

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 539.1.074.2 + 621.3.087

НОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА ТРЕКОВОЙ СИСТЕМЫ СФЕРИЧЕСКОГО
НЕЙТРАЛЬНОГО ДЕТЕКТОРА НА ВЭПП-2000

©2025 г. В. Н. Жабин^{a,b,*}, М. Н. Ачасов^{a,b}, А. Г. Богданчиков^a,
А. А. Ботов^a, В. П. Дружинин^a, В. В. Жуланов^{a,b}, А. А. Король^{a,b},
А. П. Крюков^a, А. Е. Образовский^a, К. В. Пугачев^{a,b}, А. И. Текутьев^a,
Ю. В. Усов^a, А. Г. Харламов^{a,b}

^a *Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера*

Сибирского отделения Российской академии наук

Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

^b *Новосибирский государственный университет*

Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

**e-mail: V.N.Zhabin@inp.nsk.su*

Поступила в редакцию 02.04.2025 г.

После доработки 29.05.2025 г.

Принята к публикации 09.06.2025 г.

Для оцифровки сигналов с трековой системы Сферического нейтрального детектора, установленного на коллайдере ВЭПП-2000 в ИЯФ СО РАН, была разработана и в 2022 году установлена новая электроника. Она основана на параллельных АЦП и ПЛИС и обеспечивает частоту оцифровки сигнала около 200 МГц с разрешением 12 битов. Данные передаются с каждой платы в систему сбора данных по сети Ethernet с пропускной способностью 1 Гб/с. Благодаря этому новая электроника значительно превосходит предыдущую по максимальной скорости записи событий. Новая электроника позволяет записывать события на скорости до 1.5 кГц. Для извлечения амплитуды и времени срабатываний был разработан специальный алгоритм обработки осциллограмм. С 2023 года с новой электроникой ведется набор данных. Измеренное разрешение по параметрам реконструированных треков соответствует следующим требованиям: 0.82° по полярному и 0.38° по азимутальному углам.

1. ВВЕДЕНИЕ

Эксперимент со Сферическим нейтральным детектором (СНД) [1] проводится на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-2000 [2] с 2010 г. Коллайдер ВЭПП-2000 работает в диапазоне энергии в системе центра масс от 0.3 до 2 ГэВ. В нем используется оптика “круглых пучков” [3], которая позволяет достичь рекордной светимости в одногустковом режиме. В период с 2014 по 2016 гг. была проведена модернизация ускорительного комплекса ВЭПП-2000, основной целью которой был переход на новый источник электронов и позитронов – инжекционный комплекс ВЭПП-5 [4]. После модернизации, устранившей дефицит позитронов, на ВЭПП-2000 была достигнута светимость $0.9 \cdot 10^{32} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ при энергии пучка 950 МэВ. При этом суммарный ток электронов и позитронов в коллайдере составлял около 0.5 А.

Сферический нейтральный детектор – это универсальный немагнитный детектор, основной частью которого является трехслойный сферический электромагнитный калориметр на основе кристаллов NaI(Tl). Для измерения параметров заряженных частиц в детекторе используется трековая система (ТС). Идентификация заряженных каонов осуществляется с помощью аэрогелевого черенковского счетчика [5]. Для защиты от космических частиц и идентификации мюонов детектор окружен мюонной системой, состоящей из пластиковых сцинтилляционных счетчиков и пропорциональных трубок. Основной задачей экспериментов на детекторе СНД является прецизионное измерение различных сечений аннигиляции e^+e^- в адроны.

Сферический нейтральный детектор осуществляет набор данных в условиях высоких фоновых загрузок от частиц, выбывающих из пучка. Например, скорость счета трековой системы $f_{ТС}$ во время набора данных составляет от 100 до 200 кГц. Для проведения прецизионных измерений сечений необходимо, чтобы основной отбор событий изучаемых процессов проводился после их реконструкции, а требования при аппаратном отборе в системе первичного триггера должны быть предельно мягкими. Это достигается при скоростях счета первичного триггера порядка 1 кГц. Электроника и система сбора данных детектора должны обеспечивать считывание событий с частотой 1 кГц с малым мертвым временем.

Высокая фоновая нагрузка детектора приводит также к тому, что заряженные частицы и фотоны от пучкового фона могут накладываться на события изучаемых процессов.

Вероятность появления дополнительного ложного трека в событии достигает 20% при $f_{TC} = 200$ кГц, а дополнительного фотона – 10%. Для подавления ложных срабатываний каналов детектора может использоваться информация о времени прихода сигнала и его форме. Поэтому для оцифровки сигналов с детектора предпочтительно использовать электронику на основе параллельных АЦП (далее – АЦП).

Электроника детектора, используемая в начальный период набора данных (2010–2018 гг.) [6, 7], не в полной мере соответствовала высокой нагрузке детектора. Так, в эксперименте 2018 г. потери событий за счет мертвого времени электроники при скорости счета первичного триггера 1 кГц составляли 15–20%. Поэтому в 2019 г. началась модернизация электроники детектора: была проведена замена оцифровывающей электроники калориметра на модули Z24 [8], выполненные на основе параллельных АЦП и ПЛИС. Считывание данных с Z24 проводится через Ethernet со скоростью 1 Гб/с. Также это позволило улучшить временное разрешение калориметра (до уровня порядка 1 нс) и увеличить пропускную способность системы сбора данных (ССД). После данной модернизации частоту записи событий стала ограничивать оцифровывающая электроника трековой системы. Это вызвало необходимость разработки новой электроники для трековой системы, основанной на той же технологии, что и для каналов калориметра.

2. ТРЕКОВАЯ СИСТЕМА

Трековая система используется для регистрации треков заряженных частиц. Для них измеряются координаты вершины и углы вылета, а также ионизационные потери, используемые для идентификации частиц.

Трековая система представляет собой цилиндрическую девятислойную дрейфовую камеру (ДК) и однослойную пропорциональную камеру (ПК) в общем газовом объеме [9, 10]. Она расположена непосредственно вокруг места встречи пучков сразу за вакуумной камерой. Съём сигналов (рис. 1) производится с концов (далее называемых левым и правым) 216 сигнальных проволочек ДК и 288 катодных полосок, расположенных на внутренней поверхности ДК и внешней поверхности ПК. Шаг полосок равен 6 мм. Каждая полоска покрывает азимутальный угол 90° . При этом сигнал на внутренние полоски наводится (емкостно) с первого слоя ДК, а на внешние – из ПК.

Рис. 1. Схема подключения электроники трековой системы

Дрейфовая камера состоит из 24 ячеек струйного типа, каждая из которых содержит 9 вольфрамовых анодных проволочек диаметром 15 мкм (20 мкм в первом слое), покрытых золотом. Объем камеры заполнен газовой смесью, содержащей 90% Ar и 10% CO₂, при атмосферном давлении с характерным газовым усилением $5 \cdot 10^5$.

Дрейфовая камера покрывает 94% полного телесного угла и имеет разрешение 0.4° по азимутальному углу и 0.8° по полярному. Положение трека в проекции на плоскость $R\phi^1$ определяется по времени дрейфа, измеряемому по задержке сигнала с проволочек ДК, а в плоскости RZ – по амплитудам сигналов с концов проволочек ДК методом зарядового деления (формула (1)) и по центру тяжести кластеров сработавших катодных полосок.

3. ЭЛЕКТРОНИКА ТРЕКОВОЙ СИСТЕМЫ

С момента начала работы детектора СНД на ВЭПП-2000 в 2010 г. оцифровка сигналов с проволочек ДК осуществлялась с помощью плат T2AM [9, 11]. Плата оцифровывала сигналы с четырех проволочек и содержала 8 АЦП разрядностью 10 битов с частотой оцифровки 40 МГц. Для каждого из событий, прошедших через первичный триггер, записывались осциллограммы² длиной 32 отсчета. Для измерения времени дрейфа сигналы с двух концов проволочки суммировались и поступали на дискриминатор. Интервал времени между срабатыванием дискриминатора и сигналом первичного триггера измерялся с шагом 1.3 нс.

