунок 3.39 — Осциллограмма сигналов в ключевых точках электронного тракта электромагнитного калориметра

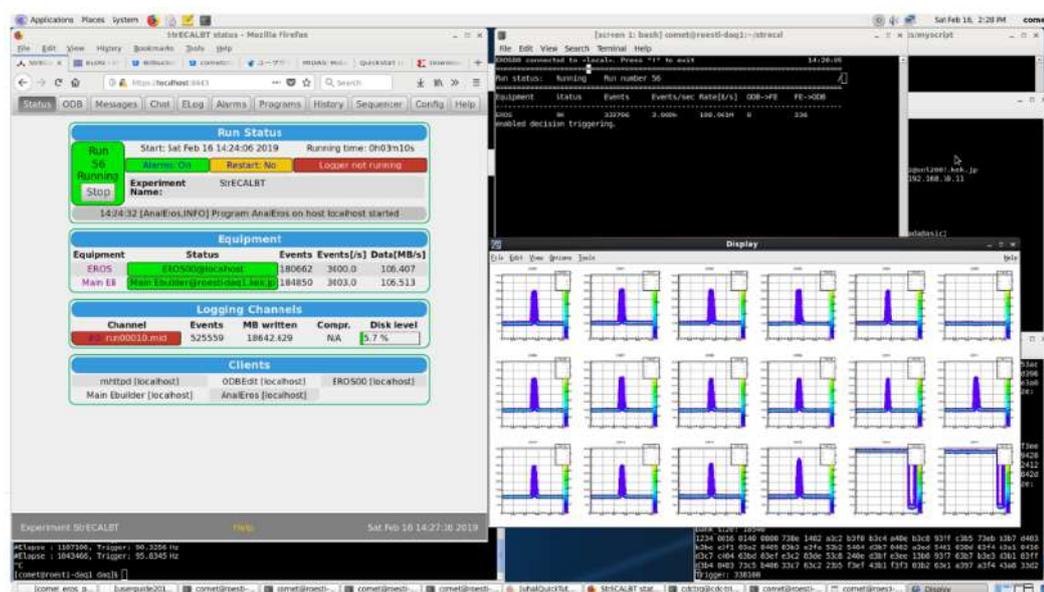


Рисунок 3.40 — Программное обеспечение системы сбора данных, MIDAS, с набранными гистограммами с одной платы оцифровщика EROS

По результатам всех испытаний и обсуждений схема и алгоритм первичного триггера электромагнитного калориметра, с внесенными изменениями, были утверждены коллаборацией для использования на Этапе-I и Этапе-II эксперимента COMET.

3.8 Результаты измерений

Созданная система первичного триггера апробирована в серии тестов при различных условиях в соответствии с разработанными методиками регистрации и обработки сигналов с калориметрической системы на стенде (ИЯФ СО РАН, Россия и КЕК/J-PARC, Япония) и выведенном пучке электронов (Сендай, Япония).

Полученное при экспериментальном испытании на выведенном пучке электронов энергетическое разрешение лучше 5% при энергии частиц около 105 МэВ. А разработанный алгоритм обработки данных конвейерного типа (без “мертвого” времени) учитывает как статистические флуктуации развития электромагнитного ливня в кристаллах калориметра, так и большую фоновую загрузку, то есть оперирует группами кристаллов.

Благодаря предложенной модели двойного триггера и принятым решениям о модернизации, задержка от момента события до прихода сигнала запуска чтения данных от центрального триггера не превышает 900 нс. В составе общей системы предельная частота работы электроники первичного триггера достигает нескольких десятков килогерц. Основное ограничение по частоте связано со временем считывания данных одного события из измерительной электроники. Для чтения данных и удаленного управления электроникой имеется возможность использования Ethernet (Raw/UDP).

В результате проделанной работы установлено, что устойчивая работа разработанной системы возможна в зоне повышенного радиационного излучения на уровне $\sim 10^{12}$ нейтронов/см² и поглощенной дозы гамма-квантов ~ 2 кГр с учетом фактора безопасности 10.

На текущий момент изготовлено 2 полных комплекта триггерной электроники для Этапа-I — 32 платы оцифровщиков и 2 материнские платы. Оба комплекта триггерной электроники вместе с конструктивом крейта находятся в J-PARC, Япония, и ожидают начала эксперимента.

Заключение

Данная работа посвящена созданию электроники, разработке алгоритма кластеризации и испытаниям первичного триггера электромагнитного калориметра эксперимента СОМЕТ. Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Создана электроника системы первичного триггера, представляющая собой единый набор электронных модулей и блоков в формате крейта евромеханики, выполняющая все требуемые функции по аналоговой и цифровой обработке сигналов калориметра и выработке логических сигналов для центрального триггера, и удовлетворяющая физическим и техническим требованиям по энергетическому разрешению, временным параметрам и радиационной стойкости. Прототипы и финальная версия электроники были успешно протестированы на стенде.
2. Разработан алгоритм логики первичного триггера по поиску кластеров. Алгоритм был протестирован на стенде и на выведенном пучке электронов. Результаты тестирования показали, что алгоритм работает корректно. Эффективность вычислялась из соотношения количеств событий зарегистрированных внешней системой и событий зарегистрированных триггерной системой калориметра. Общая эффективность при энергии более 30 МэВ составила 99.4 %, при энергии более 40 МэВ составила 99.7%. На выведенном пучке электронов было получено энергетическое разрешение триггерной системы по записанным заходам около 4.5 % при энергии пучка электронов 105 МэВ.
3. Разработаны методики наладки и тестирования электроники на стенде и создано соответствующее программное обеспечение. Все модули и блоки электроники отлажены и проверены для использования в эксперименте. Разработаны методики контроля и оперативного управления электроникой в эксперименте.

