

## 15 Система первичного триггера электромагнитного калориметра эксперимента COMET

© Л.Б. Эпштейн,<sup>1,2</sup> Д.Н. Григорьев,<sup>1,2</sup> Д.В. Шелковый<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт ядерной физики СО РАН,  
630090 Новосибирск, Россия

<sup>2</sup>Новосибирский государственный технический университет,  
630073 Новосибирск, Россия

<sup>3</sup>Институт физики НАН Беларуси,  
220072 Минск, Белоруссия  
e-mail: L.B.Epshteyn@inp.nsk.su

Поступило в Редакцию 17 марта 2025 г.

В окончательной редакции 14 мая 2025 г.

Принято к публикации 20 мая 2025 г.

Описана система первичного триггера электромагнитного калориметра эксперимента COMET, которая выполняет в режиме реального времени анализ данных калориметра. Проведены экспериментальные измерения на пучке электронов аппаратуры системы первичного триггера с предложенным алгоритмом: общая эффективность при энерговыделении выше 30 MeV составила 99.4 %, выше 40 MeV — 99.7 %, а собственное энергетическое разрешение системы первичного триггера — лучше 5 % при регистрируемых сигнальных событиях (электроны с энергией 105 MeV). Проведены измерения времени выработки триггерного сигнала и задержки его прихода в оцифровывающие платы измерительных каналов.

**Ключевые слова:** триггерная система, триггерный алгоритм, алгоритм кластеризации, цифровая обработка сигналов, электроника.

DOI: 10.61011/JTF.2025.11.61610.38-25

### Введение

Основной задачей эксперимента COMET [1–3] является поиск когерентной конверсии мюона в электрон в области ядра без излучения нейтрино с чувствительностью к единичному событию (ЧЭС)  $\sim 3 \cdot 10^{-17}$ .

Искомый процесс  $\mu^- N \rightarrow e^- N$  является фактически двухчастичным, в котором энергия сигнальных электронов фиксирована. Для используемой в данном эксперименте алюминиевой мишени энергия сигнальных электронов равна:

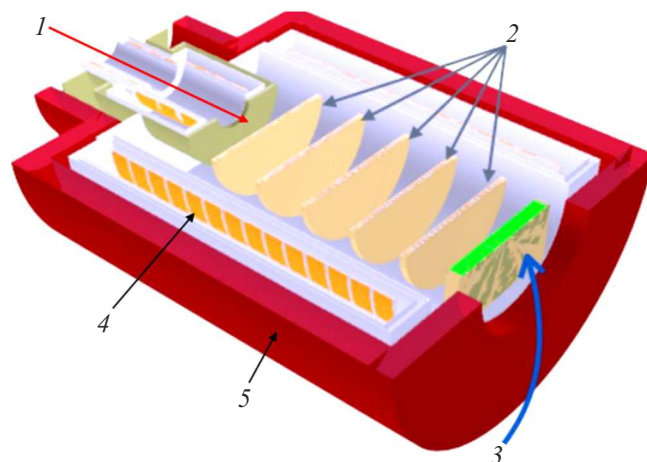
$$E_{\mu-e} = (m_{\mu} - B_{\mu} - E_{recoil}) = 104.97 \text{ MeV},$$

где  $m_{\mu}$  — масса мюона,  $B_{\mu}$  — энергия связи мюонного атома в 1S-состоянии, зависящая от материала,  $E_{recoil}$  — энергия отдачи ядра.

Детектор эксперимента COMET (рис. 1) состоит из координатной системы на основе дрейфовых трубок 2 и электромагнитного калориметра, состоящего из сцинтилляционных кристаллов 3, помещенных в продольное магнитное поле сверхпроводящего соленоида 4. Система дрейфовых трубок предназначена для точного измерения импульса, которое используется для отделения сигнальных событий с фиксированным импульсом от фоновых с непрерывным импульсным распределением. Дополнительно с помощью информации об удельных потерях энергии ( $dE/dx$ ), полученной с системы дрейфовых трубок, совместно с информацией об отношении

энергии кластера в электромагнитном калориметре, ассоциированного с треком, к импульсу этого трека ( $E/p$ ), предоставленной с калориметра, система используется для идентификации типа частиц. И, так как физический фон нерелятивистский, будут большие отличия в  $dE/dx$  и  $E/p$  в зависимости от типа частиц.

Основной задачей электромагнитного калориметра является выработка сигнала запуска детектора, а главным аргументом для принятия решения является величина



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

энерговыведения, так как основные фоновые события имеют энергию меньшую, чем сигнальные. Для обеспечения допустимой частоты запуска детектора энергетическое разрешение в режиме реального времени должно быть не хуже 5%. При этом необходимо использовать алгоритм анализа данных конвейерного типа без мертвого времени в режиме реального времени в связи с тем, что частота загрузки может меняться. Также он должен учитывать как статистические флуктуации развития электромагнитного ливня, так и большую фоновую загрузку, т. е. оперировать компактными группами кристаллов.

Технически процедура обработки сигналов в режиме реального времени и выработка сигнала запуска детектора реализуются в системе первичного триггера калориметра.

## 1. Электромагнитный калориметр

Основой электромагнитного калориметра являются сцинтилляционные кристаллы. 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  $\text{Lu}_{2(1-x)}\text{Y}_{2x}\text{SiO}_5(\text{Ce})$  (LYSO) [4]. Энерговыведение при собственной радиоактивности кристаллов меньше шумов электроники, и поэтому ее влияние пренебрежимо мало. Электромагнитный калориметр состоит из кристаллов сечением  $2 \times 2$  см ( $\sim 1$  мольеровский радиус) и длиной 12 см (10.5 радиационных длин). Электромагнитный калориметр покрывает область, вписанную в окружность радиусом 50 см, и состоит из 1920 кристаллов, которые для удобства монтажа собраны в модули.

