

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 539.17

МОДЕРНИЗАЦИЯ КАРТЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ
ФОТОННОГО СПЕКТРОМЕТРА ЭКСПЕРИМЕНТА ALICE/CERN

©2025 г. Ю. Г. Сибиряк^{а,*}, С. Н. Базылев^б, А. В. Щипунов^б,
И. А. Филиппов^б

^аНациональный исследовательский центр “Курчатовский институт”

Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1

^бОбъединенный институт ядерных исследований

Россия, 141980, Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6

**e-mail: sibiryak.yur@yandex.ru*

Поступила в редакцию 17.03.2025 г.

После доработки 25.03.2025 г.

Принята к публикации 12.05.2025 г.

Описана конструкция модернизированной карты измерительной электроники (КИЭ) фотонного спектрометра эксперимента ALICE/CERN. Разработка новой КИЭ связана с повышением светимости и энергии пучков большого адронного коллайдера и с необходимостью повысить точность измерения времени пролета для лучшей идентификации регистрируемых частиц. Существующая КИЭ фотонного спектрометра не отвечает новым требованиям и должна быть заменена по плану модернизации. Улучшение измерительных характеристик КИЭ достигается за счет аппаратного измерения времени пролета вместо офлайн-обработки кодов оцифровки формы сигнала фотодетектора. Модернизированная КИЭ содержит 32 измерительных канала и все функциональные блоки, необходимые для работы фотонного спектрометра. Приведено описание функциональных блоков. Представлены результаты измерений характеристик модернизированной КИЭ на тестовых пучках PS и SPS в CERN в диапазоне импульсов от 1 до 150 ГэВ/с. По полученным результатам сделан вывод, что разработанная карта полностью соответствует требованиям к КИЭ модернизированного фотонного спектрометра.

1. ВВЕДЕНИЕ

Фотонный спектрометр электромагнитный калориметр с высоким разрешением, используемый в эксперименте ALICE/CERN [1], который позволяет получить важную информацию об излучениях, возникающих при взаимодействии встречных пучков тяжелых ионов высоких энергий. Фотонный спектрометр позволяет регистрировать фотоны в широком диапазоне энергий, от 50 МэВ до 100 ГэВ, восстанавливать нейтральные π - и η -мезоны по их двухфотонным распадам, причем при больших импульсах (порядка 25 ГэВ) разрешение спектрометра для этих частиц становится лучше, чем у трековых детекторов.

Фотонный спектрометр состоит из 12544 фотодетекторов, расположенных в четырех герметичных модулях, которые находятся внутри магнита L3 в шахте экспериментальной зоны на глубине 70 м. Детектирующим материалом (радиатором) калориметра являются кристаллы вольфрамата свинца $PbWO_4$ с радиационной длиной 0.89 см и величиной радиуса Мольера 2.19 см. Для увеличения световыхода кристаллы охлаждаются до $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, при этом нестабильность температуры не должна превышать $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Фотодетектор состоит из кристалла с размерами $22 \times 22 \times 180\text{ мм}^3$, ориентированного торцами размерами $22 \times 22\text{ мм}^2$ к потоку регистрируемого излучения. К противоположному торцу кристалла с помощью специального оптического клея приклеен лавинный фотодиод (ЛФД) S8664-55 (HAMAMATSU) с окном размером $5 \times 5\text{ мм}^2$. ЛФД припаян к плате, на обратной стороне которой находится зарядочувствительный предусилитель (ЗЧП). Непрозрачные стенки ячеистых структур, в которых располагаются фотодетекторы, исключают перерассеивание света между кристаллами. Максимальная измеряемая энергия составляет 100 ГэВ. Фотодетекторы располагаются в охлаждаемой и термоизолированной части модуля.

Проектирование карты измерительной электроники (КИЭ) фотонного спектрометра началось в 2002 г., и на тот момент необходимо было обеспечить измерение энергии до 100 ГэВ с относительной ошибкой σ/E для энергий 1–2 ГэВ не хуже 4% и время пролета с ошибкой 2 нс. Разработка КИЭ ФОС была закончена в 2005 г. [2, 3].

КИЭ подключается к выходам ЗЧП через плоский кабель, проходящий через термоизоляцию и панель охлаждения. В модуле располагается 112 карт. Одна карта подключена к 32 фотодетекторам. В схеме КИЭ используется специализированная микросхема ALTRO [4], которая содержит 16 АЦП и блоки цифровой обработки кодов. Разрядность АЦП равна 10 битов, частота дискретизации равна 10 МГц. Максимальная энергия, регистрируемая в одном канале, равна 80 ГэВ, требуемый динамический диапазон составляет 16000. Для обеспечения такого диапазона КИЭ содержит 2 спектрометрических канала с отношением усиления 16.

Принцип работы КИЭ основан на непрерывной оцифровке сигналов от ЗЧП, прошедших через спектрометрический фильтр второго порядка с постоянной времени 1 мкс. После прихода триггерного сигнала с задержкой 1200 нс от начала события в память ALTRO записываются последние 40 отсчетов. При офлайн-обработке накопленных данных, которая заключается в восстановлении формы сигнала с помощью функции Гаусса, определяется амплитуда сигнала, пропорциональная энергии частицы. Время пролета, которое используется для идентификации прямых фотонов из массы зарегистрированных ФОС

частиц, определяется по положению максимума восстановленного сигнала на временной шкале.

КИЭ содержит 64 спектрометрических усилителя с высоким и низким усилениями, 32 регулятора напряжения смещения для лавинных фотодиодов, 4 многофункциональные микросхемы ALTRO, 8 суммирующих усилителей, формирующих сигналы для триггера L_0 , блок управления, выполненный на ПЛИС, и источники стабилизированного питания со схемами контроля их параметров. КИЭ представляет собой печатную плату размером 210×359 мм², которая содержит 10 слоев. Многослойная конструкция платы объясняется необходимостью минимизировать наводки от цифровых схем на аналоговые. Для этой же цели также используются отдельные источники питания для аналоговых и цифровых схем. Потребляемая мощность одной КИЭ составляет 5.6 Вт. Поскольку карты находятся в закрытом объеме корпуса модуля, они охлаждаются водой с температурой +17 °С, которая проходит через медные трубки, припаянные к медным экранам, закрепленным по обе стороны платы.

В описанной выше конфигурации фотонный спектрометр принимает участие уже в трех измерительных периодах (Run 1, 2, 3) на Большом адронном коллайдере (БАК), начиная с 2009 г. За это время было проведено две модернизации БАК, которые позволили увеличить полную энергию столкновений протонных пучков от 2.4 до 13 ТэВ, а светимость – в 10 раз.

В 2018 г. во время очередной технической остановки для проведения обслуживания и модернизации БАК была проведена модернизация КИЭ фотонного спектрометра для уменьшения мертвого времени при чтении данных с 200 до 50 мкс. Однако существенно улучшить измерительные характеристики существующей КИЭ не представляется возможным. Особенно это касается временного разрешения. Оно оказалось значительно хуже, чем измеренное на тестовых пучках: для энергии 1 ТэВ вместо 2 нс получено 8 нс. Это делает невозможной идентификацию прямых фотонов по времени пролета при одновременной регистрации нейтронов и пионов [5]. Ухудшение временного разрешения можно объяснить шумами и наводками при формировании тактовой частоты 10 МГц из частоты синхронизации БАК 40 МГц, что приводит к фазовым сдвигам тактовых импульсов и размытию их положения по времени (джиттер). Дополнительно из-за частоты дискретизации, равной 10 МГц, нельзя осуществить привязку зарегистрированной частицы к номеру пересечения пучков, которые синхронизируются частотой 40 МГц.

Недостатком существующей КИЭ является также старение элементной базы, на которой она выполнена. Например, микросхема ALTRO была выпущена ограниченной партией 20 лет назад и больше не производилась, что делает невозможным ремонт карт.