Всего для сбора сигналов с 216 сигнальных проволочек использовались 54 платы T2AM. Платы объединялись группами по 9 штук и устанавливались в крейты “Клюква” [12] таким образом, что два соседних крейта соответствовали трем слоям дрейфовой камеры. Данные с каждой из групп считывались через процессор ввода-вывода (ПВВ) [11], подключенный к сети Ethernet со скоростью 100 Мб/с. Именно ПВВ ТС ограничивали скорость чтения событий в ССД после модернизации электроники калориметра.

Измерение сигналов с катодных полосок ТС ранее осуществлялось с помощью плат A24M [11], которые в 2019 г. были заменены на платы Z24 [8]. Для полосочных каналов эти платы обеспечивают запись на каждое срабатывание осциллограммы длиной 28 отсчетов разрядностью 12 битов.

-
- 1 Здесь и далее используется следующая система координат: ось Z направлена вдоль оси пучков ВЭПП-2000, плоскость $R\phi$ перпендикулярна оси пучков, а плоскость RZ (в которой лежит трек частицы) параллельна оси пучков.
 - 2 Здесь и далее под осциллограммой понимается непрерывная последовательность оцифрованных данных, считанных с АЦП, для одного из каналов в событии.

Для оцифровки сигналов с проволочек ТС была разработана плата T200 (рис. 2) на основе микросхемы Zynq Z7030 и 8 АЦП AD9230. Входной сигнал после дифференциального усилителя AD8130 с полосой пропускания до 270 МГц подается на АЦП AD9230, работающий на частоте $15 f_{RF} \approx 184$ МГц, синхронизированной с частотой обращения пучков в ВЭПП-2000 ($f_{RF} = 12.290 \pm 0.002$ МГц). Тактовая частота $15 f_{RF}$ формируется тактовым генератором AD9517-0 с фазовой подстройкой частоты (ФАПЧ). Для сохранения промежуточных результатов оцифровки плата оборудована памятью DDR3 SDRAM объемом 512 Гбайт. Передача данных в систему сбора данных производится через Ethernet-контроллер со скоростью 1 Гб/с 88E116R-NNC1, установленный на каждой плате. Это позволяет реализовать параллельное чтение данных с каждой из плат и, таким образом, увеличить пропускную способность ССД.

Рис. 2. Схема оцифровывающей платы трековой системы СНД T200.

Интегральная микросхема Zynq Z7030 представляет собой *Систему-на-кристалле*, включающую программируемую логическую интегральную схему (PL) и двухъядерный центральный процессор (ЦПУ) Cortex-A9 архитектуры ARMv7-A, работающий на тактовой частоте до 666.7 МГц. На процессорном модуле (PS) запускается операционная система с ядром Linux. Для хранения образа операционной системы (ОС) на плате установлена NOR-флеш-память объемом 64 МБ.

Задачей дизайна ПЛИС (рис. 3) является запись в режиме реального времени данных с АЦП в циклический буфер, из которого по приходу сигнала первичного триггера проводится выборка отсчетов по задаваемым пользователем смещению и длине для формирования осциллограммы события. Для повышения надежности работы системы в случае малого интервала между триггерными сигналами в ПЛИС реализована очередь триггерных сигналов, в которую записываются смещения циклического буфера на момент прихода сигнала триггера. После выборки отсчетов, соответствующих осциллограмме, производится подавление нулей по программируемому порогу (*Порог на чтение*). Сформированные осциллограммы событий записываются в промежуточный буфер событий. В случае, если буфер событий заполнен выше определенного порога, выставляется сигнал на шине *Почти полон*, блокирующий обработку входящих триггерных сигналов для предотвращения перезаписи данных, уже записанных в буфер. Порог заполнения выбирается таким образом, чтобы при обработке триггерных сигналов, уже находящихся в очереди, не возникло

переполнения буфера. Специальный загрузчик, работающий асинхронно относительно предыдущих этапов, копирует данные из промежуточного буфера в специальный буфер событий, находящийся в блочной памяти (BRAM), из которого они асинхронно читаются пользовательской программой *Сервер*, запущенной на ЦПУ. Наличие промежуточного буфера событий позволяет увеличить пропускную способность благодаря разделению этапа, привязанного к триггерным сигналам, и этапа переноса данных из программируемой логики (PL) в процессорную систему (PS). Также в будущем это позволит реализовать в ПЛИС обработку или сжатие данных осциллограммы³, при этом загрузчик будет добавлять результаты обработки к данным событий.

Рис. 3. Логическая схема работы Zynq Z7030

Входящая опорная частота с комплекса ВЭПП-2000 $f_{RF} \approx 12.29$ МГц умножается для получения частоты $3 f_{RF} \approx 36.87$ МГц, которая раздается по шинам в крейтах “Клюква” на все платы, считывающие аналоговые сигналы с каналов детектора. Это необходимо для синхронизации чтения событий в разных системах детектора с моментами столкновения пучков в коллайдере. Поскольку частота выборки АЦП составляет $15 f_{RF} \approx 184.4$ МГц, для умножения опорной частоты, поступающей на плату с шины крейта, используется тактовый генератор AD9517-0 с ФАПЧ. Каждый из восьми дифференциальных выходов тактового генератора используется для тактирования одного из восьми АЦП.

Помимо оцифровки входящих сигналов, другой функцией платы T200 является выработка сигналов для *Логики слоев* трековой системы, являющейся частью системы первичного триггера. Сигнал для триггера вырабатывается, если оцифрованный уровень входного сигнала превышает программно задаваемый порог (*Порог на триггер*). Реализация дизайна ПЛИС дает возможность задавать пороги индивидуально на каждый измерительный канал, что позволило повысить их стабильность, а также в ходе эксперимента использовать пороги, вычисляемые ежесуточно на основе измеренных уровней шумов в отдельных каналах.

3 Например, аналогичные тем, что реализованы на данные момент программно и описаны в следующих разделах.

4. СБОР ДАННЫХ С ТРЕКОВОЙ СИСТЕМЫ

На процессорном модуле, входящем в состав Zynq Z7030, запускается ОС PetaLinux, использующая ядро Linux и разработанная специально для встраиваемых систем на основе Xilinx. Образ файловой системы с ОС загружается из флеш-памяти.

В пользовательском пространстве ОС работает специальная программа *Сервер*, загружаемая на плату по сети специальным загрузчиком, записанным вместе с ОС во флеш-память, для возможности оперативного ее обновления. Программа принимает сетевое подключение по протоколу SCTP/IP [13], которое используется для приема команд от ССД (в том числе *старт/стоп* чтения данных и сброс счетчика событий) и для отправки осциллограмм в ССД. В качестве SCTP-клиента к плате подключаются либо процесс сбора данных (*Readout*), либо калибровочные программы, например программа генераторной амплитудной калибровки. Также ОС может принимать подключения по протоколу SSH, которые используются для ручной настройки платы и выполнения некоторых сервисных операций, таких как перезагрузка. Программа *Сервер* после получения команды *Старт* в цикле запускает опрос специального регистра ПЛИС, в котором находится маска заполнения позиций в буфере событий в BRAM (рис. 3). В каждой позиции буфера, помимо прочитанной с АЦП осциллограммы, находятся также номер события (порядковый номер триггерного сигнала, по которому фрагмент данных был записан в буфер событий) и номер канала платы. Обнаруживая взведенный бит в маске, программа копирует данные из соответствующей позиции в буфере в оперативную память (ОЗУ), после чего сбрасывает соответствующий бит маски, что служит командой логике ПЛИС, что данная позиция в буфере вновь свободна для записи.