Схематическое изображение электромагнитного калориметра приведено на рис. 2.

Основным конструктивным элементом электромагнитного калориметра являются модули  $2 \times 2$  кристалла (рис. 3). При попадании частицы энерговыведение распределяется между несколькими кристаллами, поэтому для уменьшения объема передаваемой информации в систему первичного триггера в специально разработанной для эксперимента COMET предварительной электронике [5] произведено аналоговое суммирование с четырех кристаллов одного модуля  $2 \times 2$ . Суммарный сигнал является базовой единицей („триггерной ячейкой“) в системе первичного триггера. Типичная форма суммарного сигнала представлена на рис. 4.

Оцифровывающей платой измерительного тракта калориметра является плата EROS [6]. Усиленные и сформированные сигналы записываются в кольцевую память (микросхема DRS4 [7]), имеющую 1000 ячеек, с частотой 1 GHz. С учетом времени, затрачиваемого на анализ входной команды от триггера, максимальное будущее временное окно относительно момента события, в

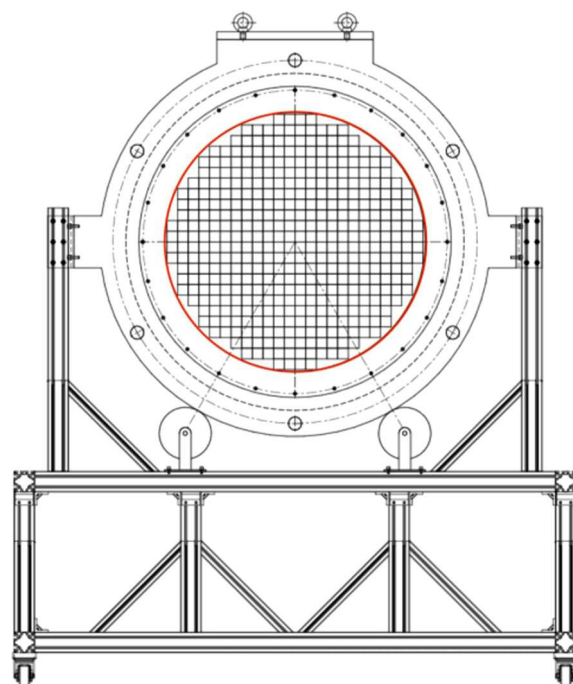


Рис. 2. Схематическое изображение электромагнитного калориметра.

течение которого данные записываются в память и затем корректно вычитываются, составляет  $\sim 900$  ns.

## 2. Система первичного триггера

Блок-схема триггерной системы эксперимента COMET с детектором на основе дрейфовых трубок и электромагнитного калориметра показана на рис. 5 [3,8]. Триггерная система детектора состоит из модуля центрального триггера (FC7) [9], плат управления и синхронизации триггера (FCT), системы первичного триггера калориметра (ECal Pretrigger), модуля передачи „быстрого“ сигнала триггера (FDB), первичного триггера системы активной защиты от космического излучения (Cosmic trigger system) и триггерных интерфейсных плат измерительной электроники (Trigger I/F). Сигнал триггера формируется на основе данных калориметра. Каждая плата, связанная с триггером, управляется программируемой логической интегральной схемой (ПЛИС) для получения сигналов от детектора, выполнения цифровой обработки данных и передачи сформированной посылки и решения в модуль FC7 по гигабитным оптическим линиям.

Все модули триггерной системы и измерительных трактов синхронизированы центральным триггером (FC7) через платы управления и синхронизации триггера (FCT), которые выполняют функцию интерфейса и связывают все модули с центральным триггером.