Исходя из изложенного выше, было принято решение о разработке новой КИЭ, которая имела бы такие же физические размеры, разъемы и напряжения питания, как существующая, т.е. модернизация фотонного спектрометра осуществлялась бы только заменой карт без переделки всей инфраструктуры. Рассматривался также вариант замены ЛФД на кремневые фотоумножители (КФУ). Требования к новой КИЭ формулируются следующим образом:

- для единичного канала максимальная измеряемая энергия должны быть не более 160 ГэВ;
- временное разрешение для энергии 1 ГэВ – не хуже 0.5 нс;
- мертвое время при чтении данных – не больше 50 мкс;
- возможность работы с ЛФД и КФУ;
- физические размеры и напряжения питания должны быть, как у существующей КИЭ.

Увеличение скорости счета и расширение динамического диапазона по энергиям позволят полностью воспользоваться высокой гранулированностью фотонного спектрометра и выполнить ряд измерений, таких как измерение спектров идентифицированных нейтральных пионов, эта- и омега-мезонов и прямых фотонов с поперечными импульсами, большими 50–100 ГэВ, а также изучить корреляции этих частиц.

2. ОПИСАНИЕ БЛОК-СХЕМЫ КИЭ

На рис. 1 показана функциональная блок-схема разработанной КИЭ.

Рис. 1. Функциональная блок-схема КИЭ фотонного спектрометра.

Карта подключается к 32 фотодетекторам через 2 разъема P1. Через P1 также подаются питание для ЗЧП (+12 В, –6 В) и индивидуальные напряжения смещения для ЛФД (максимальное +400 В). В случае работы с КФУ подается только напряжение смещения с максимальным значением +70 В. Напряжение смещения формируется в блоке формирователя напряжения смещения (ФНС).

Для измерения энергии частиц используются блок спектрометрических усилителей (БСУ) и 2 АЦП ADS52J90. АЦП работают в режиме оцифровки 32 входных каналов с периодом выборки 25 нс и разрядностью 12 битов.

Измерение времени пролета осуществляется блоком формирователя временной метки и время-цифровым преобразователем (ВЦП) на микросхеме HPTDC (High Performance Time to Digital Converter), которая работает в режиме оцифровки 32 каналов с разрешением 100 пс.

Блок управления карты принимает команды от системы сбора данных и управляет работой всех блоков карты. Блок управления выполнен на ПЛИС XC7K160T фирмы Xilinx и выполняет следующие функции:

- чтение данных с АЦП и ВЦП,
- передача данных в систему сбора данных,
- управление напряжением смещения для ЛФД/КФУ,
- слежение за температурой карты,
- управление и слежение за напряжениями и токами источников питания карты,
- установка порогов для дискриминаторов.

Передача данных и управление картой осуществляются по двум каналам:

- 1) по каналу DTC (Data, Trigger, Clock, Control), использующему стандарт P2P [6]: в эксперименте ALICE канал DTC используется для передачи на КИЭ триггерного сигнала L_0 , тактовой частоты БАК, равной 40 МГц, кодов установки напряжения смещения и чтения данных;
- 2) по каналу 10G Ethernet: канал используется для тестирования карты и в измерениях на тестовых пучках.

Для обновления прошивки ПЛИС используется либо разъем JTAG, либо канал 10G Ethernet. Для обновления прошивки по 10G Ethernet в ПЛИС уже должна быть записана прошивка, поддерживающая данную функцию.

Измерение температуры карты проводится в нескольких местах микросхемами DS18B20U. Для измерения напряжения и токов используется микросхема INA226.

На карте установлены 4 LEMO-разъема для приема или передачи сигналов LVTTTL по коаксиальному кабелю. Данные разъемы предназначены для тестирования модуля.

Блок питания вырабатывает необходимые низковольтные напряжения питания для КИЭ и ЗЧП.

На рис. 2 показан вид КИЭ. Размер карты составляет 359×210 мм². Шумы аналоговых компонентов, например операционных усилителей и наводки, которые возникают при переключении цифровых элементов, расположенных на плате, могут ухудшить точность измерения энергии и времени пролета. Минимизация влияния шумов и наводок достигается оптимальным расположением аналоговых и цифровых элементов на плате, выбором схемы соединения элементов с питающими напряжениями и общей шиной. Для этого плата имеет 11 слоев с отдельными слоями заземлений, питающих напряжений и соединительных проводников.

Далее приводятся технические характеристики основных функциональных блоков и описания их принципиальных схем.

Рис. 2. Вид платы КИЭ.

2.1. Блок спектрометрических усилителей и АЦП

Разработанный БСУ может работать как с ЛФД, так и с КФУ. Различия заключаются в номиналах некоторых резисторов и конденсаторов.

Динамический диапазон измеряемых энергий можно оценить, учитывая, что в кристалле остается 80% энергии регистрируемой частицы, остальные 20% утекают в виде электромагнитного излучения в соседние кристаллы. Тогда при максимальной энергии 200 ГэВ в кристалле остается 160 ГэВ, а динамический диапазон составит $160 \text{ ГэВ} / 2 \text{ МэВ} = 80000$, что потребует использования 17-разрядного АЦП. Необходимо также учесть, что наиболее вероятна регистрация частиц до 10 ГэВ. Для уменьшения разрядности АЦП до 12 разрядов диапазон измерений разбивается на два поддиапазона: измерение низких энергий от 2 МэВ до 8 ГэВ, измерение высоких энергий от 40 МэВ до 160 ГэВ [5].

Таким образом, на карте располагается 64 канала измерения энергии, из которых 32 канала с низким усилением для измерения высоких энергий и 32 канала с высоким усилением для измерения низких энергий. Каждый канал содержит фильтр и буферный усилитель с дифференциальным выходом для соединения с дифференциальным входом АЦП.

Для ЛФД выходной сигнал ЗЧП проходит через фильтр, который повышает отношение сигнал/шум и формирует (определяет) форму импульса. На входе стоит схема дифференцирования, далее интегрирования. Выбор порядка фильтра, т.е. количества каскадов интегрирования основан на анализе степени влияния различных искажающих факторов на энергетическое разрешение спектрометра. Расчеты и измерения на тестовых пучках показали [7], что наилучшее энергетическое разрешение достигается при следующих параметрах:

- коэффициент усиления ЛФД $M=100$; это увеличивает отношение сигнала к наводке, которая присутствует на линиях связи ЛФД–ЗЧП, и, с другой стороны, уменьшает усиление БСУ, необходимое для согласования амплитуды сигнала со входом АЦП, что уменьшает шумы пьедесталов;
- для минимизации влияния электронных шумов ЛФД–ЗЧП на энергетическое разрешение достаточно использовать фильтр первого порядка (1 каскад дифференцирования и 1 каскад интегрирования с постоянными времени формирования равными 1 мкс). Такой фильтр упрощает схемотехнику БСУ, что

уменьшает затраты на компоненты по сравнению, например, с фильтром второго порядка существующей КИЭ фотонного спектрометра.

Энергия частицы пропорциональна амплитуде сигнала на выходе ЗЧП [8]. Параметры сигнала на выходе ЗЧП для ЛФД $5 \times 5 \text{ мм}^2$ S8664-55 (HAMAMATSU) при температуре -25°C следующие:

- амплитуда равна 31 мВ для энергии 1 ГэВ,
- форма сигнала: время нарастания 30–40 нс (зависит от места попадания частицы в кристалл), постоянная времени спада 100 мкс задается ЗЧП.

На рис. 3 показана принципиальная схема одного измерительного канала БСУ, который состоит из канала высокого усиления и канала низкого усиления.

Рис. 3. Принципиальная схема одного измерительного канала БСУ...

Измерительный канал выполнен на одной микросхеме MAX4454, содержащей 4 операционных усилителя (ОУ). Вход измерительного канала соединен со входами двух фильтров на ОУ, $U1$ и $U2$ соответственно. Дифференцирование входного сигнала выполнено на C_2 , R_3 и на C_3 , R_5 . Резисторы R_1 , R_2 используются для компенсации полюса нулем. Отсутствие компенсации приводит к искажению формы импульса в области максимума и к выбросу отрицательной полярности на спаде при пересечении импульсом базовой линии, что может привести к колебаниям базового уровня. Интегрирование осуществляется с помощью C_4 , R_7 и C_6 , R_8 . Усиление задается резисторами R_3 , R_7 и R_5 , R_8 . Максимальная амплитуда сигнала на выходах фильтров составляет 1 В. Величина пьедестала задается опорным источником напряжения +1.5 В.