Скорость передачи данных ограничивается как собственной пропускной способностью отдельной платы, так и скоростью передачи данных по сети. В специальных опытах с использованием сигнала калибровочного генератора в качестве сигнала триггера достигнута пропускная способность одной платы около 10 Мб/с, что близко к аналогичному показателю у оцифровывающих плат других систем детектора, в том числе Z24. Полученное значение позволяет обрабатывать значительные загрузки (при условии, что вычитывание ССД будет успевать). Если скорость сбора данных в плате выше, чем скорость их передачи по сети, то со временем происходит переполнение буфера платы, что приводит к потере данных.

Пропускная способность системы сбора данных ограничена главным образом из-за того, что сборка событий и сохранение данных реализованы в однопоточном процессе *Readout*. С кратковременными всплесками загрузок позволяет справиться сетевая буферизация на различных этапах передачи данных за счет разравнивая потока данных по времени. С более длительными перегрузками, которые происходят периодически и длятся 5–10 минут и более, этого становится недостаточно, и события теряются. Эта проблема была решена путем ограничения частоты записи событий с помощью блока “ограничитель загрузок”, установленного в схему запуска аппаратного триггера. Благодаря этому система сбора данных СНД при любых нагрузках в различных режимах работы ВЭПП-2000 стала работать без потерь данных при условии, что частота срабатываний первичного триггера не превышает 1.5 кГц.

Перед сбором и построением событий данные с электроники СНД могут проходить предварительную программную обработку в компьютерной подсистеме *proxy*-серверов, настраиваемую индивидуально для каждой платы. Для обработки данных с плат T200 используется сжатие данных с помощью алгоритма сжатия без потерь (BRIE, Bit Ranges Identify and Extract), специально разработанного для обработки оцифрованных сигналов с детектора СНД. Алгоритм выделяет однотипные составляющие сигнала, ищет области со схожими диапазонами значений и кодирует их с минимально возможной разрядностью. В случае данных с трековой системы достигается сжатие данных примерно в три раза. Таким образом, использование *proxy*-серверов уменьшает общий поток данных, поступающих в процесс *Readout*, а также обеспечивает дополнительную буферизацию данных.

5. КАЛИБРОВКА ТРЕКОВОЙ СИСТЕМЫ

Для повышения разрешения и устранения систематических сдвигов при реконструкции треков выполняются следующие калибровки трековой системы: амплитудная генераторная калибровка проволочек ДК, абсолютная калибровка z -координат проволочек и калибровка “расстояние – время дрейфа”.

С учетом калибровочных коэффициентов z -координата точки срабатывания проволочки определяется из амплитуд сигнала в левом и правом каналах, A_L и A_R , по методу деления заряда как

$$z = Z + L\hat{z}, \quad (1)$$

где

$$\hat{z} = \frac{g_L A'_L - g_R A'_R}{A'_L + A'_R}, A'_{L,R} = \frac{A_{L,R}}{a_{L,R}},$$

$a_{L,R}$ – коэффициенты, пропорциональные коэффициентам усиления в каналах электроники перед АЦП,

$$g_{L,R} = \frac{1}{2} + \frac{R_{\text{вход}}^{L,R}}{R_{\text{пров}}}$$

– коэффициенты, характеризующие входное сопротивление предусилителей $R_{\text{вход}}$ относительно сопротивления проволоочки $R_{\text{пров}}$, Z и L – координата центра и длина проволоочки, определяемые абсолютной калибровкой z -координат. Коэффициенты $a_{L,R}$ и $g_{L,R}$ определяются с помощью генераторной калибровки путем подачи генераторных импульсов различной амплитуды по отдельности на левый и правый концы проволоочки (см. схему на рис. 1).

Абсолютная калибровка z -координат проволоочек строится по экспериментальным данным, для чего используются события процесса рассеяния $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$. Берутся реконструированные треки, в которых помимо срабатываний проволоочек ДК есть срабатывания полосок на внутреннем и внешнем катодах. Затем параметры трека (угол θ от оси Z и точка z_0 пересечения с осью пучков – в проекции на плоскость RZ) рассчитываются повторно по полоскам без учета проволоочек. Далее по зависимости величины \hat{z} для срабатываний проволоочек от точки пересечения реконструированным треком радиуса соответствующего слоя ДК строится линейная функция, коэффициентами которой и являются параметры Z и L . Процедура выполняется для каждой проволоочки ДК в отдельности. На начальном этапе для реконструкции треков использовались значения параметров $Z = 0$ и L , равное длине проволоочки.

Калибровка “расстояние – время дрейфа” служит для перевода времени дрейфа t , полученного из осциллограммы, в расстояние r от трека до проволоочки [14]. Для построения функции $r(t)$ строится распределение срабатываний в каждом из девяти слоев дрейфовой камеры по переменной t , после чего строится функция $r(t)$ в виде сплайна, которая переводит его в распределение, равномерное в интервале $0 \leq r < r_{\text{max}}$, где r_{max} – максимальное расстояние для данного слоя, соответствующее размеру дрейфовой ячейки. Для каждого слоя ДК функция $r(t)$ строится в отдельности, так как размеры ячейки и напряженности электрических полей различаются от слоя к слою.

6. АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ОСЦИЛЛОГРАММ

Для каждого срабатывания проволоочки ТС оцифровывающая плата T200 записывает две осциллограммы сигналов с правого и левого концов проволоочки, каждая из которых содержит 200 отсчетов, что соответствует интервалу времени 1.085 мкс. Алгоритм обработки осциллограмм должен определить амплитуды сигналов с левого и правого концов проволоочки, A_L и A_R , для вычисления z -координаты методом зарядового деления (см. формулу (1)), и суммарную амплитуду $A_{dE/dx}$ для определения величины ионизационных потерь dE/dx . Также алгоритм должен извлечь положение фронта сигнала в осциллограмме, необходимое для вычисления времени дрейфа ионизации до проволоочки.

Осциллограмма содержит пьедестал (базовый уровень), который определяется по бинам осциллограммы, не содержащим полезного сигнала. При этом амплитуды A_L и A_R должны иметь максимально точное отношение A_L/A_R , так как именно оно входит в формулу (1), а их общий множитель сокращается. В свою очередь, амплитуда $A_{dE/dx}$ должна представлять собой интеграл под кривой сигнала, полученного сложением левого и правого каналов.

Для уменьшения влияния низкочастотных синусоидальных наводок⁴ (с периодом порядка 1 мкс) был использован следующий подход. Пьедесталы $P_{L,R}$ определяются по $n_{pds} = 30$ бинам⁵ перед фронтом сигнала, а амплитуды $A_{L,R}$ сигнала получаются суммированием $n_{sgn} = 30$ бинов в области максимума сигнала. Указанные области осциллограммы, по которым вычисляются пьедестал и амплитуда сигнала, далее обозначаются как $B_{pds}^{L,R}$ и B_{sgn} , соответственно. При этом область B_{sgn} одинаковая для левого и правого каналов, а области $B_{pds}^{L,R}$ могут различаться. Использование только части бинов осциллограммы, содержащих полезный сигнал, позволяет использовать бины с наибольшей амплитудой, в которых относительный вклад наводки меньше. Выбор интервала в 30 бинов, соответствующий двум периодам обращения пучков, позволяет подавлять высокочастотную наводку с частотой, близкой к частоте обращения. Алгоритм восстанавливает переполюсовки АЦП в области пика для сигналов большой амплитуды при вычислении $A_{dE/dx}$ и исключает отрицательную наводку перед фронтом сигнала от сигналов с соседних проволоочек из $B_{pds}^{L,R}$.