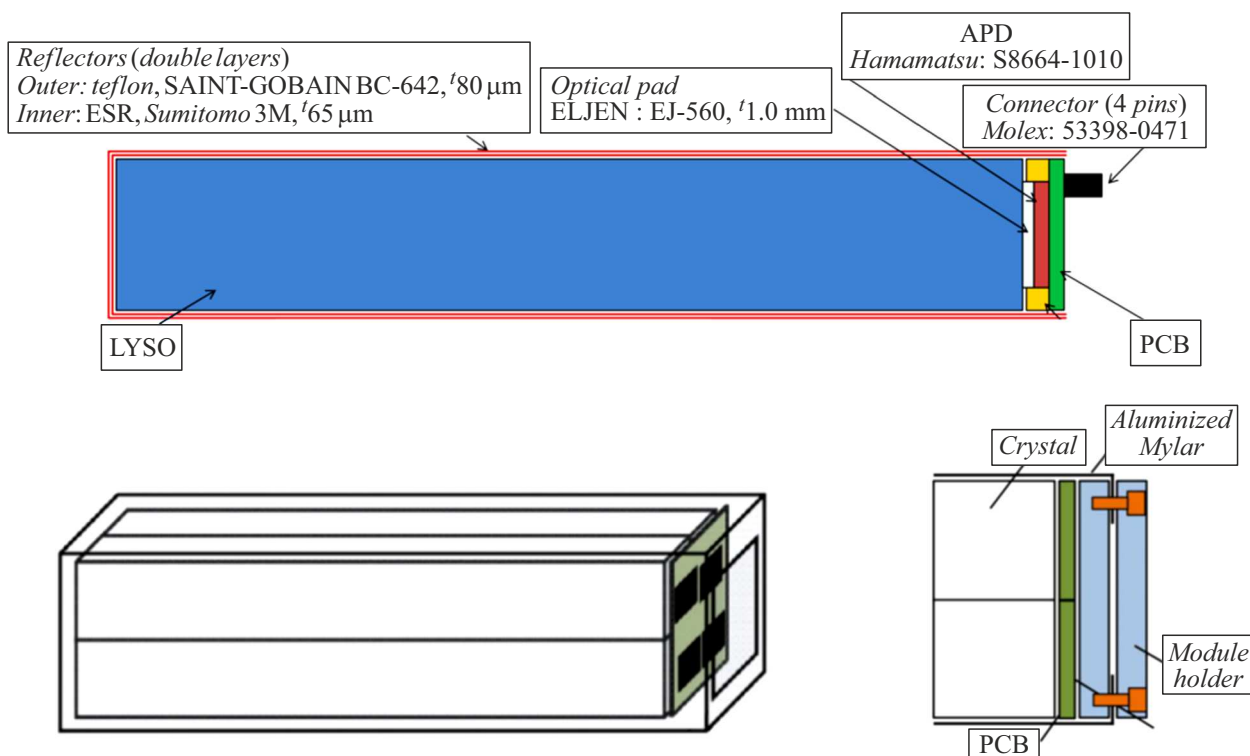


Рис. 3. Сверху — один кристалл LYSO с фотодиодом и крепежной платой; снизу — структура модуля из  $2 \times 2$  LYSO кристаллов.

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.

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

- 1) энергетическое разрешение должно быть лучше 5% при энергии частиц около 105 MeV;
- 2) эффективность к полезным событиям не ниже 90 %;
- 3) задержка прихода триггерного сигнала в оцифровывающую электронику от момента события должна быть не более 900 ns.

## 2.1. Общая структура системы первичного триггера

В электромагнитном калориметре эксперимента COMET будет использоваться 1920 кристаллов, поэтому триггерных ячеек получается 480. Разместить обработку всех каналов на одной или даже двух печатных платах технически сложно (почти невозможно). Кроме того, калориметр имеет четырехкратную симметрию. Поэтому в первичном триггере калориметр разбивается на четыре сектора, каждому из которых будет соответствовать одна большая плата. С другой стороны, использование в триггере разбиения на шесть, восемь и более триггер-

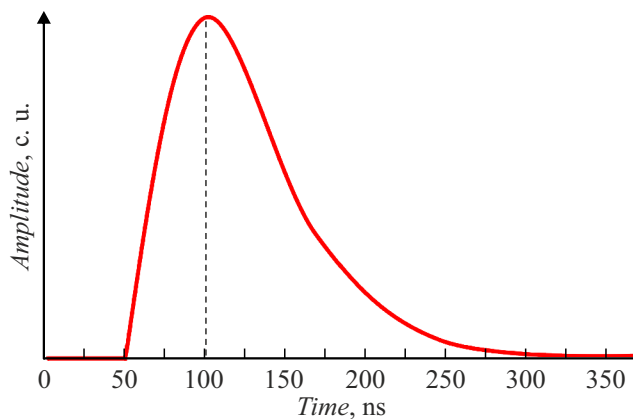
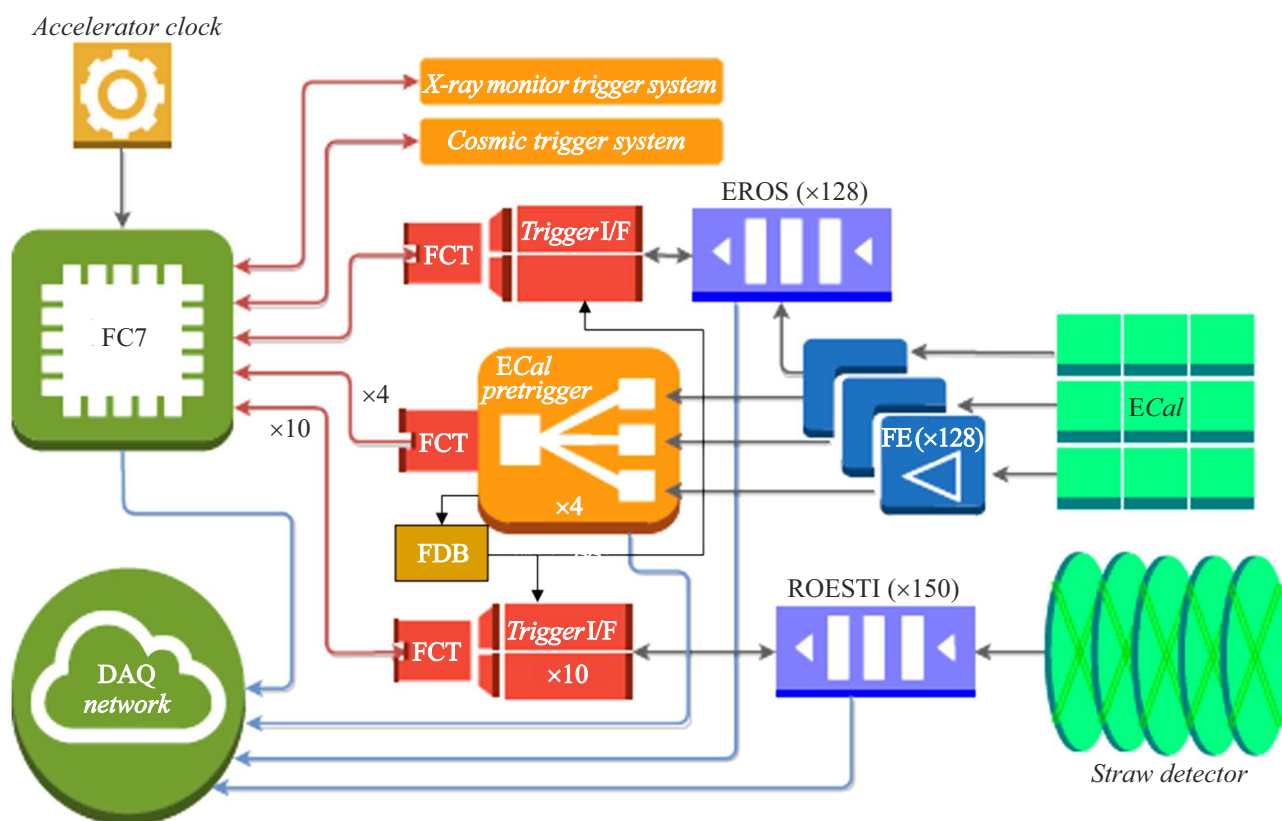