Синфазный выход фильтра должен быть согласован с дифференциальным входом АЦП, причем на одном входе должен быть постоянный уровень +0.5 В и сигнал должен изменяться в положительную сторону. На втором входе должен быть постоянный уровень +1.5 В и сигнал должен изменяться в отрицательную сторону. Промышленность выпускает специальные ОУ с дифференциальными выходами, например AD8132, однако они не могут быть использованы в измерительной электронике ФОС из-за большой рассеиваемой мощности (порядка 50 мВт на один канал). Поэтому исследовались другие решения. В разработанной схеме дифференциальный сигнал получается добавлением по одному инвертирующему усилителю в каждый канал $U3$ и $U4$. Для одного ОУ, входящего в микросхему MAX4454, рассеиваемая мощность составляет 3 мВт.

На дифференциальных выходах канала с низким усилением и канала с высоким усилением используются фильтры для обеспечения прохождения сигналов наводок с

“земляной” шины через конденсаторы $C_{10}-C_{13}$ на дифференциальные входы АЦП, где они вычитаются. Введение фильтров уменьшило RMS пьедесталов с 2.3 до 0.6 отсчетов АЦП.

Постоянные уровни на дифференциальных входах АЦП формируются подачей напряжений +1.5 и +0.5 В на неинвертирующие входы ОУ. Настройка пьедесталов, которые должны иметь величину 50 ± 10 отсчетов АЦП, происходит путем изменения величины +1.5 В.

КФУ, например НАМАМАТСУ S14160-6015PS, имеет усиление порядка 10^5 , поэтому не требует какого-либо дополнительного усилителя. На выходе КФУ формируется сигнал, который повторяет форму световыхода кристалла: время нарастания до вершины составляет около 10 нс, и спад к базовой линии происходит в течение 150 нс (определяется паразитной емкостью и нагрузочным резистором). БСУ осуществляет согласование сигнала КФУ со входным диапазоном АЦП. Интегрирование необходимо для расширения сигнала для получения не менее 5 выборок при частоте дискретизации 40 МГц. Номиналы резисторов и конденсаторов для работы с КФУ таковы: $R_1, R_2 = 0$; $R_7, R_8 = 20$ кОм; C_2, C_3 отсутствуют; $C_4, C_6 = 5$ пФ.

На рис. 4 показаны сигналы на выходе БСУ от ЛФД и КФУ после офлайн-обработки данных, полученных на пучке PS (ЦЕРН).

Рис. 4. Сигналы на выходе БСУ...

Сигналы от ЛФД имеют пиковое время 1 мкс и длительность по уровню 0.01 примерно 7 мкс. Сигналы от КФУ имеют пиковое время 120 нс и длительность около 600 нс.

В лаборатории измерены среднеквадратичные (RMS) значения собственных шумов и помех в спектрометрических каналах: 0.48 отсчетов АЦП или 0.96 МэВ в канале с высоким усилением; 0.46 отсчетов АЦП или 18.4 МэВ в канале с низким усилением. Диапазон значений пьедесталов от 50 до 60 каналов АЦП. При подключении фотодетекторов через плоский кабель длиной 50 см величина RMS возросла до 0.8 отсчетов АЦП.

Измерения энергетического разрешения с КИЭ проведены на электронной компоненте вторичных пучков частиц протонного синхротрона PS (ЦЕРН) в диапазоне импульсов от 1 до 10 ГэВ/с и на SPS от 10 до 150 ГэВ/с. Относительное энергетическое разрешение вычисляется как отношение ошибки измерения энергии $\sigma(E)$ к величине измеренной энергии E . Энергия определялась суммированием сигналов от фотодетекторов в матрице 3×3 для энергий меньше 10 ГэВ и в матрице 5×5 для энергий выше 10 ГэВ при попадании частиц в центральный фотодетектор матрицы. Процедура определения относительного энергетического разрешения описана в работе [9]. В табл. 1 приведены данные по относительному энергетическому разрешению, измеренному КИЭ с сигналами от ЛФД и КФУ.

Таблица 1. Относительное энергетическое разрешение при температуре $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$

$E, \text{ГэВ}$	0.5	1	2	3	4	5	10	20	80	150
КИЭ+ЛФД*, %	7.5	4.8	3.8	2.6	2.9	2.5	2.4	—	—	—
КИЭ+КФУ**, %	7.6	5.3	3.7	3.2	2.6	2.5	—	1.8	1.3	1.3

Примечание. * – усиление ЛФД $M=100$, БСУ с фильтром первого порядка с постоянной времени 1 мкс; ** – усиление КФУ $M=3.6 \cdot 10^5$, интегрирование сигнала с постоянной времени 100 нс.

Видно, что с точностью до настройки пучка и определения его энергии при суммировании утечек в матрице кристаллов энергетическое разрешение для ЛФД и КФУ примерно одинаковое. При увеличении энергии относительное энергетическое разрешение принимает значение константы, которая показывает, что энергетическое разрешение спектрометра не может быть меньше ее величины при сколь угодно большой энергии. Величина константы связана с неоднородностью детектора и ошибками калибровки.

2.2. Блок формирования напряжения смещения

Измерение энергии фотонов требует аппаратного согласования коэффициентов преобразования измерительных каналов не хуже 4%. Кристаллы вольфрамата свинца имеют разброс световых выхода около 30%, коэффициент усиления фотоприемников при одном и том же напряжении смещения для разных экземпляров имеет разброс около 10%. Необходимо также учитывать прозрачность оптического слоя между кристаллом и фотоприемником, что влияет на величину светового потока, попадающего на фотоприемник. Согласование коэффициентов преобразования каналов возможно только на пучке, когда все элементы детектирующего канала принимают участие в образовании сигнала. Согласование достигается путем изменения коэффициента усиления фотоприемника за счет изменения напряжения смещения. При температуре $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ зависимость коэффициента усиления от напряжения смещения составляет для ЛФД 10%/В, для КФУ 26%/В. Напряжение смещения на фотоприемнике изменяется до тех пор, пока пик амплитудного распределения не сместится в заданный канал АЦП. Преимуществом этого способа является отсутствие этапа предварительного отбора кристаллов и фотоприемников на этапе сборки детектора.

Параметры ФНС:

- регулировка напряжения смещения в диапазоне 200–400 В для ЛФД и 35–70 В для КФУ,

- максимальный выходной ток 1 мА,
- температурная нестабильность выходного напряжения не более 0.1%/°С,
- управление от блока управления,
- сопротивление изоляции между высоковольтными и низковольтными цепями не менее 10 МОм,
- реализация схемы на компонентах для поверхностного монтажа.

Принципиальная схема разработанного блока показана на рис. 5. Задание индивидуальных напряжений смещения осуществляется 8-канальным 12-разрядным ЦАП AD5328DRUZ через блок управления по шине SPI. Формирователь выходного напряжения представляет собой регулятор напряжения, изолированный от выхода с помощью оптоэлектронной пары КРС452. Таким образом осуществляется изоляция высокого напряжения от низковольтных цепей регулирования. На резисторах R_2 , R_3 происходит суммирование напряжений от референсного источника +5 В и выходного напряжения ЦАП. Если на ЦАП подан нулевой код, то на выходе ЦАП формируется нулевое напряжение, в результате на неинвертирующий вход ОУ подается напряжение +2.5 В, а на выходе формирователя появляется напряжение +200 В. Если на ЦАП подается максимальный код, то на выходе блока формируется напряжение +400 В. Эти напряжения используются для работы с ЛФД. Для КФУ минимальное напряжение смещения составляет +35 В, максимальное равно +70 В.

Рис. 5. Принципиальная схема блока формирователя напряжения смещения.

Разработанная схема формирователя имеет высокую надежность, например отключение напряжения +5 В при включенном питании 400 В, не выводит ее из строя.