4 Наиболее вероятным источником наводок на трековую систему являются импульсные блоки питания корректирующих линз ВЭПП-2000.

5 *Бином* здесь и далее называется одно из последовательных измерений АЦП в осциллограмме.

На первом шаге алгоритма обработки осциллограмм проводится разделение осциллограммы на пьедестал и сигнальную область, отдельно для правого и левого каналов. Первым бином сигнала считается первый бин $f_{L,R}$, в котором величина амплитуды $A_i^{L,R}$ удовлетворяет условию (рис. 4)

$$A_{f_{L,R}}^{L,R} > P_0^{L,R} + (M_{L,R} - P_0^{L,R}) (0.2 + 0.01(m_{L,R} - f_{L,R})), \quad (2)$$

где $A_i^{L,R}$ – измеренная амплитуда в i -м бине осциллограммы в правом и левом каналах соответственно, $M_{L,R}$ – максимальное значение амплитуды в каждом из каналов, $m_{L,R}$ – соответствующий ему номер бина,

$$P_0^{L,R} = \frac{1}{n_{\text{pds}}} \sum_{i=0}^{n_{\text{pds}}-1} A_i^{L,R}$$

– уровень пьедестала, рассчитанный по первым n_{pds} бинам.

Рис. 4. Пример осциллограммы (гистограммы) с большой наводкой, иллюстрирующий нахождение фронта сигнала для разделения пьедестала и сигнальной области.

Далее усреднением n_{pds} последних бинов пьедестала, не содержащих искажений, определяется пьедестал $P_{L,R}$, используемый при вычислении амплитуды:

$$P_{L,R} = \frac{1}{n_{\text{pds}}} \sum_{i \in B_{\text{pds}}^{L,R}} A_i^{L,R}.$$

Наличие искажений определяется с помощью специальных критериев, подобранных эмпирически, которые позволяют определять искажения пьедестала от взаимных наводок между проволочками и синусоидальных наводок. Вначале в области $B_{\text{pds}}^{L,R}$ берутся последние n_{pds} бинов перед фронтом сигнала $f_{L,R}$. Затем в случае обнаружения искажений интервал $B_{\text{pds}}^{L,R}$ сдвигается к началу осциллограммы.

Для вычисления амплитуды (рис. 5) выбирается интервал из n_{sgn} бинов $B_{\text{sgn}} = [s, s+n_{\text{sgn}})$ для минимального значения $s \geq f = \max\{f_L, f_R\}$, при котором выполняется условие

$$F(s + n_{\text{sgn}}) < F(s) + \frac{1}{5} \left(\frac{2}{3}\right)^{s-f},$$

где

$$F(i) = \frac{A_i^L}{M_L} + \frac{A_i^R}{M_R}.$$

Рис. 5. Пример осциллограммы (гистограммы для левого и правого каналов), иллюстрирующий вычисление амплитуд для определения z -координаты.

При этом в указанной процедуре для вычисления амплитуды используются n_{sgn} бинов без переполнений АЦП. Левая и правая амплитуды сигнала для определения z -координаты вычисляются по формуле

$$A_{L,R} = \sum_{i \in B_{\text{sgn}}} (A_i^{L,R} - P_{L,R}).$$

В свою очередь, амплитуда сигнала для определения dE/dx вычисляется по всем бинам сигнальной области:

$$A_{dE/dx} = \sum_{i=f}^{199} [(A_i^L - P_L)/a_L + (A_i^R - P_R)/a_R],$$

где a_L и a_R – коэффициенты, определяемые с помощью генераторной калибровки (см. разд. 5).

Для работы алгоритма реконструкции треков в плоскости RZ , использующего метод наименьших квадратов, помимо z -координаты срабатывания, необходима оценка ее точности Δz , которая может быть получена на основе точности амплитуд сигналов $\Delta A_{L,R}$ в левом и правом каналах из выражения (1) по формуле переноса ошибок. Величины $\Delta A_{L,R}$ вычисляются на основе среднеквадратичного отклонения бинов (RMS), использовавшихся для вычисления пьедестала, с применением эмпирических поправок:

$$\Delta A_{L,R} = \left(\max \left\{ \text{RMS}(A_i^{L,R}), 9 \right\} \oplus \frac{1}{\sqrt{12}} \right) \sqrt{n_{\text{pds}}} CR,$$

где

$$CR = (1 + 10\tilde{z}^2) \begin{cases} 1, & A_L + A_R < 10^4, \\ 1 + 10^{-4}(A_L + A_R - 10^4), & A_L + A_R \geq 10^4, \end{cases}$$

$$\tilde{z} = \frac{A_L - A_R}{A_L + A_R},$$

и использовано обозначение $x \oplus y = \sqrt{x^2 + y^2}$.

Числовые коэффициенты в формулах, так же, как и их вид, подбирались таким образом, чтобы распределение отклонений точки срабатывания от реконструированного трека, деленных на ожидаемую ошибку,

$$d = \frac{z_{\text{изм}} - z_{\text{рек}}}{\Delta z},$$

было максимально близким к нормальному распределению с нулевым средним и единичной дисперсией. Для выявления зависимостей величины ΔA от различных параметров срабатывания, таких как суммарная амплитуда $A_L + A_R$ и некалиброванная координата \tilde{z} , по

записанным данным строились зависимости среднего значения d^2 от интересующих параметров.

Для определения положения фронта сигнала использовался следующий алгоритм, работающий с суммой осциллограмм с левого и правого концов одной проволоочки ($A_i = A_i^L + A_i^R$). Вначале ищется первый бин g (рис. 6), который удовлетворяет условию

$$A_g > \begin{cases} T + 0.02(f' - g), & g < f', \\ T, & g \geq f', \end{cases} \quad (3)$$

где

$$T = P_S + \min\{25, 0.5(M_S - P_S)\}, \quad f' = \max\{\min(f_L, f_R) - 10, 0\},$$

а $M_S = M_L + M_R$ и $P_S = P_L + P_R$ – максимальное значение и пьедестал суммарной осциллограммы соответственно.

Подобная форма порога с его увеличением в меньших бинах (рис. 6) необходима для подавления ложных срабатываний из-за наличия наводок в осциллограмме перед сигналом. Далее положение фронта, по которому измеряется время дрейфа, выраженное в бинах осциллограммы, вычисляется по формуле

$$t = g + \frac{\min_{i < g}(A_i) - A_g}{\max\{A_g - A_{g-1}, A_{g+1} - A_g, A_{g+2} - A_{g+1}\}}.$$

Рис. 6. Фрагмент осциллограммы, иллюстрирующий определение положения фронта сигнала для вычисления времени дрейфа.

7. РЕЗУЛЬТАТЫ

Разрешающая способность трековой системы в плоскости $R\phi$ характеризуется разрешением по координате r для каждого срабатывания проволоочки, а также разрешениями по углу ϕ и расстоянию d_0 до оси пучков со знаком для реконструированных треков. В свою очередь, в плоскости RZ характеристическими параметрами являются разрешения по координате z для отдельных срабатываний, а также по углу θ между треком и осью пучков и координате z_0 ближайшей к оси пучков точки трека. Еще одним параметром, характеризующим работу трековой системы, является эффективность реконструкции отдельных срабатываний и их присоединения к реконструируемому треку в различных слоях дрейфовой камеры (рис. 7).