Рис. 4. Типичная форма суммарного сигнала на входе первичного триггера.

ных плат проблематично, так как необходимо было бы дублировать и передавать большое количество сигналов между платами для перекрытия границ секторов, каждый из которых обрабатывается одной платой.

Для перекрытия границ между соседними секторами из одной платы в соседнюю передаются 12 цифровых сигналов.

Для преобразования в цифровой вид аналоговых сигналов с предварительной электроники калориметра на плате системы первичного триггера электромагнитного калориметра размещено  $480/4 = 120$  АЦП (аналого-



**Рис. 5.** Блок-схема триггерной системы эксперимента COMET с детектором на основе дрейфовых трубок и электромагнитного калориметра.

цифровых преобразователя). Для физических задач достаточно иметь разрядность АЦП 8 bit.

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 FC7 с помощью FCT передается 64 бита данных для принятия решения о записи информации о данном событии в систему сбора данных со всех систем детектора.

Для удовлетворения предъявляемых к триггерной системе требований по временной задержке от момента события до прихода в оцифровывающую электронику в системе первичного триггера реализована модель двойного триггера для гарантированного вычитывания измеренных данных. Система первичного триггера дополнительно вырабатывает „быстрый“ сигнал срабатывания для оцифровывающей электроники и передает его через FDB непосредственно в платы оцифровки с целью остановки записи в циклическую память плат EROS/ROESTI.

Для облегчения настройки и эксплуатации было принято решение аналоговую часть и оцифровывающие элементы триггерных сигналов калориметра вынести в отдельные маленькие платы типоразмера евромеханики 3U (габариты оцифровывающей платы:  $70 \times 100$  mm), а обработку оцифрованных данных сделать на материн-

ской плате, которая была бы аналогом шины евро-крейта размером 6U.

## 2.2. Техническая реализация системы первичного триггера

Одним из ключевых элементов плат оцифровщиков является АЦП. С целью уменьшения времени, затрачиваемого на дискретизацию входных аналоговых сигналов с плат предварительной электроники, но чтобы при этом не получить сильного проигрыша в разрешении (уменьшении разрядности АЦП), для оцифровывающих плат были выбраны четырехканальные АЦП фирмы Analog Device AD9287 с частотой дискретизации 80 MHz и временем преобразования 8 тактов (100 ns). Каждая оцифровывающая плата содержит по два таких АЦП (рис. 6). Всего в материнскую плату может быть установлено до 16 оцифровывающих плат (рис. 7).

Цифровой узел первичного триггера построен на основе ПЛИС фирмы AMD (Xilinx) серии Virtex-4. Блок-схема внутренней структуры ПЛИС первичного триггера показана на рис. 8.

Цифровая часть блока материнской платы первичного триггера решает следующие задачи:

- принимает данные от кристаллов АЦП с заданной тактовой частотой;





**Рис. 6.** Оцифровывающая плата первичного триггера электромагнитного калориметра.

- 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 „быстрый“ сигнал триггера [10] для оцифровывающих плат измерительного тракта;
- передает триггерную информацию через FCT в FC7 для принятия окончательного решения.

Все поступающие в материнскую плату первичного триггера оцифрованные сигналы с калориметра обрабатываются в реальном времени в ПЛИС разработанным алгоритмом.

Все компоненты системы первичного триггера были испытаны на стабильность работы в условиях высокого радиационного облучения до  $2\text{ kGy}$  и потока  $10^{12}\text{ neutron/cm}^2$ . Результаты испытаний показали, что все компоненты устойчивы к воздействию радиационного облучения до  $2\text{ kGy}$  и потока  $10^{12}\text{ neutron/cm}^2$  [11,12] и удовлетворяют требованиям эксперимента.

### 3. Алгоритм поиска кластеров

При энергиях около  $100\text{ MeV}$  электромагнитный ливень, вызванный падающей частицей, будет распределяться по нескольким кристаллам калориметра. Для восстановления полной энергии входящих в электромагнитный калориметр частиц необходимо суммировать энерговыделение по нескольким кристаллам, смежным с кристаллом с максимальным энерговыделением. При определении 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, удовлетворяющее предъявляемым к электронике первичного триггера требованиям.