Процедура согласования коэффициентов преобразования измерительных каналов проводилась на пучке электронов с энергией 1 ГэВ (рис. 6). Для каждого канала измерялась зависимость положения пика от напряжения смещения на ЛФД, равного 320, 340, 360, 380, 395 В. Полученные данные обрабатывались, определялось напряжение смещения, для которого амплитуда сигнала при регистрации частицы с энергией 1 ГэВ попадала в 200-й канал. Для случая, представленного на рис. 6а когда на все каналы подано одно и тоже напряжение смещения, отношение среднеквадратичного отклонения к среднему значению составляло 34%, после выравнивания уменьшилось до 2.6% (рис. 6б).

Рис. 6. Распределение коэффициентов преобразования в измерительных каналах...

2.3. Блок триггера

Триггерные сигналы формируются в аналоговом сумматоре на операционном усилителе MAX4453 из 4 сигналов от фотодетекторов в матрице размером 2×2 . Наличие сигналов в такой матрице означает образование кластера. Всего на карте формируется 8 таких сигналов, которые через разъем P5 поступают в блок определения кластеров (Trigger Regin Units, TRU) [10]. Образование кластера означает, что детектор зарегистрировал фотон. Мюоны не образуют кластеры и, следовательно, в офлайн-обработке такое событие не будет анализироваться. Кроме того, сигнал от блока триггерных сигналов используется TRU для определения энергии зарегистрированной частицы, и при превышении заданного порога вырабатывается триггерный сигнал L_0 .

2.4. Блоки формирователя временной метки и время-цифрового преобразователя

Момент взаимодействия пучков синхронизируется тактовой частотой БАК 40 МГц, которая через систему распределения поступает на все детекторы. Следовательно, момент регистрации частицы в детекторе смещен относительно импульса синхронизации на время пролета, величина которого определяется расположением фотонного спектрометра относительно точки взаимодействия пучков, для различных частиц оно составляет от 15 до 17 нс. Для уверенной идентификации фотонов ошибка измерения (сигма) времени пролета для частиц с энергией 1–2 ГэВ не должна превышать 0.5 нс.

Время регистрации частицы определяется по сигналу на выходе формирователя временной метки (рис. 7), который состоит из фильтра и компаратора ADCMP553BRMZ (Analog Devices) с регулируемым порогом. Порог для каждого канала устанавливается индивидуально от программируемого ЦАП.

Рис. 7. Принципиальная схема формирователя сигнала временной метки.

Сигнал с выхода фотодетектора поступает на вход схемы формирования входного сигнала, которая состоит из дифференцирования на C_1 , R_3 и интегрирования на R_1 , C_3 , одновременно C_3 блокирует срабатывания компаратора от коротких импульсных помех, которые присутствуют на входном плоском кабеле. Сигнальный вход компаратора защищен от перенапряжения диодной сборкой BAV99.

Пороговые напряжения формируются микросхемой AD5328BRUZ, которая содержит 8 ЦАП с преобразованием 12-разрядного кода в максимальное напряжение 5 В (рис. 5). Коды хранятся в регистрах блока управления и переписываются в ЦАП по шине SPI при включении питания карты. Пороговое напряжение подается на инвертирующий вход компаратора через делитель R_2 , R_4 . Делитель на плате располагается рядом с микросхемой компаратора и, с одной стороны, уменьшает наводки с выхода ЦАП, а с другой, – задает максимальный уровень порога.

Компаратор имеет задержку распространения сигнала от входа к выходу 500 пс. Время нарастания выходных импульсов составляет 600 пс, разброс времени переключения в зависимости от амплитуды и скорости нарастания входного импульса не превышает 125 пс.

Для преобразования временного интервала в цифровой код используется микросхема HPTDC, которая была специально разработана для времяпролетных детекторов, участвующих в экспериментах на БАК [11, 12].

Выходные дифференциальные сигналы компаратора в стандарте LVPECL через схему согласования уровней на резисторах R_5 – R_8 поступают на вход HPTDC. На тактовый вход HPTDC поступает сигнал синхронизации БАК с частотой 40 МГц. Встроенный PLL (фазовая автоподстройка частоты) генерирует внутренние опорные сигналы с частотами 320, 160, 80 и 40 МГц. ВЦП может работать в режиме высокого разрешения с шириной канала (ошибкой измерения) 98 пс, среднего разрешения с шириной канала 195 пс и низкого разрешения с шириной канала 781 пс. Во всех этих режимах ВЦП может работать с 32 входными каналами. Также есть режим очень высокого разрешения с шириной канала 24 пс, в котором можно работать только с 8 входными каналами.

Синтезированный PLL-сигнал подается на входы DLL (система автоматической подстройки задержки) и “грубого” 15-разрядного счетчика. “Грубый” счетчик непрерывно инкрементируется по сигналам опорной частоты. DLL формирует несколько задержанных импульсов внутри периода опорной частоты. Когда сигнал временной метки приходит на один из измерительных входов, формируется код времени регистрации, старшие разряды в котором определяются значением “грубого” счетчика в момент регистрации сигнала, а младшие 5 разрядов определяются по сигналам DLL. Таким образом, HPTDC не является старт-стоповым ВЦП, и все его измерительные каналы равнозначны.

HPTDC может работать в триггерном и бестриггерном режимах. В бестриггерном режиме ВЦП формирует и выдает на выход коды на каждый зарегистрированный сигнал на измерительном входе. В триггерном режиме на каждый триггерный сигнал (сигнал, поданный на специальный триггерный вход) формируется посылка, состоящая из служебной информации и всех кодов входных сигналов, зарегистрированных в заданном временном интервале перед триггером. ВЦП позволяет задавать временной интервал, в котором события считаются полезными. Начало временного интервала может быть задержано.

КИЭ имеет 32 входных измерительных канала, поэтому HPTDC устанавливается в режим высокого разрешения, состоящий из 32 входных каналов с шириной канала 98 пс.

В измерениях на тестовых пучках триггерный сигнал формируется стартовым счетчиком и поступает на обработку примерно в то же время, что и сигналы с измерительных каналов. Поэтому для работы HPTDC в триггерном режиме этот сигнал

подается на измерительный вход HPTDC и в блок управления. Блок управления формирует триггерный сигнал для HPTDC, синхронный с входным сигналом и задержанный на необходимое время, а также запускает логику формирования события. В реальном эксперименте триггерным сигналом будет сигнал от триггерной системы ALICE, задержанный на 1200 нс относительно события.

Считывание данных с HPTDC осуществляется по параллельному 32-разрядному интерфейсу.

В лаборатории были измерены собственные шумы карты и определены ошибки измерения времени пролета. Параметры временного канала: RMS шума на входе компаратора составляет 590 мкВ, минимальный порог компаратора равен 1.8 мВ или 4.2 МэВ.

По сравнению с формирователем со следящим порогом предложенная схема с фиксированным порогом проста в реализации и не требует какой-либо настройки. Недостатком схемы является зависимость временного положения метки от амплитуды сигнала, однако эту зависимость можно скорректировать в офлайн-режиме, так как одновременно со временем измеряется амплитуда сигнала. Процедура коррекции описана в работе [13]. Графики зависимости временного разрешения от энергии частицы показаны на рис. 8: верхний график – исходные данные, нижний график – после коррекции на амплитуду сигнала.

Рис. 8. Графики зависимости времени детектирования и временного разрешения от энергии частицы

Измерения проведены на вторичном тестовом пучке протонного синхротрона PS ЦЕРН в 2023 г., использовались КФУ HAMAMATSU S14160-6015. Получено временное разрешение примерно 150 пс для энергии 1 ГэВ, что лучше требования 500 пс в техническом задании. Для ЛФД HAMAMATSU S8664-1010 временное разрешение составило около 400 пс для энергии 1 ГэВ.

2.5. Блок управления

Блок управления выполняет следующие функции:

- сбор данных с АЦП и ВЦП;
- управление микросхемами АЦП и ВЦП – калибровка, настройка режимов работы;
- формирование события и передача данных в программу сбора данных по приходу триггера чтения данных;
- управление ЦАП для установки порогов дискриминаторов и напряжений смещения ЛФД/КФУ;

– управление схемой формирования тактирующих сигналов для АЦП и ВЦП, состоящей из PLL, мультиплексоров и размножителей тактовой частоты.