Рис. 7. Эффективность срабатывания проволочек (аппаратная), эффективность алгоритма обработки осциллограмм и эффективность присоединения срабатываний проволочек

Для исследования разрешения трековой системы использовались события процесса рассеяния $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ с двумя реконструированными треками, которые были отобраны по следующим критериям: $||\varphi_1 - \varphi_2| - 180^\circ| < 15^\circ$, $|\theta_1 + \theta_2 - 180^\circ| < 25^\circ$, $45^\circ < \theta_{1,2} < 135^\circ$ и $E_{1,2} > 0.65 E_0$, где подстрочные индексы обозначают номер одной из двух частиц, $E_{1,2}$ – энергосодержание частицы в калориметре, а E_0 – энергия пучка. Разрешение по параметрам отдельных срабатываний, z и r , определялось по отклонению срабатываний от реконструированного трека в соответствующих проекциях (рис. 8).

Рис. 8. Распределение отклонений отдельных срабатываний проволочек от реконструированных треков по координатам...

В свою очередь, разрешение по параметрам (φ , θ , d_0 и z_0) реконструированных треков можно определить по ширине распределений: $\Delta\varphi = |\varphi_1 - \varphi_2| - 180^\circ$ (рис. 9), $\Delta\theta = \theta_1 + \theta_2 - 180^\circ$ (рис. 10), $\Delta d_0 = d_{01} + d_{02}$ (рис. 9) и $\Delta z_0 = z_{01} - z_{02}$ (рис. 10) для коллинеарных событий $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$. Разрешение по параметрам одного трека в предположении их статистической независимости в $\sqrt{2}$ раз меньше, чем по указанным разностям (суммам). В плоскости RZ разрешение может быть получено как при реконструкции треков без использования катодных полосок (только по проволочкам ДК), так и с их использованием (рис. 10). Во втором случае оно характеризует работу трековой системы как целого. В табл. 1 приведены значения разрешения, полученные при энергии 790 МэВ в пучке примерно по $3 \cdot 10^6$ событиям. Величина σ определялась подгонкой центральной области гистограмм нормальным распределением (показана линией на рис. 8–10).

Рис. 9. Распределение событий по параметрам Δd_0 (а) и $\Delta\varphi$ (б) реконструированных треков в событиях $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ при энергии 790 МэВ в пучке.

Рис. 10. Распределение событий по параметрам Δz_0 (а, в) и $\Delta\theta$ (б, г) реконструированных треков в событиях $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ при энергии 790 МэВ в пучке.

Таблица 1. Разрешение трековой системы, определенное по $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$,
при энергии 790 МэВ в пучке

Параметр	По проволочкам и полоскам	Только по проволочкам
$\sigma(z_0)$, мм	0.91	1.8
$\sigma(d_0)$, мм	–	0.3
$\sigma(\theta)$	0.82°	1.54°
$\sigma(\phi)$	–	0.38°

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Новые оцифровывающие платы Т200 были установлены на детектор СНД в 2022 г. и, начиная с 2023 г., с ними идет запись экспериментальных данных. Был разработан алгоритм обработки осциллограмм, позволяющий определять амплитуды срабатываний и времена дрейфа – величины, используемые для определения пространственного положения трека. Разрешение по основным параметрам реконструированных треков, определенное по событиям $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$, согласуется с таковым при использовании плат Т2АМ. В то же время, использование новых плат позволило увеличить пропускную способность системы сбора данных до 1.5 тыс. событий в секунду, а увеличенная частота дискретизации АЦП может быть использована при создании нового алгоритма с большей способностью к подавлению наводок и наложений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Achasov M.N., Aulchenko V.M., Baru S.E. et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 2000. V. 449. № 1. P. 125. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(99\)01302-9](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(99)01302-9)
2. *Беркаев Д.Е., Шварц Д.Б., Шатунов П.Ю. и др.* // ЖЭТФ. 2011. Т. 140. С. 247. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16715287>
3. *Shatunov P.Yu., Belikov O.V., Berkaev D.E et al.* // Proceedings of IPAC2017. Copenhagen, Denmark, 2017. P. 2989. <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2017-WEPIK029>
4. *Shwartz D., Emanov F., Piminov P.* // EPJ Web Conf. 2019. V. 218. P. 7001. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201921807001>
5. *Барняков А.Ю., Барняков М.Ю., Белобородок К.И. и др.* // ПТЭ. 2015. № 1. С. 37. <https://elibrary.ru/item.asp?id=22840927>

6. *Абрамов Г.Н., Аульченко В.М., Ачасов М.Н. и др.* Проект модернизации детектора СНД для экспериментов на ВЭПП-2000. Препринт ИЯФ 2001-29. Новосибирск, 2001.
7. *Аульченко В.М., Богданчиков А.Г., Ботов А.А.* // ПТЭ. 2007. № 6. С. 65
<https://elibrary.ru/item.asp?id=9562853>
8. *Surin I.K., Zhulanov V.V., Achasov M.N. et al.* // J. Instrum. 2017. V. 12.
№ 7. P. C07043. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/07/C07043>
9. *Aulchenko V.M., Bukin D.A., Dimova T.V. et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 2002. V. 494. № 1. P. 246. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(02\)01475-4](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(02)01475-4)
10. *Богданчиков А.Г., Ботов А.А., Букин Д.А. и др.* // Ядерная физика. 2010. Т. 73. № 11. С. 1983.
11. *Usov Yu.V., Aulchenko V.M., Bukin M.A. et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 2002. V. 494. № 1. P. 555. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(02\)01548-6](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(02)01548-6)
12. *Aulchenko V.M., Baru S.E., Savinov G.A., Talyshev A.A., Usov Yu.V.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 1998. V. 409. № 1. P. 639.
[https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(98\)00088-6](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(98)00088-6)
13. RFC 4960. Stream Control Transmission Protocol. Proposed standard. / Ed. by R. Stewart, 2007. <https://doi.org/10.17487/RFC4960>
14. *Харламов А.* Измерение сечения процесса $e^+ e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0 \pi^0$. LAP Lambert Academic Publishing, 2011. ISBN 978-3-8443-5574-1.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Схема подключения электроники трековой системы: ПУ – предусилитель, ЗЧУ – зарядочувствительный усилитель, ВВ – высоковольтное напряжение, ПК – пропорциональная камера, ДК – дрейфовая камера (показан один слой из девяти).
- Рис. 2.** Схема оцифровывающей платы трековой системы СНД Т200.
- Рис. 3.** Логическая схема работы Zynq Z7030: PL – программируемая логика, PS – процессорная система, RS – RS-триггер, И – логическое “И”, IRQ – запрос на прерывание, evt – номер события, ch – номер канала, osc.data – данные осциллограммы.
- Рис. 4.** Пример осциллограммы (гистограммы) с большой наводкой, иллюстрирующий нахождение фронта сигнала для разделения пьедестала и сигнальной области. Горизонтальная штриховая линия – постоянный порог $0.8 P_0 + 0.2 M$, наклонная штриховая линия – наклонный порог, использующийся для нахождения фронта (формула (2)), вертикальная штриховая линия – найденный фронт сигнала. Видно, что наводки в пьедестале могут вызвать ложное срабатывание в случае использования постоянного порога.
- Рис. 5.** Пример осциллограммы (гистограммы для левого и правого каналов), иллюстрирующий вычисление амплитуд для определения z -координаты. Первая и вторая заштрихованные области под гистограммами соответствуют областям суммирования бинов для вычисления величины пьедестала и амплитуды сигнала соответственно. Горизонтальные сплошные прямые показывают величины пьедестала в левом и правом каналах, вычисленные по осциллограмме, а штриховые – уровни пьедестала, полученные при генераторной калибровке ТС (приведены для сравнения). Также приведены амплитуды A и их ошибки ΔA , полученные описанным в тексте алгоритмом.
- Рис. 6.** Фрагмент осциллограммы, иллюстрирующий определение положения фронта сигнала для вычисления времени дрейфа. Штриховая линия – пороговый уровень (формула (3)), наклонная прямая – прямая, проходящая через бин g (первый бин выше порога), с наклоном, равным максимальной разности между тремя парами

соседних бинов, $g - 1, \dots, g + 2$, горизонтальная прямая – уровень минимума в пьедестале $\min_{i < g}(A_i)$. Точка пересечения сплошных прямых дает положение фронта сигнала t .