По результатам моделирования [13] было принято решение использовать в первичном триггере электромагнитного калориметра COMET размер кластера  $2 \times 2$  триггерных ячейки.

Для случая с размером кластера  $2 \times 2$  алгоритм определения энерговыделения заключался в следующем: сначала происходило суммирование энерговыделения по всем возможным комбинациям триггерных ячеек размером  $2 \times 2$ , как показано на рис. 9. Затем определялась сумма с максимальным энерговыделением.

#### 3.1. Аппаратная реализация алгоритма

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

- сначала из поступивших сигналов вычитается значение пьедесталов, и происходит небольшое сглаживание-интегрирование посредством суммирования (усреднения) двух последовательных значений с постоянной времени  $25\text{ ns}$ ;
- после этого входные сигналы суммируются в триггерные группы по 4 триггерные ячейки на основе заранее прописанных в таблицах групп;
- 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). Также в этот момент формируется сигнал „быстрого триггера“, который передается в оцифровывающие платы измерительного канала с минимальной задержкой;
- амплитуда триггерных групп определяется путем сравнения задержанного на один такт значения суммарной амплитуды с текущим, т.е. поступившим в данный момент. Как только поступившее в данный момент значение становится меньше задержанного, за амплитуду триггерной группы принимается задержанное на один такт значение суммарной амплитуды. В момент, когда амплитуда триггерной группы определена, вырабатывается соответствующий для этой группы „флаг“, и значение соответствующей группы записывается в регистр;
- алгоритм поиска кластера проверяет все возможные комбинации триггерных групп и сравнивает их суммарные амплитуды попарно, как показано на рис. 10. Для сравнения используются 16-разрядные регистры, в которые записываются значения суммарной амплитуды

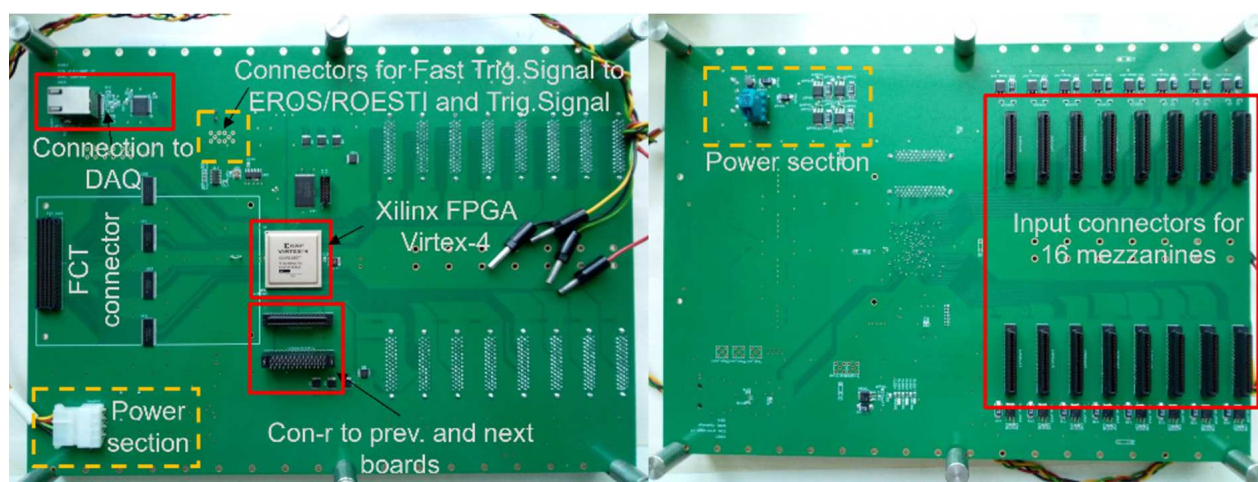


Рис. 7. Материнская плата первичного триггера электромагнитного калориметра. Слева — вид снизу; справа — вид сверху.