В перспективе результаты работы могут быть использованы для разработки триггерных систем на основе алгоритмов кластеризации для современных электромагнитных калориметров для проведения фундаментальных экспериментальных исследований по физике элементарных частиц и атомного ядра.

В заключение автор считает своим приятным долгом выразить искреннюю благодарность своему научному руководителю Григорьеву Дмитрию Николаевичу, а также старшему научному сотруднику Института Ядерной Физики им. Г.И. Будкера, Юдину Юрию Валерьевичу, за постоянное внимание и активную помощь в работе. Глубоко признателен руководителю эксперимента Ёшитаке Куно и профессору Сатоше Михара за большое внимание к этой работе. Отдельно хочу поблагодарить Шелкового Дмитрия Викторовича из Института физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси за помощь с моделированием алгоритма первичной триггерной системы и анализ полученных с тестов данных. Также выражаю свою благодарность руководителю группы триггерной системы эксперимента СОМЕТ, научному сотруднику Университета Сонгюнкван, Южная Корея, Мюнджею Ли за полезные обсуждения и советы в разработке системы первичного триггера электромагнитного калориметра. Большую помощь при выполнении работы оказали Р.Р. Ахметшин и В.Ф. Казанин из Института Ядерной Физики СО РАН, которые участвовали в работах по сборке первого прототипа калориметра и обработке полученных с тестов данных. Хотелось бы поблагодарить всех участников коллаборации СОМЕТ, коллективный труд которых сделал возможным осуществление этой работы.

В завершении хочу выразить благодарность моей жене Анастасии, сыну Вениамину и дочери Мирославе за понимание, терпение и поддержку при написании данной работы.

Список литературы

- [1] Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC / G. Aad, T. Abajyan, B. Abbott, [et al.] // Текст: электронный // Physics Letters B. — 2012. — Vol. 716, no. 1. — P. 1—29. — URL: <https://dx.doi.org/10.1016/j.physletb.2012.08.020>. — Дата публикации: 14.08.2012.
- [2] New limit on the $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ decay with the MEG II experiment / K. Afanaciev, A. M. Baldini, S. Ban, [et al.] // Текст: электронный // Eur. Phys. J. C. — 2025. — Vol. 85. — URL: <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-025-14906-3>. — Дата публикации: 21.11.2025.
- [3] *Kuno, Y.* A search for muon-to-electron conversion at J-PARC: the COMET experiment / Y. Kuno // Текст: электронный // Prog. Theor. Exp. Phys. — 2013. — Vol. 2013, no. 2. — P. 022C01. — URL: <https://doi.org/10.1093/ptep/pts089>. — Дата публикации: 04.02.2013.
- [4] Technical design of the phase I Mu3e experiment / K. Arndt, H. Augustin, P. Baesso, [et al.] // Текст: электронный // NIM A. — 2021. — Vol. 1014. — P. 165679. — URL: <https://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2021.165679>. — Дата публикации: 05.08.2021.
- [5] A Search for muon to electron conversion in muonic gold / W. H. Bertl, R. Engfer, E. Hermes, [et al.] // Текст: электронный // Eur. Phys. J. C. — 2006. — Vol. 47. — P. 337—346. — URL: <https://dx.doi.org/10.1140/epjc/s2006-02582-x>. — Дата публикации : 30.05.2006.
- [6] *Bernstein, R. H.* The Mu2e Experiment / R. H. Bernstein // Текст: электронный // Front. Phys. — 2019. — Vol. 7. — P. 1. — URL: <https://dx.doi.org/10.3389/fphy.2019.00001>. — Дата публикации: 28.01.2019.
- [7] Probing lepton flavour violation via neutrinoless $\tau \rightarrow 3\mu$ decays with the ATLAS detector / G. Aad, B. Abbott, J. Abdallah, [et al.] // Текст: электронный // Eur. Phys. J. C. — 2016. — Vol. 76, no. 5. — P. 232. — URL: <https://dx.doi.org/10.1140/epjc/s10052-016-4041-9>. — Дата публикации: 26.04.2016.