Блок управления выполнен на ПЛИС XC7K160T-2FFG676 семейства Kintex-7 фирмы Xilinx (AMD). Упрощенная структурная схема прошивки ПЛИС приведена на рис. 9.

Рис. 9. Структурная схема прошивки ПЛИС.

Выходы АЦП соединены с ПЛИС по двухпроводным линиям LVDS, по которым передаются 12-битовые коды данных на входы десериализаторов ПЛИС. Поскольку АЦП работает в режиме 32 входных каналов, а выходных линий всего 16, по каждой линии поочередно передаются коды с двух каналов АЦП. После десериализации коды (данные) каждого канала АЦП поступают на индивидуальные блоки обработки данных АЦП. Каждый такой блок состоит из входного кольцевого буфера, контроллера чтения (сбора данных) АЦП и буфера собранных данных АЦП. Входной кольцевой буфер имеет размер 1024 кодов АЦП, что при используемом периоде дискретизации 25 нс дает время 25.6 мкс. Это определяет максимально возможную задержку триггера чтения, при которой не будет потери сигнала в канале АЦП. Контроллер чтения данных АЦП по приходу триггера чтения переключает заданные коды из входного кольцевого буфера в буфер собранных данных АЦП. Размер этого буфера составляет 65 Кбайт на канал. В этом буфере хранятся определенные данные АЦП вместе со служебной информацией о том, какому триггеру (событию) соответствуют эти данные. Эта информация требуется для контроллера чтения событий.

Микросхема ВЦП (HPTDC) передает временные данные по параллельной 32-битовой шине с частотой 40 МГц. Эти данные имеют структуру и формат, определенные в документации микросхемы HPTDC [12]. В ПЛИС к ним добавляется служебная информация (как и к данным АЦП), необходимая для работы контроллера чтения событий. ПЛИС содержит блок управления HPTDC – JTAG-контроллер, при помощи которого происходят настройка режимов работы, установка времени задержки триггера, окна поиска сигнала и других параметров. Также JTAG-контроллер периодически считывает статусы HPTDC.

Контроллер чтения данных формирует пакеты данных, содержащие все данные АЦП и ВЦП, относящиеся к конкретному триггеру. Сформированный пакет данных передается в блок взаимодействия с сетью Ethernet. В этом блоке формируются пакеты протоколов UDP/IP и организуется очередь для передачи по сети Ethernet на сервер для дальнейшей обработки. Сетевой стек реализован на ПЛИС, он обеспечивает потоковую передачу данных с контролем целостности и подтверждением доставки.

По сети Ethernet передаются данные, также ПЛИС получает конфигурации работы всех периферийных устройств – АЦП, ЦАП, HPTDC, PLL. Кроме того, для некоторых устройств есть конфигурация “по умолчанию”, которая записывается в них при старте

работы ПЛИС (например, для PLL и HPTDC). Для взаимодействия с периферийными устройствами используются различные интерфейсы: JTAG для HPTDC, SPI для АЦП, ЦАП и PLL.

2.6. Блок низковольтных источников питания

Применяются отдельные источники питания для аналоговых и цифровых схем, что уменьшает влияние цифровых помех на аналоговые сигналы. В качестве источников питания используются линейные регуляторы с низким падением напряжения (Low Drop Out, LDO). Поскольку КИЭ работает в магнитном поле, запрещено использовать импульсные источники питания с дросселями. По той же причине запрещено использовать дроссели в фильтрах питающего напряжения.

Блок питания подключен к разъему Р6, на который поступают напряжения +3.3 В для питания цифровых схем, +3.3 В для питания АЦП, +4 В для питания спектрометрических усилителей, компараторов и ВЦП, +6 В для питания ФНС и блока триггеров. Напряжения +13 В и –6 В используются для питания зарядочувствительных предусилителей.

2.7 Программное обеспечение для тестирования КИЭ

КИЭ подключается к управляющему компьютеру по локальной сети 10G Ethernet через модуль SFP+, установленный в разъем на карте. На компьютер, работающий под Linux Fedora, для управления картой и чтения данных устанавливаются следующие программы:

1. *afi-phos-fec* – эта программа позволяет настраивать параметры АЦП и HPTDC в графическом окне, в частности, позволяет выбирать измерительные каналы для чтения данных, она также устанавливает пороги компараторов и величины напряжения смещения для фотодетекторов;
2. *afi-mpd-evb* – эта программа управляет записью данных, выбором папки и файла, она также передает отдельный поток данных в мониторную программу *afi-viewer*;
3. *afi-viewer* – эта программа позволяет просматривать поток данных и рисовать предварительно настроенные гистограммы и осциллограммы, можно подключаться либо к мониторному выходу программы *afi-mpd-evb*, либо напрямую к программе *afi-phos-fec*.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

После двух модернизаций большого адронного коллайдера (ЦЕРН), которые увеличили светимость и энергию пучков, потребовалось модернизировать существующую КИЭ фотонного спектрометра. Для получения новых физических данных необходимо было

увеличить диапазон регистрируемых энергий от 100 до 200 ГэВ и уменьшить ошибку при измерении времени пролета с 8 до 0.5 нс для энергии 1 ГэВ, что должно улучшить идентификацию прямых фотонов.

Разработанная карта измерительной электроники удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к измерительной электронике фотонного спектрометра, обеспечивая динамический диапазон измерения энергий от 3 МэВ до 200 ГэВ и ошибку измерения времени пролета 150 пс для энергии 1 ГэВ. Эти характеристики карты были измерены в трех сеансах на тестовых пучках электронов PS/SPS (ЦЕРН) в 2022–2024 гг. Измерения проводились с лавинными фотодиодами и кремниевыми фотоумножителями в качестве фотодетекторов.

Модернизированная карта по физическому размеру и типу разъемов повторяет существующую карту фотонного спектрометра и может быть установлена в детектор без каких-либо механических переделок.

БЛАГОДАРНОСТИ

Выражаем благодарность А.С. Водопьянову (ОИЯИ, Дубна) за помощь в изготовлении прототипа КИЭ, М.С. Ипполитову (НИЦ “Курчатовский институт”, Москва) за организацию измерений характеристик прототипа КИЭ на пучке PS (ЦЕРН) и И.А. Руфанову (ОИЯИ, Дубна) за обработку экспериментальных данных для получения энергетического и временного разрешений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *ALICE Collaboration, Dellacasa G. et al.* ALICE technical design report of the photon spectrometer (PHOS). CERN-LHCC-99-04.
2. *Muller H., Budnikov D., Ippolitov M. et al.* // Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A. 2006. V. 567. P. 264. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2006.05.104>
3. *Yin Z., Muller H., Pimenta R., Röhrich D., Sibiriak I., Skaali B., Wang D., Wang Y., Zhou D.* // Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A. 2010. V. 623. P. 472. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2010.03.040>
4. *Bosch R. E., de Parga A. J., Mota B., Musa L.* // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2003. V. 50. P. 2460. <http://doi.org/10.1109/TNS.2003.820629>
5. *Blau D. and on behalf of ALICE collaboration* // J. Phys. Conf. Ser. V. 1690. P. 012044. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1690/1/012044>
6. *Zhang F., Awes T., Silvermyr D. et al* // Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A. 2014. V. 735. P. 157. <http://doi.org/10.1016/j.nima.2013.09.023>