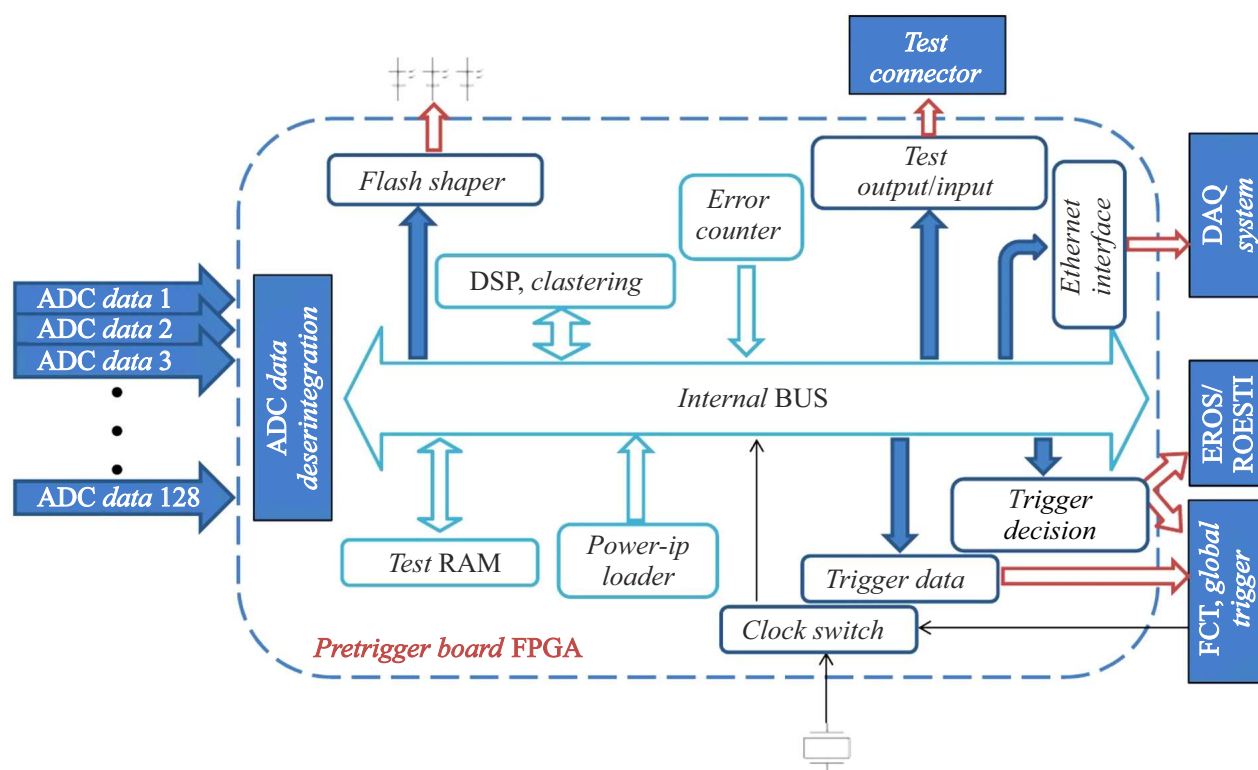


Рис. 8. Блок-схема внутренней структуры ПЛИС первичного триггера электромагнитного калориметра.

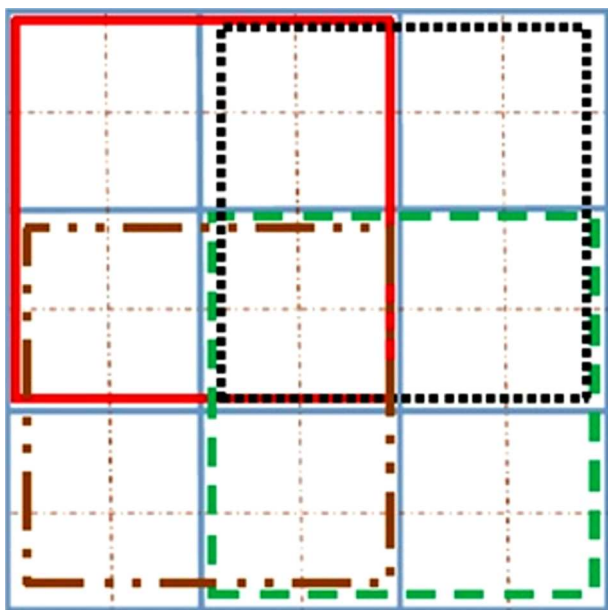
(10 bit) и номер триггерной группы (6 bit). На следующую ступень сравнения передаются данные канала с большей суммарной амплитудой; в результате после финального сравнения будут известны амплитуда и номер группы с максимальным энерговыделением в данном срезе;

- после определения амплитуды и соответствующего номера триггерной группы формируется посылка в плату FC7 для принятия окончательного решения о

выработке сигнала записи данного события на основе всех полученных данных;

- сброс всей системы в начальное состояние происходит в следующих случаях:

- взведен „флаг“ о превышении порогового значения дискриминатора, но „флага“ об определении амплитуды данного канала или сигнала центрального триггера не было в течение  $1\ \mu\text{s}$  (вариативно и может быть изменено) после этого;



**Рис. 9.** Суммирование по всем возможным комбинациям  $2 \times 2$  триггерных ячеек.

о взведены все „флаги“ и сформированы оба триггерных сигнала. После этого через  $\sim 60$  ns алгоритм вновь готов к работе.

#### 4. Измерение энергетического разрешения и эффективности системы первичного триггера

Система первичного триггера была протестирована на выведенном пучке электронов (Университет Тохоку, Сендай, Япония). Для испытаний использовался прототип калориметра состоящий из 64 кристаллов, 4 платы предварительной электроники и электроника первичной триггерной системы (2 платы оцифровщиков и материнская плата).

По результатам испытаний набрано 10 заходов (5 с запусками от триггерной системы калориметра и 5 с запусками от внешней системы для измерения эффективности) по  $\sim 20$  тысяч событий каждый. Эффективность первичного триггера вычислялась из соотношения количеств событий, зарегистрированных внешней системой, и событий, зарегистрированных триггерной системой калориметра. Общая эффективность системы первичного триггера при энерговыделении выше 30 MeV составила 99.4%, выше 40 MeV — 99.7%. Энергетическое разрешение триггерной системы по записанным заходам на энергии 105 MeV получилось примерно 4.5 %, что очень близко к полученному при оффлайн-обработке данных в измерительном канале — 4.4 % [3], и полностью удовлетворяет предъявляемым к системе требованиям. Более детальное описание проведения и

получения результатов экспериментального испытания системы первичного триггера приведено в [10,13,14].

#### 5. Измерение времени принятия решения и задержки выработки триггерного сигнала

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

Для проверки временной задержки прихода триггерного сигнала в блоки оцифровки измерительного канала был собран стенд, функциональная блок-схема которого показана на рис. 11. Проводилась серия испытаний полного триггерного тракта электромагнитного калориметра по измерению времени выработки триггерного сигнала и задержки его прихода в оцифровывающие платы электромагнитного калориметра, а также системы дрейфовых трубок.