Рис. 7. Эффективность срабатывания проволочек (аппаратная), эффективность алгоритма обработки осциллограмм и эффективность присоединения срабатываний проволочек к трекам по слоям ДК в событиях процесса $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ при энергии 790 МэВ в пучке. Рассматриваются только области проволочек, отстоящие более чем на 4 см от их концов. Каждая следующая эффективность включает в себя предыдущие, т.е. в последнем случае должно было быть аппаратное срабатывание, для которого алгоритм определил амплитуду и время и которое было присоединено к треку.

Рис. 8. Распределение отклонений отдельных срабатываний проволочек от реконструированных треков по координатам z (**а**) и r (**б**) в событиях $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ при энергии 790 МэВ в пучке. Величина среднеквадратичного отклонения (RMS) получена по всем (N) событиям, а величина σ – подгонкой центральной области гистограммы нормальным распределением (кривая).

Рис. 9. Распределение событий по параметрам Δd_0 (**а**) и $\Delta\phi$ (**б**) реконструированных треков в событиях $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ при энергии 790 МэВ в пучке. Величина среднеквадратичного отклонения (RMS) получена по всем (N) событиям, а величина σ – подгонкой центральной области гистограммы нормальным распределением (кривая).

Рис. 10. Распределение событий по параметрам Δz_0 (**а, в**) и $\Delta\theta$ (**б, г**) реконструированных треков в событиях $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ при энергии 790 МэВ в пучке. В верхнем ряду (**а, б**) показана реконструкция с использованием проволочек и полосок, внизу (**в, г**) – с использованием только проволочек. Видно, что использование полосок улучшает разрешение почти вдвое. Величина среднеквадратичного отклонения (RMS) получена по всем (N) событиям, а величина σ – подгонкой центральной области гистограммы нормальным распределением (кривая).

сделать надписи с прописной

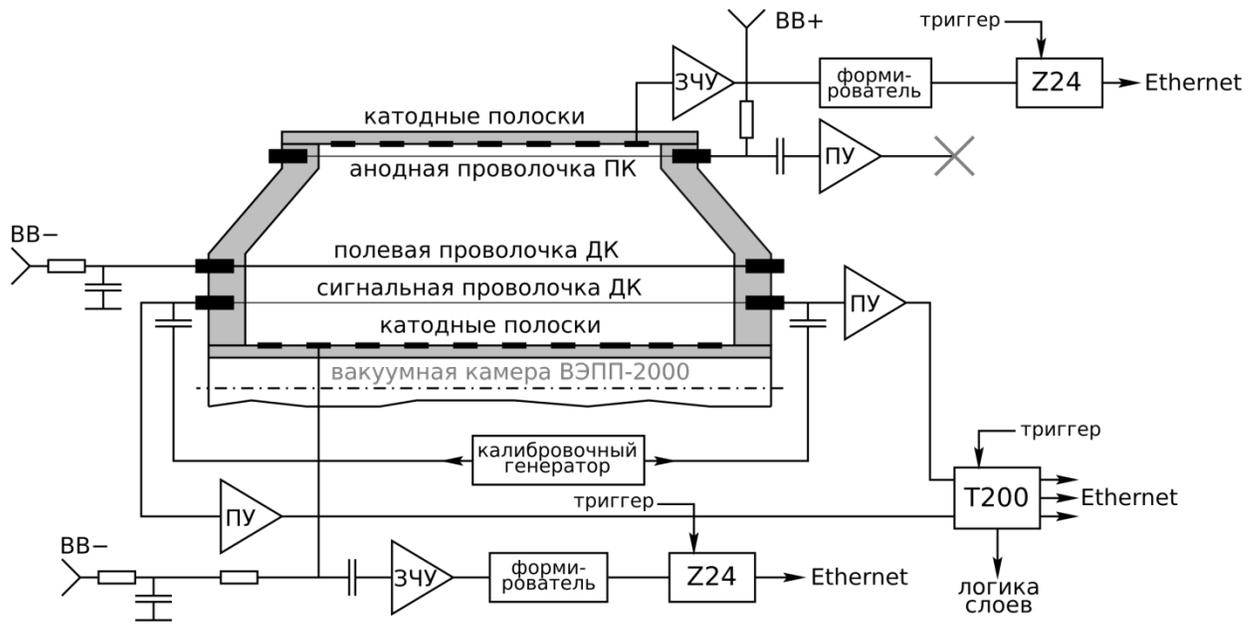


Рис. 1.

написи с прописной буквы

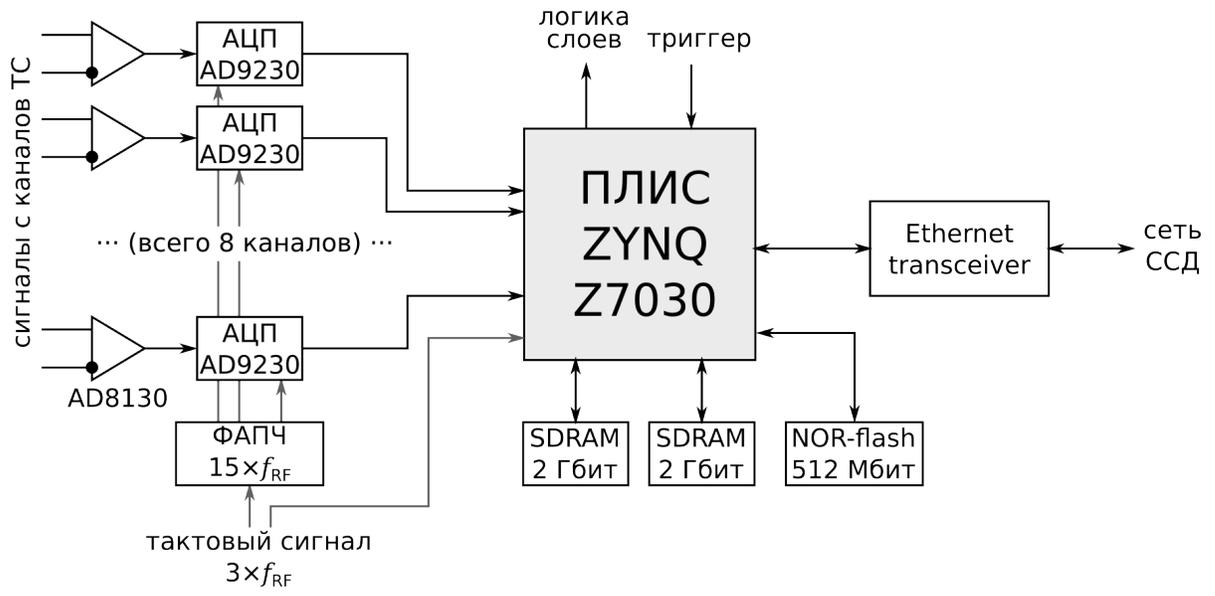


Рис. 2.