7. *Сибиряк Ю. Г.* Дис. ...канд. физ.-мат. наук. М.: РНЦ “Курчатовский Институт”, 2010.
8. *Ippolitov M., Manko V., Sibiriak I., Klovning A. et al.* // Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A. 2005. V. 550. P. 169. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2005.03.174>
9. *Балыгин К.А., Ипполитов М.С., Номоконов П.В., Сибиряк Ю.Г. и др.* // ПТЭ. 2018. № 5. С. 13. <https://doi.org/10.1134/S003281621804016X>
10. *Kral J., Awes T., Muller H. et al.* // Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A. 2012. V. 693. P. 261. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2012.06.065>
11. *Mota M., Christiansen J.* // IEEE J. Solid State Circuits. 1999. V. 34. P. 1360. <https://doi.org/10.1109/4.792603>
12. https://tdc.web.cern.ch/TDC/hptdc/docs/hptdc_manual_ver2.2.pdf
13. *Ippolitov M., Nomokonov P., Sibiriak I. et al.* // Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A. 2009. V. 598. P. 702. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2008.10.003>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Функциональная блок-схема КИЭ фотонного спектрометра.
- Рис. 2.** Вид платы КИЭ.
- Рис. 3.** Принципиальная схема одного измерительного канала БСУ: НУ – дифференциальный выход канала с низким усилением, ВУ – дифференциальный выход канала с высоким усилением.
- Рис. 4.** Сигналы на выходе БСУ: **а** – сигнал от ЛФД, энергия 5 ГэВ; **б** – сигнал от КФУ, энергия 2 ГэВ.
- Рис. 5.** Принципиальная схема блока формирователя напряжения смещения. В скобках указаны величины сопротивлений и напряжения для работы с КФУ.
- Рис. 6.** Распределение коэффициентов преобразования в измерительных каналах до (**а**) и после (**б**) процедуры согласования.
- Рис. 7.** Принципиальная схема формирователя сигнала временной метки.
- Рис. 8.** Графики зависимости времени детектирования и временного разрешения от энергии частицы: верхний график – исходные данные, нижний график – после коррекции на амплитуду сигнала.
- Рис. 9.** Структурная схема прошивки ПЛИС.