- [8] Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC) : [Сайт] // Текст: электронный. — URL: <http://j-parc.jp/c/en/index.html> (дата обр. 01.11.2024).
- [9] *Wong, M. L.* Overview of the COMET Phase-I experiment / M. L. Wong // Текст: электронный // PoS. — 2015. — Vol. FPCP2015. — P. 59—63. — URL: <https://dx.doi.org/10.22323/1.248.0059>. — Дата публикации: 22.01.2016.
- [10] *Kurup, A.* COMET Phase II / A. Kurup // Текст: электронный // PoS. — 2015. — Vol. NUFACT2014. — P. 101—108. — URL: <https://dx.doi.org/10.22323/1.226.0101>. — Дата публикации: 21.06.2015.
- [11] COMET Phase-I technical design report / L. Epshteyn, R. Abramishvili, G. Adamov, [et al.] // Текст: электронный // Progress of Theoretical and Experimental Physics. — 2020. — Vol. 2020, no. 3. — P. 033C01. — URL: <https://doi.org/10.1093/ptep/ptz125>. — Дата публикации: 13.03.2020.
- [12] *Юдин, Ю.* Канал усиления лавинных фотодиодов для спектрометрических измерений при высокой пиковой нагрузке. / Ю. Юдин, Д. Григорьев, Л. Эпштейн // Текст: электронный // Автометрия. — 2018. — Т. 54, № 2. — С. 113—117. — URL: https://sibran.ru/journals/issue.php?ID=173038&ARTICLE_ID=173050. — Дата публикации: 04.2018.
- [13] Анализ данных электромагнитного калориметра эксперимента COMET в режиме реального времени. / Л. Эпштейн, Р. Ахметшин, Д. Григорьев [и др.] // Текст: электронный // Сибирский физический журнал. Серия: Физика высоких энергий, ускорителей и высокотемпературной плазмы. — 2017. — Т. 12, № 4. — С. 5—13. — URL: <https://doi.org/10.25205/2541-9447-2017-12-4-5-13>. — Дата публикации: 12.2017.
- [14] Система предварительного отбора событий электромагнитного калориметра эксперимента COMET. / Л. Эпштейн, Д. Шёлковый, Д. Григорьев, Ю. Юдин // Текст: электронный // Известия НАН Беларуси. Серия физико-математических наук. — 2019. — Т. 56, № 1. — С. 97—109. — URL: <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2019-55-1-97-109>. — Дата публикации: 2019.

- [15] *Epshteyn, L. B.* Study of the COMET experiment / L. B. Epshteyn, D. N. Grigoriev, D. V. Shoukavy // Текст: электронный // Moscow University Physics Bulletin. — 2025. — Vol. 79, S1. — P. 1—7. — URL: <https://doi.org/10.3103/S002713492470067X>. — Дата публикации: 20.02.2025.
- [16] *Эпштейн, Л.* Система первичного триггера электромагнитного калориметра эксперимента COMET / Л. Эпштейн, Д. Григорьев, Д. Шёлковый // Текст: электронный // Журнал технической физики. — 2025. — Т. 95, № 11. — С. 2256—2264. — URL: <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/61610>. — Дата публикации: 21.10.2025.
- [17] The level-1 trigger system for the electromagnetic calorimeter of the COMET experiment / L. Epshteyn, R. Akhmetshin, D. Grigogiev, [et al.] // Текст: электронный // Journal of Instrumentation. — 2017. — Vol. 12, no. 01. — P. C01064. — URL: <https://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/12/01/C01064>. — Дата публикации: 23.01.2017.
- [18] The electronics for the electron calorimeter of the COMET experiment / L. Epshteyn, R. Akhmetshin, D. Grigogiev, D. Shoukovy, Y. Yudin // Текст: электронный. — 2018. — URL: <https://dx.doi.org/10.1109/NSSMIC.2018.8824666>. — Дата публикации: 05.09.2019.
- [19] *Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ.* Программное обеспечение для триггерной системы электронного калориметра эксперимента COMET. / Л. Эпштейн ; ИЯФ СО РАН // Текст: электронный, — №2023616419 (Рос. Федерация). — URL: <https://fips.ru/EGD/642562ef-dca4-4f7a-8e58-f19aa8608d7e> (дата обр. 16.12.2024).
- [20] *Czarnecki, A.* Muon decay in orbit: spectrum of high-energy electrons / A. Czarnecki, X. Garcia i Tormo, W. J. Marciano // Текст: электронный // Phys. Rev. D. — 2011. — Vol. 84. — P. 013006. — URL: <https://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.84.013006>. — Дата публикации: 14.06.2011.
- [21] *Lee, M.* COMET muon conversion experiment in J-PARC / M. Lee // Текст: электронный // PoS. — 2018. — Vol. NuFact2017. — P. 107. — URL: <https://doi.org/10.22323/1.295.0107>. — Дата публикации: 18.06.2018.