надписи с прописной буквы

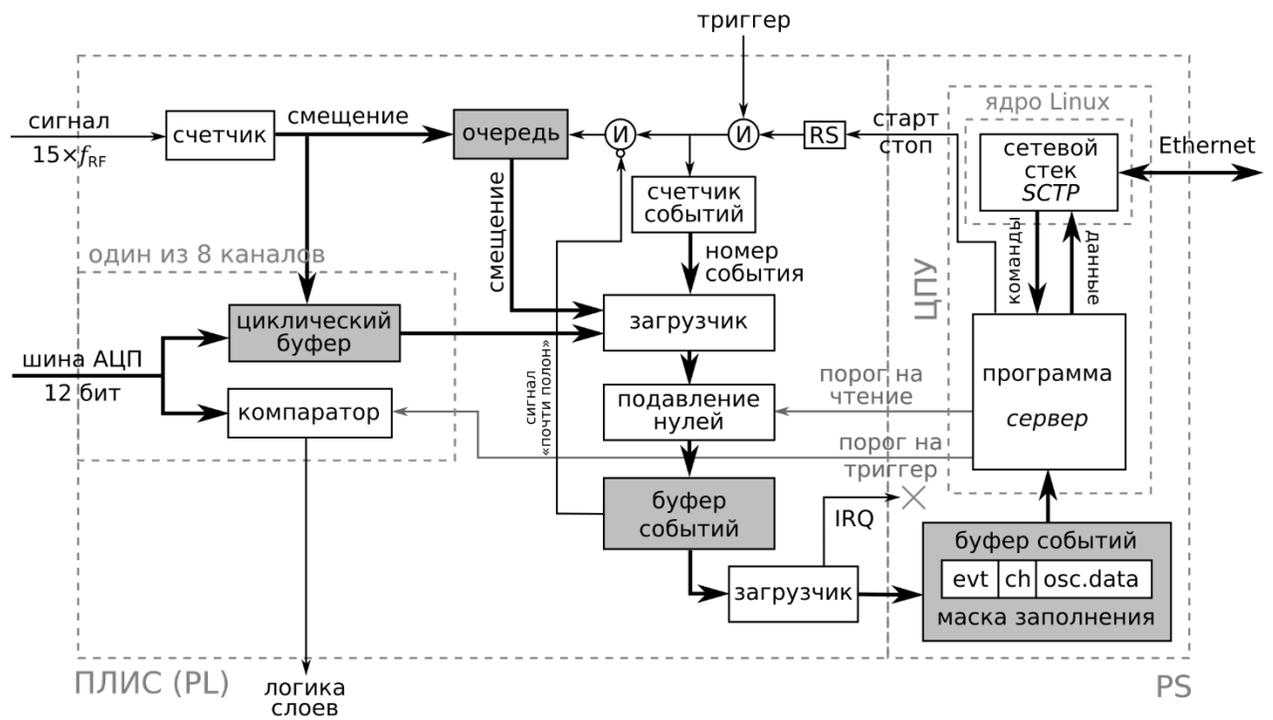


Рис. 3.

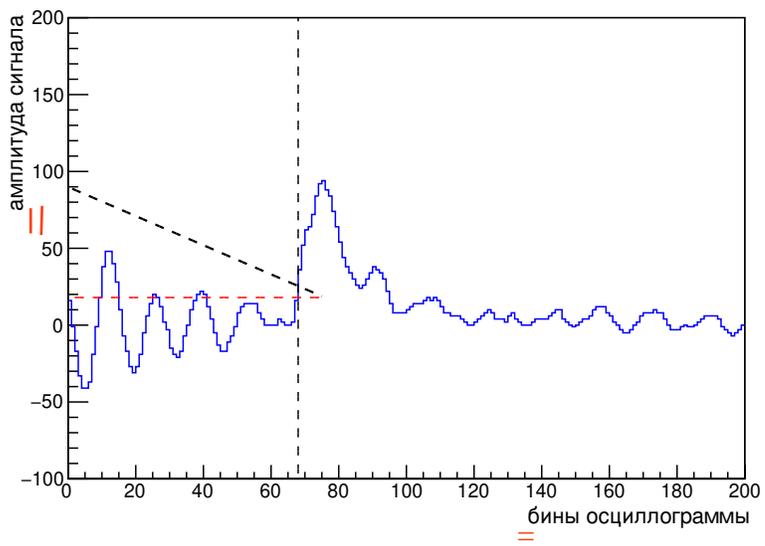


Рис. 4.

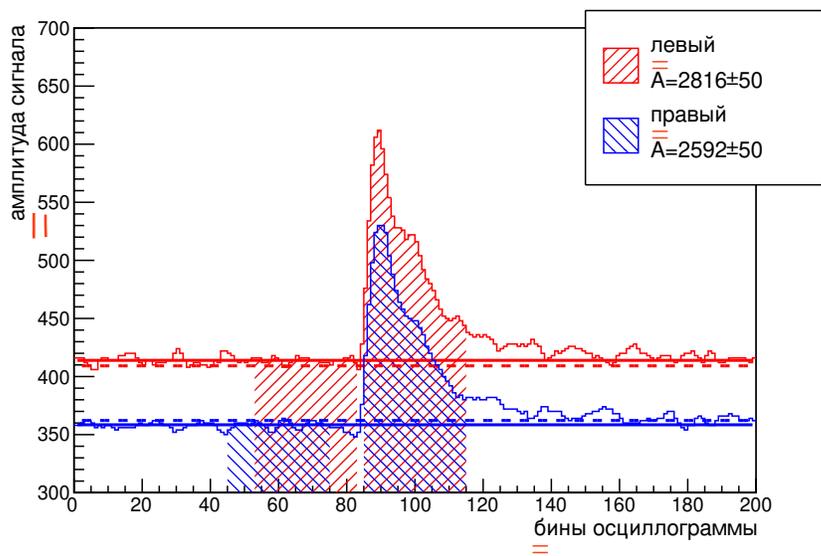


Рис. 5.

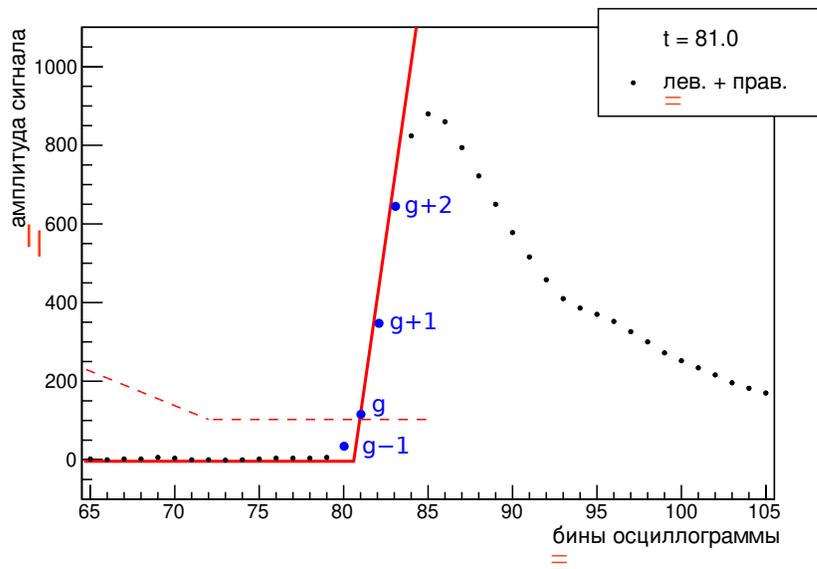


Рис. 6.

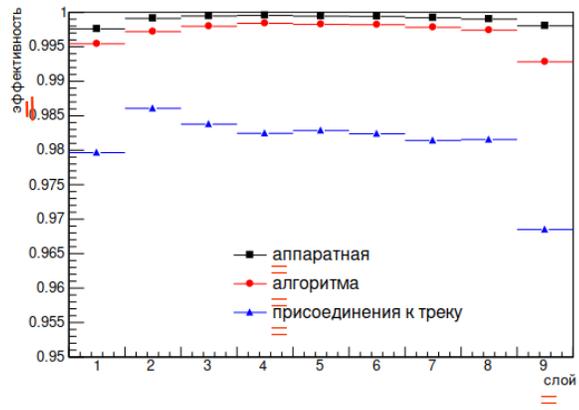


Рис. 7.