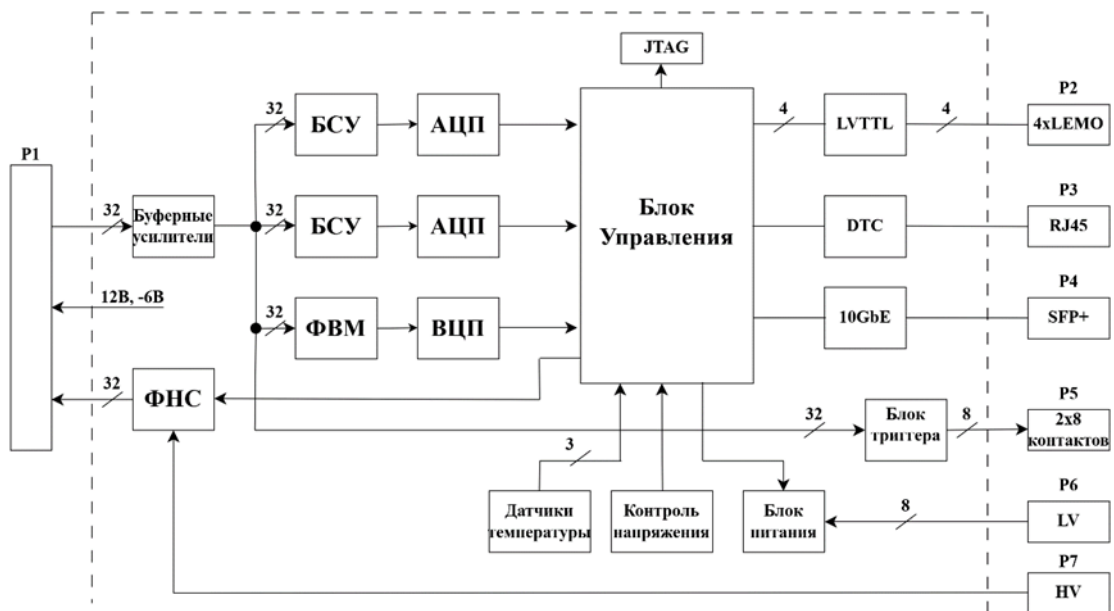


Рис. 1

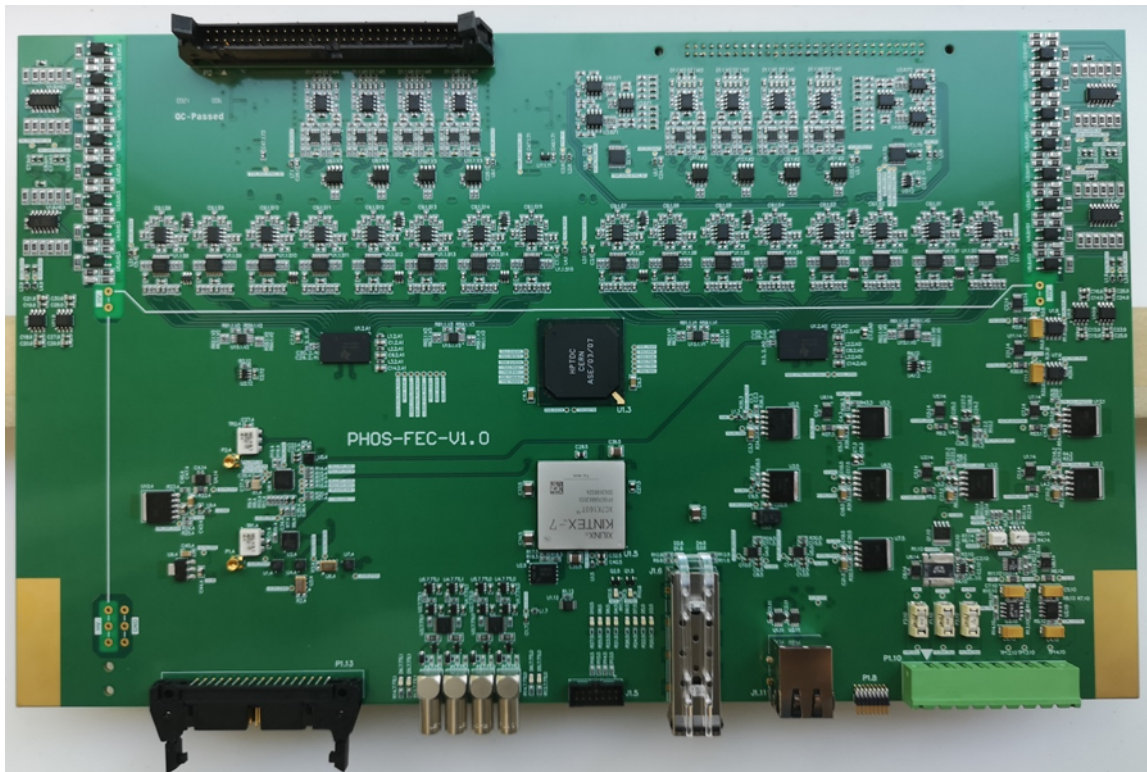


Рис. 2

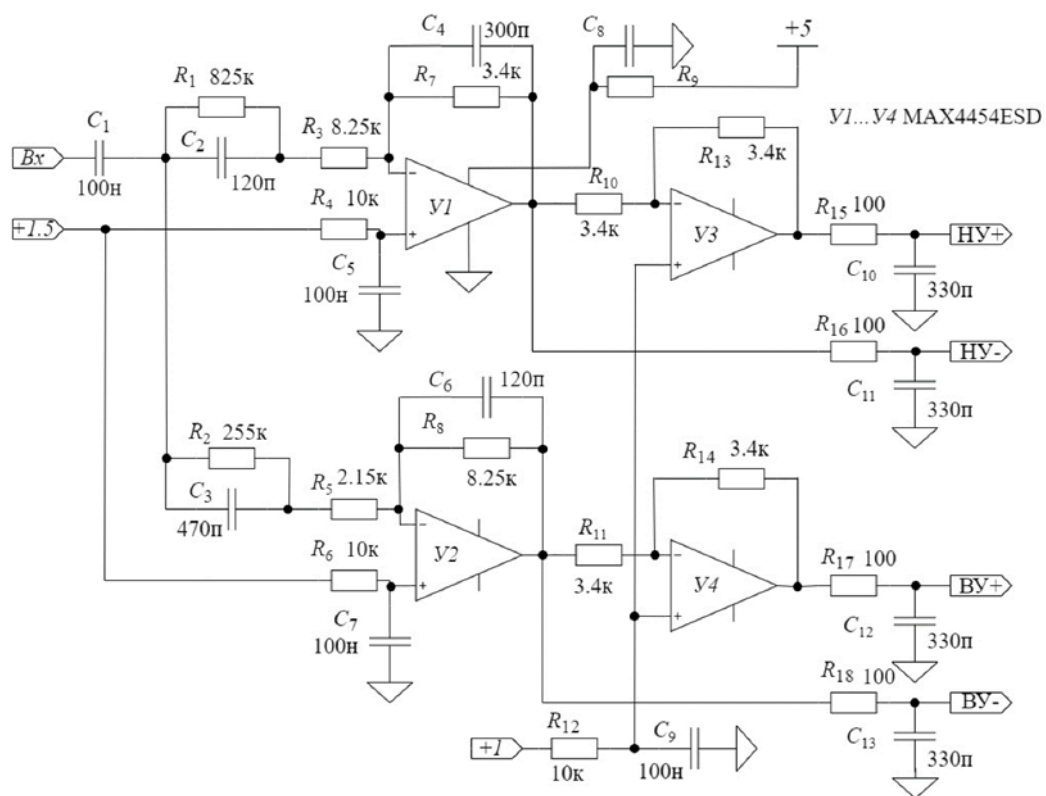


Рис. 3

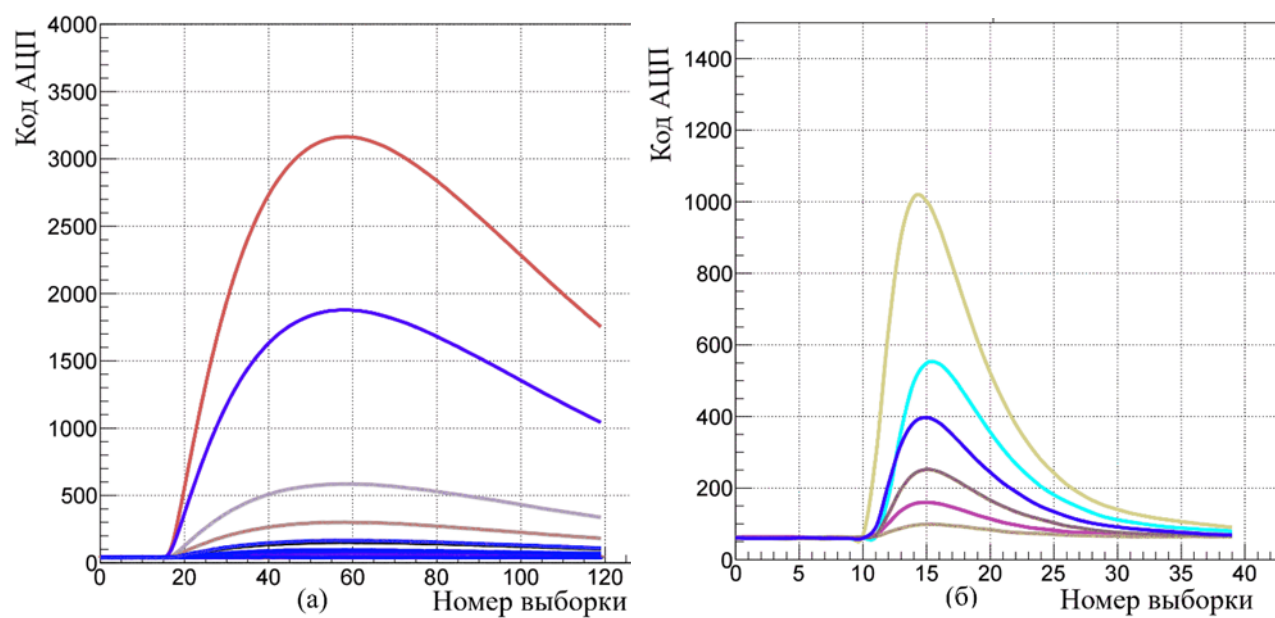


Рис. 4

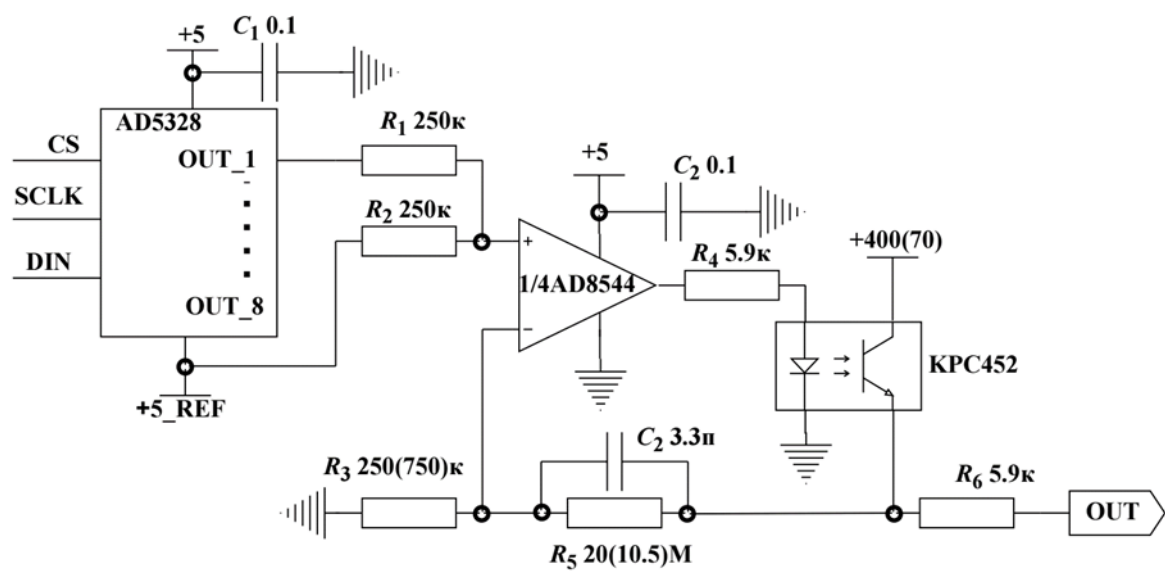


Рис. 5

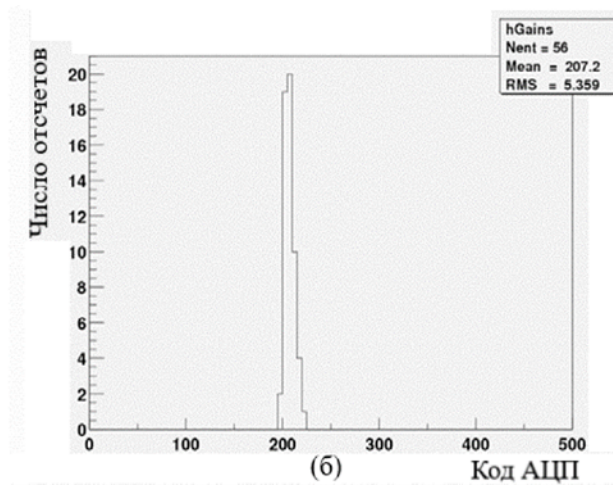
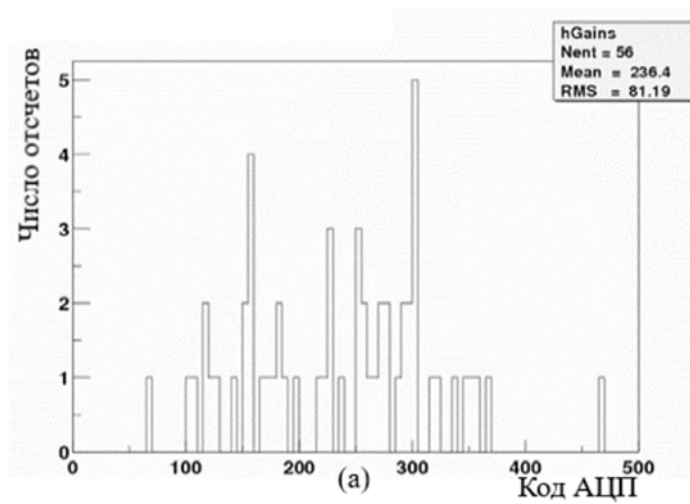