- [22] *Wong, T. S.* Study of Negative Muon to Positron conversion in the COMET Phase-I experiment : PhD thesis / Wong Ting Sam // Текст: электронный. — Osaka University, 2020. — P. 126. — URL: <https://hdl.handle.net/11094/76361>. — Дата публикации: 25.03.2020.
- [23] *Yeo, B.* GPU-accelerated event reconstruction for the COMET Phase-I experiment / B. Yeo, M. Lee, Y. Kuno // Текст: электронный // Computer Physics Communications. — 2020. — Vol. 258. — P. 107606. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2020.107606>. — Дата публикации: 09.09.2020.
- [24] *Edmonds, A. W. J.* An Estimate of the Hadron Production Uncertainty and a Measurement of the Rate of Proton Emission after Nuclear Muon Capture for the COMET Experiment : PhD thesis / Edmonds Andrew William John // Текст: электронный. — UCL (University College London), 2015. — P. 152. — URL: <https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/1468926>. — Дата публикации: 28.05.2015.
- [25] *Knecht, A.* Study of nuclear properties with muonic atoms / A. Knecht, A. Skawran, S. Vogiatzi // Текст: электронный // The European Physical Journal Plus. — 2020. — Vol. 135. — P. 777. — URL: <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-020-00777-y>. — Дата публикации: 10.2020.
- [26] *Kalinnikov, V.* Investigation of LYSO and GSO crystals and simulation of the calorimeter for comet experiment / V. Kalinnikov, E. Velicheva // Текст: электронный // Phys. Part. Nuclei Lett. — 2014. — Vol. 11. — P. 259—268. — URL: <https://doi.org/10.1134/S154747711403011X>. — Дата публикации: 16.05.2014.
- [27] Описание лавинных фотодиодов, APD S8664-1010 : [Сайт] // Текст: электронный. — URL: <https://www.hamamatsu.com/us/en/product/optical-sensors/apd/si-apd/S8664-1010.html> (дата обр. 01.11.2024).
- [28] *Шёлковий, Д.* Метод разделения событий с наложением сигналов. / Д. Шёлковий, Д. Григорьев, Д. Василевская // Текст: электронный // Известия НАН Беларуси. Серия физико-математических наук. — 2021. — Т. 57, № 4. — С. 470—478. — URL: <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2021-57-4-470-478>. — Дата публикации: 2021.

- [29] *Oishi, K.* Study of Sensitivity to Search for a Charged Lepton Flavor Violating Process : PhD thesis / Oishi Kou // Текст: электронный. — Kyushu University, 2020. — P. 152. — URL: <https://hdl.handle.net/2324/4474936>. — Дата публикации: 03.03.2020.
- [30] Design of Radiation Tolerant Electronics for StrECal System in COMET Experiment / K. Ueno, E. Hamada, M. Ikeno, [et al.] // Текст: электронный // PoS. — 2020. — Vol. EPS—HEP2019. — P. 175. — URL: <https://dx.doi.org/10.22323/1.364.0175>. — Дата публикации: 12.11.2020.
- [31] *Ritt, S.* The DRS chip: Cheap waveform digitizing in the GHz range. / S. Ritt // Текст: электронный // Nucl. Instr. Meth. A. — 2004. — Vol. 470, no. 1/2. — P. 1—29. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2003.11.059>. — Дата публикации: 26.02.2004.
- [32] The FC7 AMC for generic DAQ & control applications in CMS / M. Pesaresi, M. Barros Marin, G. Hall, [et al.] // Текст: электронный // JINST. — 2015. — Vol. 10, no. 03. — P. C03036. — URL: <https://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/10/03/C03036>. — Дата публикации: 23.03.2015.
- [33] 7 Series FPGAs GTP Transceivers, User Guide (UG482) : [Сайт] // Текст: электронный. — 2023. — URL: https://docs.amd.com/v/u/en-US/ug482_7Series_GTP_Transceivers (дата обр. 01.11.2024).
- [34] *Ritt, S.* MIDAS: Maximum Integrated Data Acquisition System. / S. Ritt, P. Amaudruz, K. Olchanski // Текст: электронный. — 2001. — URL: https://daq00.triumf.ca/MidasWiki/index.php/Main_Page (дата обр. 01.11.2024).
- [35] Radiation Tolerance Table : [Сайт] // Текст: электронный. — URL: <https://docs.google.com/spreadsheets/d/1jczW8kDEuIZwDT0eYSAT0ndP-VTrqGVdpYdglL7x27I/edit%5C#gid=1703465822> (дата обр. 01.11.2024).
- [36] Описание АЦП AD9212 компании Analog Device : [Сайт] // Текст: электронный. — URL: <https://www.analog.com/en/products/ad9212.html> (дата обр. 01.11.2024).
- [37] Описание АЦП AD9287 компании Analog Device : [Сайт] // Текст: электронный. — URL: <https://www.analog.com/en/products/ad9287.html> (дата обр. 01.11.2024).