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 измерительного канала EROS;
- по другой сигналы передавались на вход системы первичного триггера (L-1 Trigger system), где происходило согласование уровней по напряжению между платами предварительной электроники и оцифровывающие платы первичного триггера для дальнейшей дискретизации с помощью АЦП.

Оцифрованные 8-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 разд. 3.1.

На рис. 12 представлена осциллограмма сигналов в ключевых точках электронного тракта 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 запуска чтения данных, выработанный FC7, на входе в плату EROS.

Как видно из осциллограммы, итоговая задержка от момента события до прихода сигнала запуска чтения



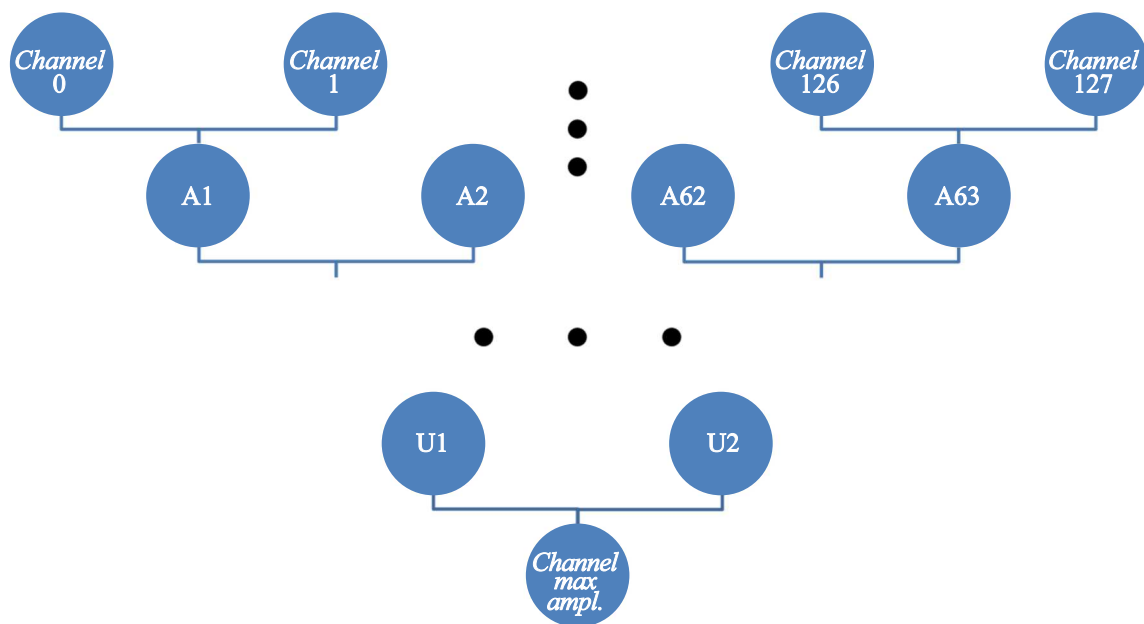


Рис. 10. Поиск триггерной группы с максимальным энерговыделением в данном срезе.

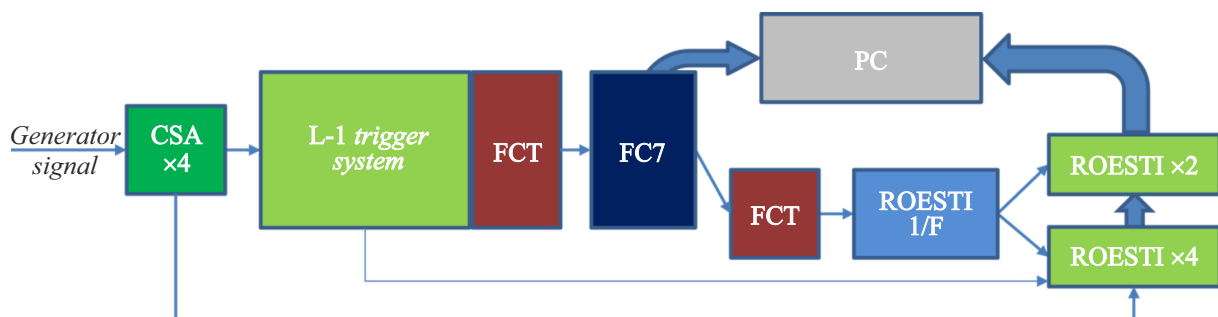


Рис. 11. Функциональная блок-схема аппаратуры для измерений времени принятия решения и задержки выработки триггерного сигнала.