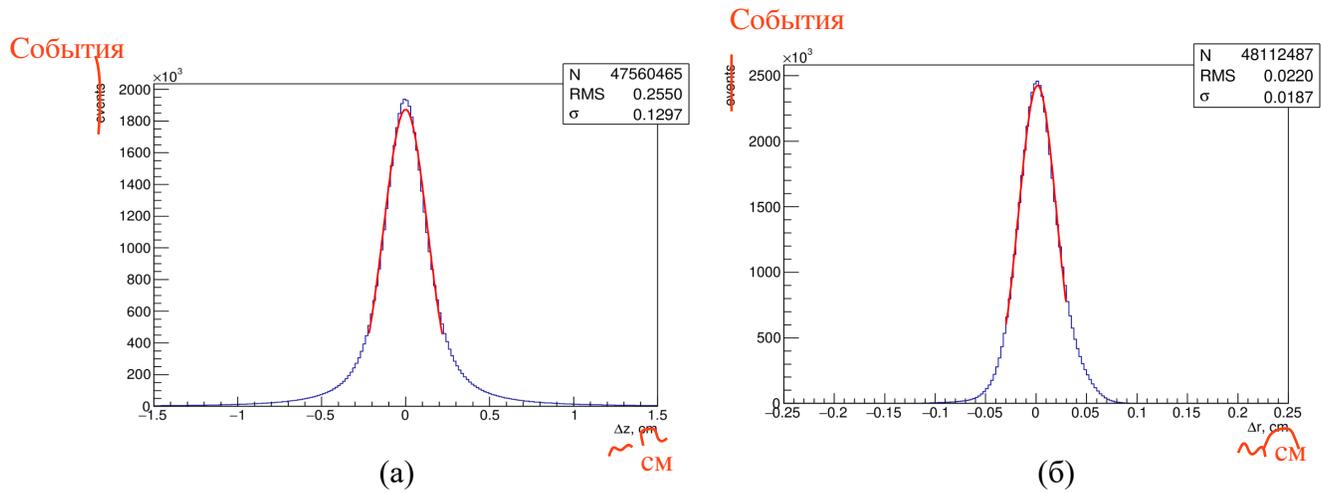
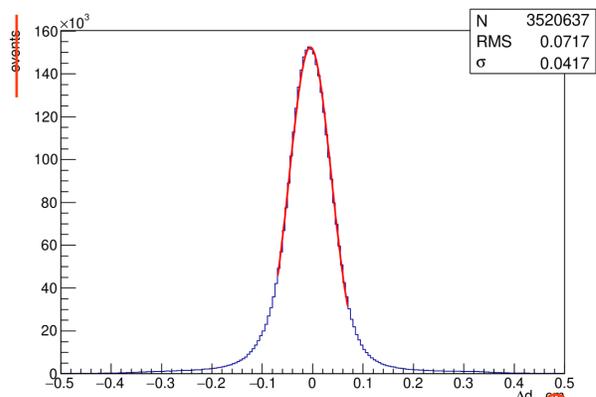


Рис. 8.

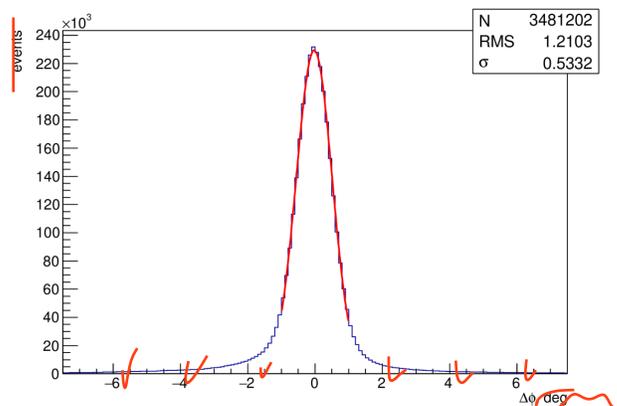
События



(a)

см

События

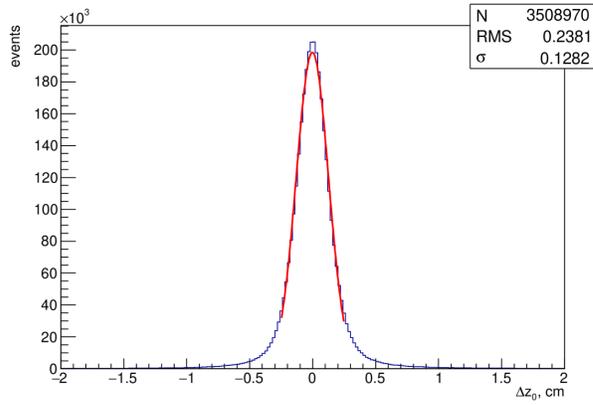


(б)

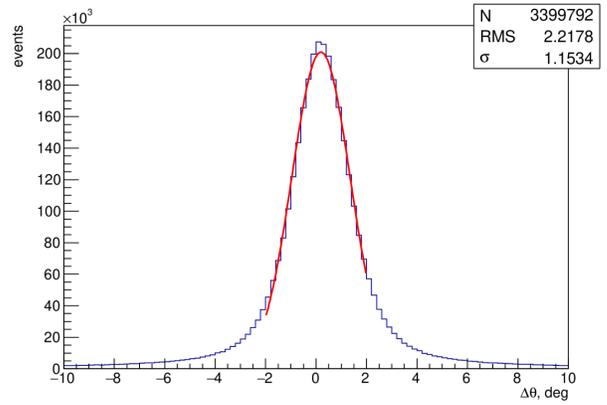
поставить к цифрам значок градуса

Рис. 9.

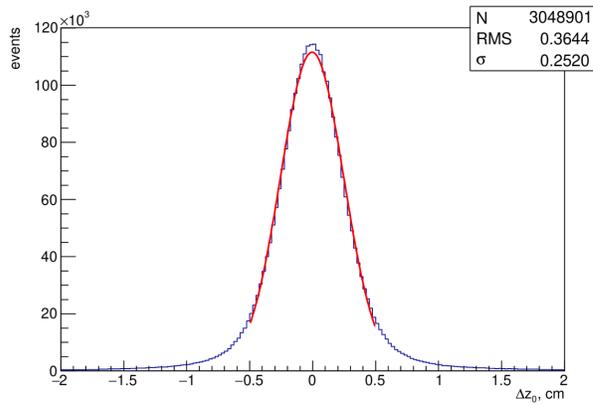
правка, как на рис. 9



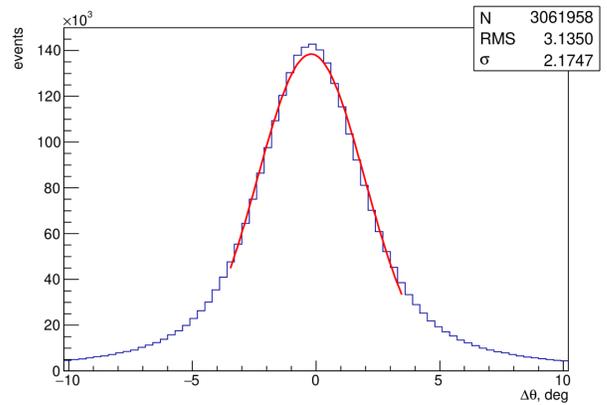
(a)



(б)



(в)



(г)

Рис. 10.