- [38] Описание АЦП ADS5277 компании Texas Instruments : [Сайт] // Текст: электронный. — URL: <https://www.ti.com/product/ADS5277> (дата обр. 01.11.2024).
- [39] ПЛИС фирмы AMD серии Virtex-4 : [Сайт] // Текст: электронный. — URL: <https://docs.amd.com/v/u/en-US/ds112> (дата обр. 01.11.2024).
- [40] IEEE Standard VHDL Language Reference Manual : [Сайт] // Текст: электронный. — URL: <https://dx.doi.org/10.1109/IEEESTD.1992.101084> (дата обр. 01.11.2024).
- [41] Описание библиотечных функций ПЛИС Virtex-4 : [Сайт] // Текст: электронный. — URL: https://docs.amd.com/v/u/en-US/virtex4_hdl (дата обр. 01.11.2024).
- [42] Radiation tolerance of straw-tracker read-out system for COMET experiment / K. Ueno, E. Hamada, M. Ikeno, [et al.] // Текст: электронный // 2016 IEEE NSS/MIC/RTSD, Strasbourg, France. — 2016. — P. 1—5. — URL: <https://dx.doi.org/10.1109/NSSMIC.2016.8069866>. — Дата публикации: 19.10.2017.
- [43] Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.02 / T. Sato, S. Iwamoto Y. Hashimoto, [et al.] // Текст: электронный // J. Nucl. Sci. Technol. — 2018. — Vol. 55. — P. 684—690. — URL: <https://dx.doi.org/10.1080/00223131.2017.1419890>. — Дата публикации: 05.01.2018.
- [44] Radiation hardness study for the COMET Phase-I electronics / Y. Nakazawa, Y. Fujii, E. Gillies, [et al.] // Текст: электронный // Nucl. Instrum. Meth. A. — 2020. — Vol. 955. — P. 163247. — URL: <https://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2019.163247>. — Дата публикации: 09.12.2019.
- [45] Промышленные ускорители серии ЭЛВ : [Сайт] // Текст: электронный. — URL: <https://www.inp.nsk.su/sites/promusk/#rec146457648> (дата обр. 01.11.2024).
- [46] Tandem Electrostatic Accelerator : [Сайт] // Текст: электронный. — URL: https://www.research.kobe-u.ac.jp/fmsc-pbe/www/5sdh2/5sdh2_e.html (дата обр. 01.11.2024).

- [47] Tohoku University, Research Center for Electron Photon Science : [Сайт] // Текст: электронный. — URL: <https://www.raris.tohoku.ac.jp/> (дата обр. 01.11.2024).

Приложение А

Форматы данных электроники

А.1 Формат данных FC7

Выходные данные быстрого управления состоят из: 14 бит быстрого контроля, 32 бит номера события, 32 бит управляющих данных FCT, 4 бит команды управления FCT и 2 запасных бит. Входные данные быстрого управления состоят из 4 бит флагов состояния, 16 бит данных состояния FCT и 64 бит данных запуска.

Таблица А.1 — Описание передаваемых данных быстрого контроля: входящие и исходящие данные для платы FC7 от подсистем

Направление	Название	Кол-во бит в GBT
Исходящие	Быстрый контроль	14
	Номер события	32
	Данные управления FCT	32
	Команда управления FCT	4
	(Запасной)	2
	Всего исходящих	84
Входящие	Статусные флаги	4
	Управление и статус FCT	16
	Триггерные данные	64
	Всего входящих	84

А.2 Формат данных FCT

Платы FCT обеспечивают интерфейс передачи необходимых сигналов для каждой конкретной подсистемы детектора: передают частоту синхронизации и управляют всей считывающей электроникой каждой подсистемы, а также “собирают” любые сигналы “занят”, когда это необходимо, чтобы предотвратить выработку сигналов запуска чтения данных в этот момент. Несколько интерфейсных плат подключаются к модулям первичного триггера и используются также для передачи данных о появлении предполагаемого полезного события в FC7. Описание сигналов разъема FMC интерфейсной платы в случае подключения к модулям первичного триггера ECAL приведены в Таблице А.2.

Таблица А.2 — Описание передаваемых данных разъема FMC на плате FCT в случае соединения с платой первичного триггера ECAL

Направление	Название	Формат данных	Кол-во бит
Быстрый контроль (Входящие)	Частота 40 МГц	LVDS	1
	Частота 80 МГц	LVDS	1
	Частота 160 МГц	LVDS	1
	Триггерный бит FCT	LVDS	1
	Момент пучка	LVDS	1
	Сигнальное окно	LVDS	1
	Предпучковый момент	LVDS	1
	SpillWindow	LVDS	1
	Занят	LVDS	1
	Сброс	LVDS	1
	Временной импульс	LVDS	6
Сигналы первичного триггера (Исходящие)	ID платы	Однополярный	6
	Статус	LVDS	4
	Подключение по FMC	Однополярный	1
	Триггерные данные	LVDS	64

А.3 Формат передаваемых данных из платы первичного триггера

Из плат первичного триггера в FC7 через FCT для выработки финального решения триггера передаются данные представленные в Таблице А.3.