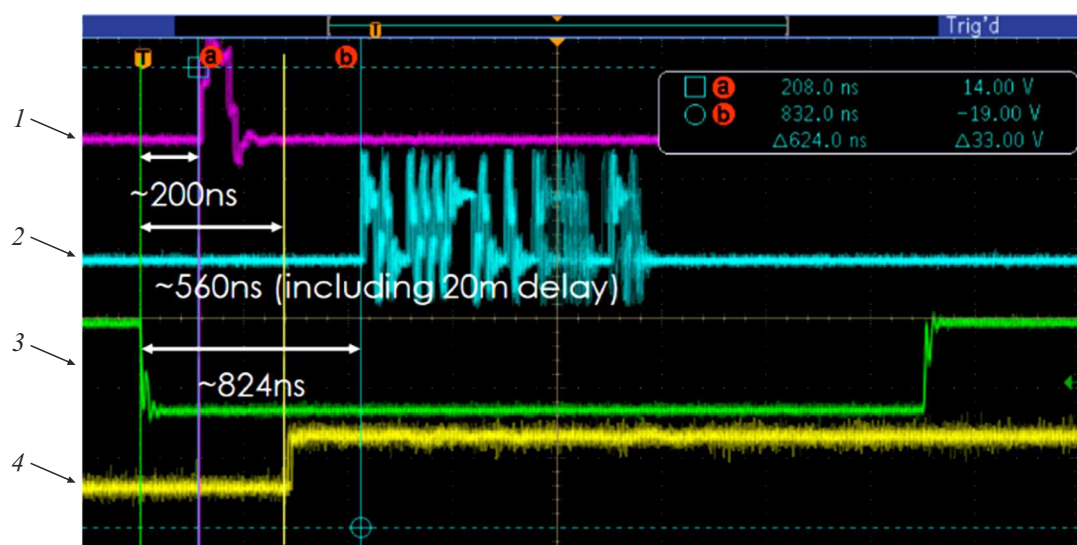


Рис. 12. Осциллограмма сигналов в ключевых точках электронного тракта электромагнитного калориметра: 1 — сигнал „быстрого“ триггера, 2 — сигнал запуска чтения, выработанный FC7, на входе в плату EROS, 3 — сигнал на выходе генератора, 4 — сигнал центрального триггера на входе платы EROS.



данных от центрального триггера в оцифровывающие платы измерительного тракта не превышает 900 ns. Данные, поступившие в оцифровывающую плату измерительного тракта от предварительной электроники, были успешно вычитаны в системе сбора данных.

## Заключение

Алгоритм логики первичного триггера разработан, промоделирован и протестирован в электронике на стенде и реальных событиях. Результаты испытаний показали, что алгоритм работает корректно. На выведенном пучке электронов было получено энергетическое разрешение триггерной системы по записанным заходам на энергии 105 MeV примерно 4.5 %, что очень близко к полученному при оффлайн-обработке данных в измерительном канале — 4.4 %, и полностью удовлетворяет предъявляемым к системе требованиям.

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 настоящий момент система первичного триггера электромагнитного калориметра разработана, изготовлена, испытана и ожидает начала эксперимента.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] Y. Kuno (COMET collaboration). *Prog. Theor. Exp. Phys.*, **022C01**, 1 (2013). DOI: 10.1093/ptep/pts089
- [2] Y. Uchida (COMET collaboration). *J. Instrumentation*, **9** (9), C09008 (2014). DOI: 10.1088/1748-0221/9/09/C09008
- [3] R. Abramishvili (COMET collaboration). *Prog. Theor. Exp. Phys.*, **2020** (3), 033C01 (2020). DOI: 10.1093/ptep/ptz125
- [4] Kou Oishi (COMET collaboration). *JPS Conf. Proc.*, **8**, 025014 (2015). DOI: 10.7566/JPSCP.8.025014
- [5] Ю.В. Юдин, Д.Н. Григорьев, Л.Б. Эпштейн. *Автометрия*, **54** (2), 113 (2018).
- [6] K. Ueno, E. Hamada, M. Ikeno, S. Mihara, H. Nishiguchi, M. Shoji, T. Uchida, Y. Fujii, R. Kawashima, K. Oishi, J. Tojo, Y. Nakazawa, H. Yoshida. *PoS, EPS-HEP2019*, **364**, (2020). DOI: 10.22323/1.364.0175
- [7] S. Ritt. *Nucl. Instr. Meth. A*, **518** (1–2), 470 (2004). DOI: 10.1016/j.nima.2003.11.059
- [8] L.B. Epshteyn (COMET collaboration). *JINST*, **12**, C01064 (2018). DOI: 10.1088/1748-0221/12/01/C01064
- [9] M. Pesaresi, M. Barros Marin, G. Hall, M. Hansen, G. Iles, A. Rose, F. Vaseyb, P. Vichoudis. *J. Instrumentation*, **10** (3), C03036 (2015). DOI: 10.1088/1748-0221/10/03/C03036
- [10] D.N. Grigoriev, L.B. Epshteyn, Dz.V. Shoukavy. *Moscow Univer. Phys. Bull.*, **79** (1), S1 (2024).
- [11] L.B. Epshteyn, R.R. Akhmetshin, D.N. Grigoriev, Dz.V. Shoukavy, Yu.V. Yudin. *The electronics for the electron calorimeter of the COMET experiment*, IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, 2018, 2019. DOI: 10.1109/NSSMIC.2018.8824666
- [12] Yu. Nakazawa, Yu. Fujii, E. Gillies, E. Hamada, Yo. Igarashi, M.J. Lee, M. Moritsu, Yu. Matsuda, Yu. Miyazaki, Yu. Nakai, H. Natori, K. Oishi, A. Sato, Yo. Uchida, K. Ueno, H. Yamaguchi, B. Yeo, H. Yoshida, J. Zhang. *Nucl. Instrum. Meth. A*, **955**, 163247 (2020). DOI: 10.1016/j.nima.2019.163247
- [13] Д.В. Шелковий, Д.Н. Григорьев, Л.Б. Эпштейн, Ю.В. Юдин. *Известия НАН Беларуси. Серия физико-математических наук*, **56** (1), 97 (2019).
- [14] Л.Б. Эпштейн, Р.Р. Ахметшин, Д.Н. Григорьев, В.Ф. Казанин, А.С. Мельник, Д.В. Шелковий, Ю.В. Юдин. *Сибирский физ. журн. Серия: Физика высоких энергий, ускорителей и высокотемпературной плазмы*, **12** (4), 5 (2017).