Рис. 6

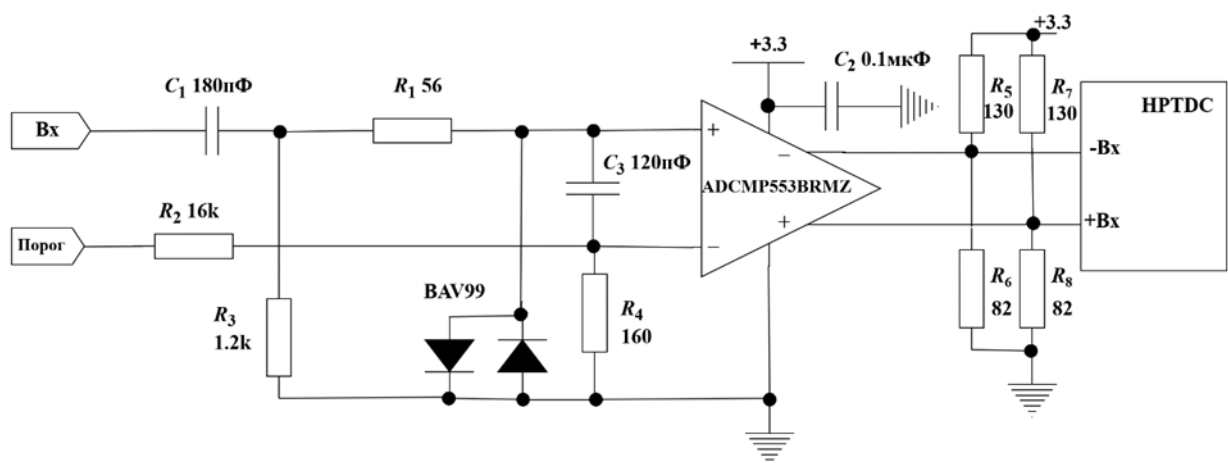


Рис. 7

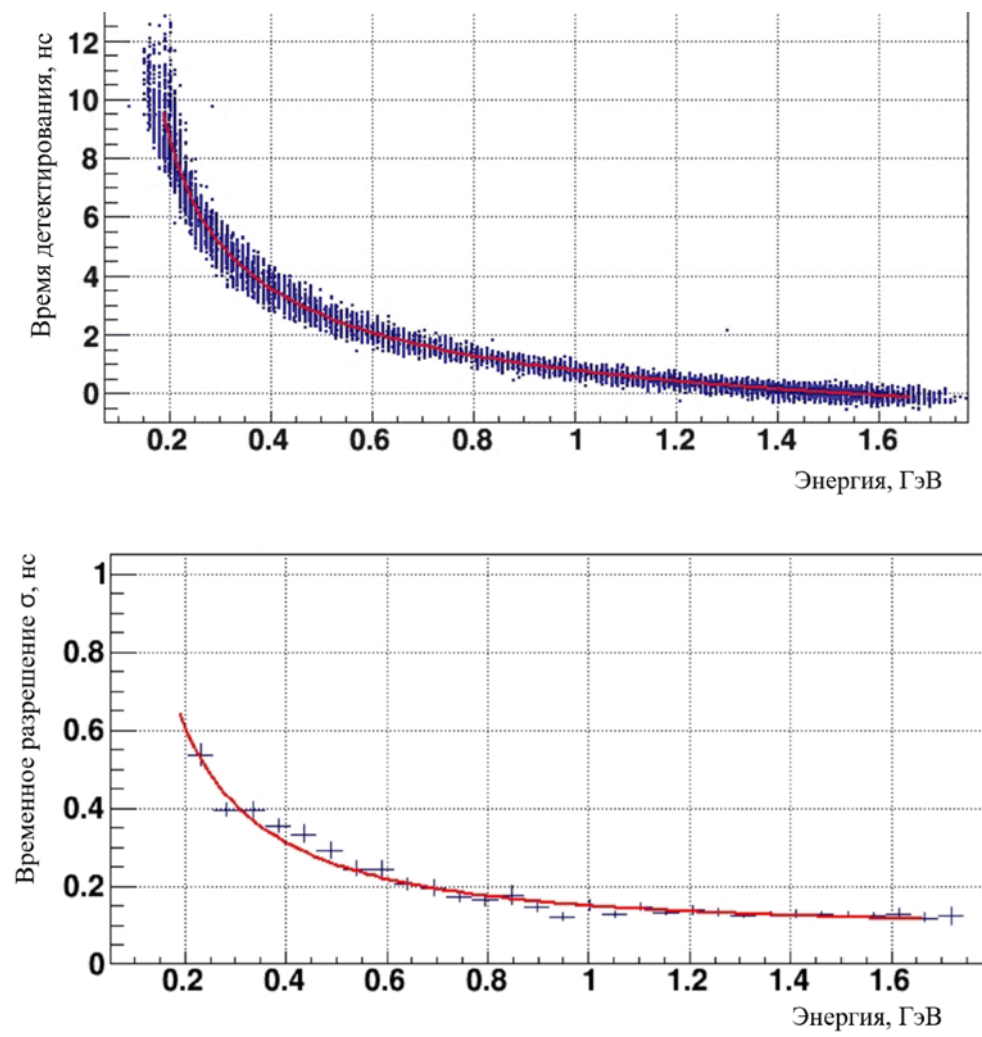


Рис. 8

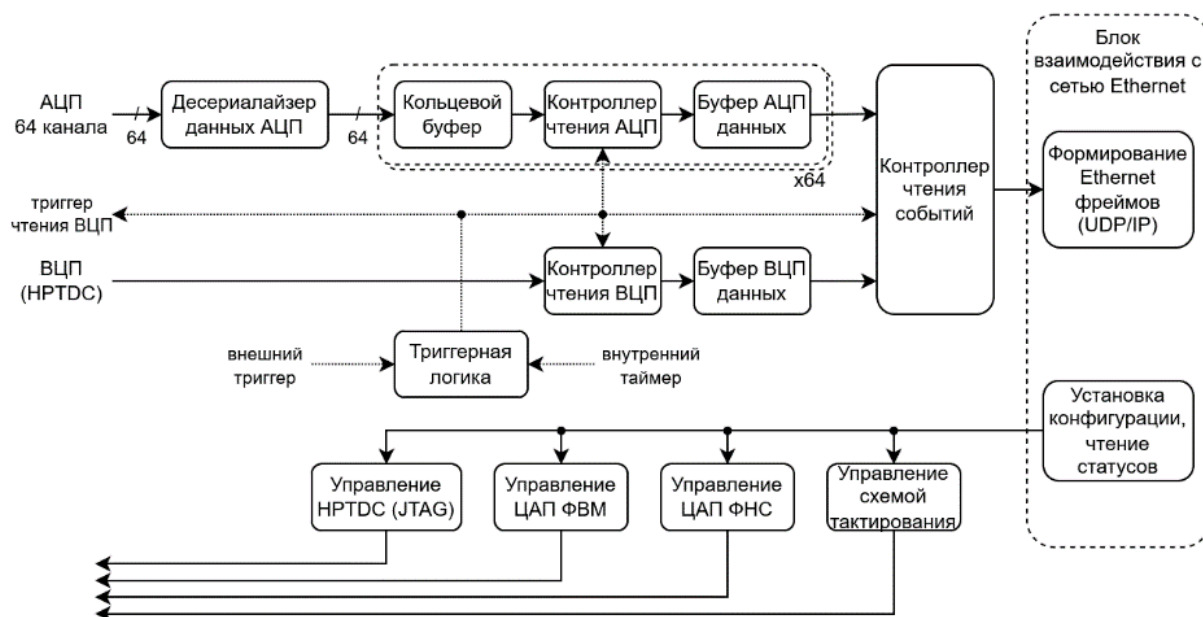


Рис. 9.