Таблица А.3 — Триггерные данные, передаваемые из первичного триггера электромагнитного калориметра в центральный триггер

Назначение	Количество бит
Энергия кластера	8
Номер сработавшей триггерной группы	4
Количество ячеек с энергией $E < 30$ МэВ	4
Количество ячеек с энергией $30 < E < 60$ МэВ	4
Количество ячеек с энергией $60 < E < 80$ МэВ	4
Количество ячеек с энергией $80 < E < 90$ МэВ	4
Количество ячеек с энергией $90 < E < 95$ МэВ	4
Количество ячеек с энергией $95 < E < 100$ МэВ	4
Количество ячеек с энергией $100 < E < 104$ МэВ	4
Количество ячеек с энергией $104 < E < 106$ МэВ	4
Количество ячеек с энергией $106 < E < 110$ МэВ	4
Количество ячеек с энергией $110 < E < 200$ МэВ	4
Количество ячеек с энергией $E > 200$ МэВ	4
Информация для проверки	8
Всего	64

Приложение Б

Принципиальные схемы электроники

Б.1 Распределитель напряжения ЛФД

Для стабильной работы системы необходимо контролировать и регистрировать высокое напряжение ЛФД. Оптимальные значения высокого напряжения ЛФД варьируются в зависимости от разных параметров, например, от температуры и радиационного поражения. Следовательно, усиление ЛФД должно поддерживаться путем регулировки высокого напряжения. Для этого были разработаны прототипы принципиальной схемы и конструктива блоков контроллера высокого напряжения ЛФД.

Прототип устройства высоковольтного контроллера показан на рисунке Б.1. Модуль контроллера поддерживает 32 канала. Контроллер содержит ряд конденсаторов и сопротивлений для стабилизации высокого напряжения. Значения каждого отдельного канала можно регулировать независимо. Контроллер передает на специальную плату установленные значения напряжения, уменьшенные на постоянный коэффициент.

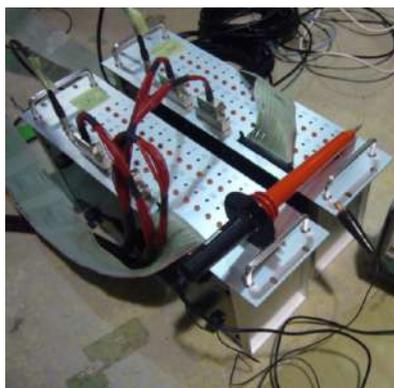


Рисунок Б.1 — Прототип устройства высоковольтного контроллера

Принципиальная схема контроллера-распределителя напряжения ЛФД calorиметра представлена на рисунке Б.2. Изображение печатной платы для контроллера представлено на рисунке Б.3.

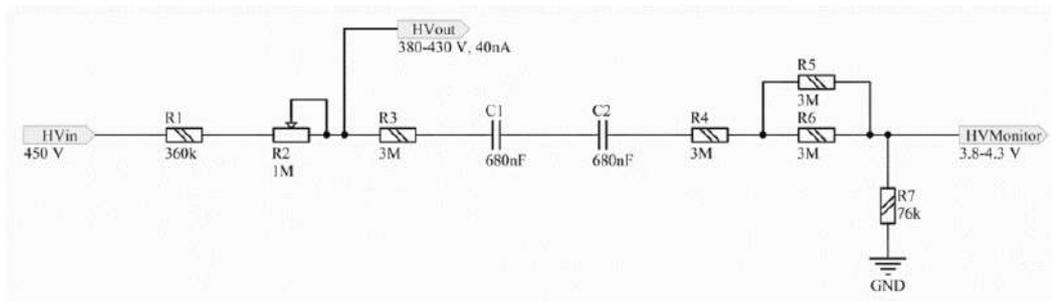


Рисунок Б.2 — Принципиальная схема контроллера-распределителя напряжения ЛФД

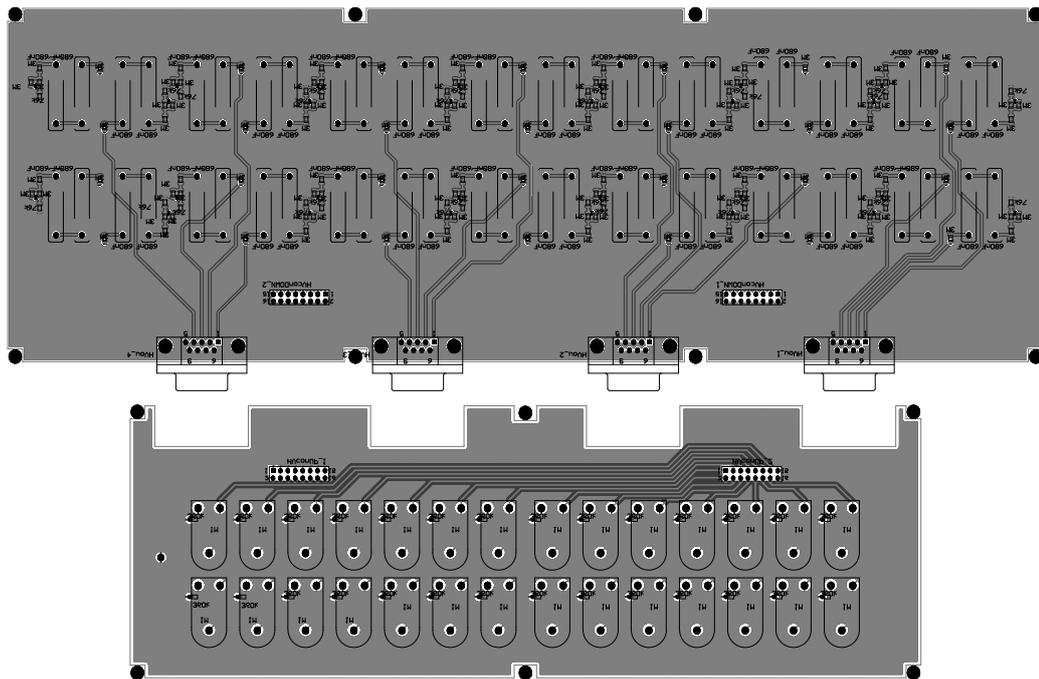


Рисунок Б.3 — Трассировка печатных плат контроллера-распределителя высокого напряжения

Б.2 Принципиальная схема преобразователя сигналов ЗЧУ-EROS

На рисунках Б.4 и Б.5 представлены: схема одного канала прототипа преобразователя для согласования уровней сигналов между платами предварительной электроники и оцифровщиками измерительного канала, расположение деталей на печатной плате прототипа.

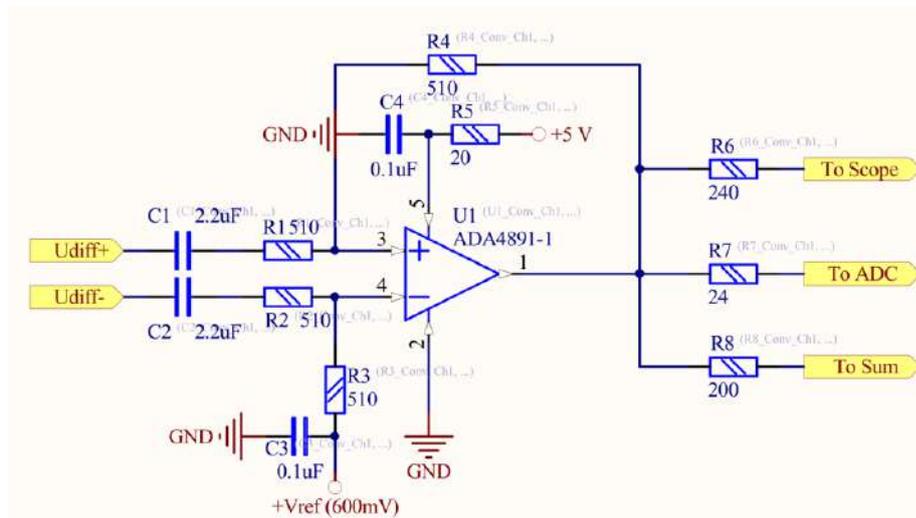


Рисунок Б.4 — Принципиальная схема одного канала преобразователя сигналов ЗЧУ-EROS

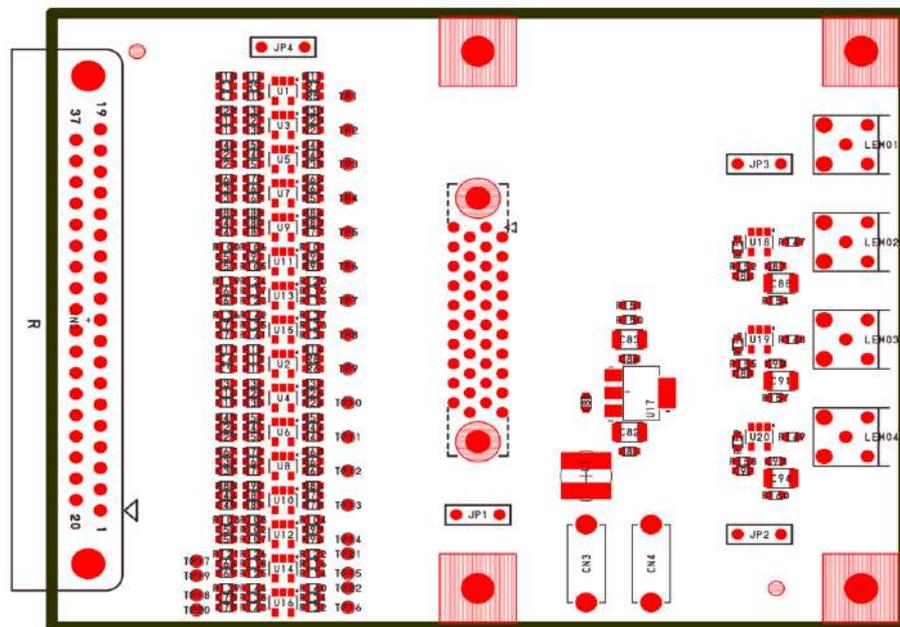


Рисунок Б.5 — Расположение деталей на печатной плате преобразователя сигналов ЗЧУ-EROS

Б.3 Принципиальная схема оцифровывающего канала первичного триггера

На рисунке Б.6 представлена принципиальная схема оцифровывающей платы первичного триггера.

Приложение В

Результаты радиационных испытаний стабилизаторов напряжения и цифровых микросхем на устойчивость к гамма-излучению

Таблица В.1 — Результаты радиационных испытаний стабилизаторов напряжения и цифровых микросхем на устойчивость к гамма-излучению

Тип микросхемы		Интегральная доза, Гр					
		0	50	200	430	2000	3000
Стабилизаторы напряжения							
NCP1117DT-33	+3.3	3.29	3.32	3.36	3.43	3.45	3.38
		3.29	3.32	3.37	3.44	3.47	3.41
		3.29	3.33	3.37	3.44	3.46	3.4
		3.3	3.33	3.37	3.44	3.45	3.38
LT1963AEST-3.3	+3.3	3.27	3.28	3.28	3.30	3.36	3.41
		3.27	3.28	3.29	3.31	3.38	3.43
		3.28	3.28	3.29	3.31	3.38	3.43
		3.28	3.29	3.30	3.32	3.39	3.44
NCP1117DT-25	+2.5	2.51	2.5	2.51	2.53	Вышел из строя	Все чипы вышли из строя
		2.5	2.49	2.5	2.52	2.55	
		2.5	2.49	2.52	2.54	2.55	
NCP1117DT-18	+1.8	1.8	1.82	1.82	1.84	1.9	Все чипы вышли из строя
		1.78	1.81	1.82	1.84	1.87	
		1.79	1.81	1.84	1.85	1.9	
LM337T	-Adj (-2)	-2.02	-2.03	-2.02			
		-2	-2	-2	-2.02	Все чипы вышли из строя	-
		-2	-2	-2	-2		
		-2	-2	-2	-2		
-2	-2	-2	-2				
TPS72301DBV	-Adj (-3.1)	-3.1	-3.1	-3.1			
		-3.12	-3.12	-3.12	Все чипы вышли из строя	-	-
		-3.11	-3.11	-3.11			
		-3.12	-3.12	-3.12			

Продолжение таблицы В.1

Тип микросхемы		Интегральная доза, Гр					
		0	50	200	430	2000	3000
LT1964ES5	-Adj (-3.2)	-3.22	-3.24	-3.3	-3.47 -3.54 -3.51 -3.48	Все чипы вышли из строя	-
		-3.21	-3.24	-3.31			
		-3.19	-3.22	-3.29			
		-3.22	-3.24	-3.3			
Интегральные микросхемы							
EPCS16C8	1шт.	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Вышел из строя
EP4C40F29	1шт.	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok
AD9212	2шт.	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Оба чипа вышли из строя
ADA4932-2	8шт.	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Один ОУ вышел из строя

Приложение Г

Свидетельства и акты

Г.1 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО
о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2023616419

**Программное обеспечение для триггерной системы
электронного калориметра эксперимента СОМЕТ**

Правообладатель: **Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И.
Будкера Сибирского отделения Российской академии
наук (ИЯФ СО РАН) (RU)**

Автор(ы): **Эпштейн Леонид Борисович (RU)**

Заявка № **2023615261**
Дата поступления **21 марта 2023 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **27 марта 2023 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Ю.С. Зубов



ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 62849077614c191024e1b24145d5c7
Идентификатор: **Зубов Ю.С.** Сервис: ИС
Действителен с: 2013.05.22 по 26.05.2033

Г.2 Акт о внедрении программы первичного триггера для ЭВМ



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской
академии наук (ИЯФ СО РАН)

УТВЕРЖДАЮ:
Директор ИЯФ СО РАН
Академик  Логашенко П. В.
« 07 » 03 2023 г.

АКТ №П2023/2
о внедрении программы для ЭВМ

Настоящий Акт составлен в том, что программа для ЭВМ «Программное обеспечение для триггерной системы электронного калориметра эксперимента СОМЕТ»

Автор(ы): Эпштейн Леонид Борисович

Свидетельство о государственной регистрации № 2023616419 от 27.03.2023г.

Заявка № 2023615261, дата приоритета 21.03.2023

Правообладатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера Сибирского отделения Российской академии наук (ИЯФ СО РАН)

внедрена с «21» марта 2023г. в соответствии с рефератом в лаборатории №2 ИЯФ СО РАН при выполнении научно-исследовательской работы по теме № 1.3.3.1.1. «Проверка Стандартной модели в прецизионных экспериментах и редких распадах» в продукте / способе / изделии / в технологическом процессе при производстве продукции: Программа предназначена для настройки параметров устройств, контроль процесса проведения эксперимента и сохранение полученных данных.

Заведующий лабораторией № 2
Начальник ОНИО

 Логашенко И.Б.
 Кузин М.В.

Г.3 Акт о внедрении аппаратуры первичного триггера



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской
академии наук (ИЯФ СО РАН)



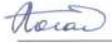
УТВЕРЖДАЮ:
Директор ИЯФ СО РАН
Логачев П. В.
21 марта 2023 г.

АКТ №П2023/1
о внедрении

Настоящий Акт составлен в том, что аппаратура «Первичный триггер электромагнитного калориметра эксперимента СОМЕТ»

Автор(ы): Эпштейн Леонид Борисович

внедрена с «21» марта 2023 г. на «Стенде тестов и испытаний для модернизации детектора КМД-3»

Зам. Директора ИЯФ СО РАН,  Логашенко И.Б., д.-ф.м.н.
Зав. лаб. №2

Начальник ОНИО  Кузин М.В., к.т.н