



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова
Национального исследовательского центра
«Курчатовский институт»

Препринт 2019-2

Д.Р. Еремеев, А.В. Ивагин, В.Д. Матвеев, М.О. Михасенко,
В.П. Сугоняев, Ю.А. Хохлов

**Применение модуля ADC-32АТС с оцифровкой формы
импульса на установке ВЕС**

Протвино 2019

Аннотация

Еремеев Д.Р. и др. Применение модуля ADC-32ATC с оцифровкой формы импульса на установке ВЕС: Препринт НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ 2019-2. – Протвино, 2019. – 26 с., 18 рис., библиогр.: 8.

Описан опыт применения модуля аналого-цифрового преобразования с оцифровкой формы импульса ADC-32ATC на установке ВЕС. Представлены несколько вариантов согласующих формирователей аналоговых сигналов. Приведены результаты стендовых и пучковых испытаний. Описаны методы обработки измерений и новый метод реконструкции формы импульса. Приведены первые результаты их использования в физическом анализе данных.

Abstract

Eremeev D. et al. Usage of the ADC-32ATC module with a pulse shape digitization at the VES setup: NRC «Kurchatov Institute» – IHEP Preprint 2019-2. – Protvino, 2019. – p. 26, figs. 18, refs.: 8.

An experience with the sampling analog-to-digital convertor ADC-32ATC at the VES setup is discussed. Various shapers for analog signals are presented. Results of bench and beam tests are given. Data processing methods and novel pulse shape reconstruction method are described. First results of their usage in physical analyses are presented.

1. Введение

В [1] описан модуль ADC-32АТС аналого-цифрового преобразования с оцифровкой формы импульса для детекторов частиц в составе установок на циклических ускорителях. В дальнейшем он обозначается ВАЦП — амплитудно-цифровой преобразователь с выборками (SADC), в отличие от интегрирующего — ИАЦП. Данная работа посвящена опыту применения ВАЦП на установке ВЕС ускорительного комплекса У-70 в ИФВЭ. В настоящее время в ВАЦП оцифровываются сигналы с нескольких детекторов: 4 пучковых черенковских счетчика, 18 счетчиков вето-системы, 28-канальный черенковский счетчик вторичных частиц. В данной работе ADC-32АТС использовался в следующем режиме: частота оцифровки 40 МГц, 32 канала, 15 или 16 выборок на канал.

Работа имеет следующую структуру. В разделе 2 описаны специальные формирователи аналоговых сигналов, сопрягаемые с ВАЦП. В разделе 3 приведена основная параметризация формы одиночного импульса и сведения по процедуре фитирования сигналов. В разделе 4 описаны стендовые измерения характеристик ВАЦП, в том числе время-цифрового преобразователя в его составе. Раздел 5 посвящен калориметрическим измерениям с ВАЦП. Здесь использован новый метод реконструкции формы импульса. В разделе 6 рассмотрено применение ВАЦП с другими детекторами установки ВЕС. В заключение кратко резюмируется опыт использования ADC-32АТС.

2. Формирователи

Типично импульсные сигналы напрямую с детекторов частиц или после широкополосного усилителя имеют длительности по основанию от 10 до 100 нс с передними фронтами от 0.1 до 10 нс. Прямая оцифровка таких сигналов требует применения ВАЦП с частотой стробирования (выборок) более 100 МГц. Альтернативой в условиях умеренных загрузок является применение более дешевых и менее скоростных

АЦП в сочетании с времяформирующим преобразователем аналоговых сигналов для уширения импульса с затягиванием переднего фронта и/или выполаживания его вершины.

Для модуля ADC-32АТС с частотой оцифровки 40 МГц представляется разумным формирование входных сигналов с временем нарастания около 50 нс и длительностью по основанию ~ 150 нс (6 выборок).

Еще одной функцией формирователя является согласование сигнала с входом АЦП по амплитуде и/или полярности. Согласно техническим требованиям к интегральной микросхеме AD9222 фирмы Analog Devices ([2]), для получения высокого разрешения и лучшего соотношения сигнал/шум входные сигналы должны быть дифференциальные в диапазоне ± 1 В с постоянным уровнем синфазного сигнала около +0.8 В.

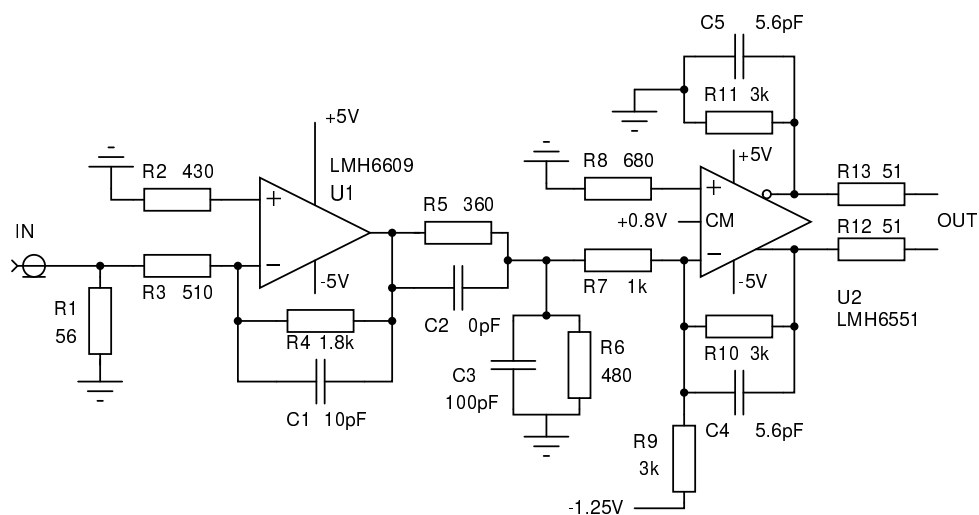


Рис. 1. Базовая принципиальная схема одного канала УФ. Всегда $C_5 = C_4$, $R_{11} = R_{10}$, цепь $R_{11}C_5$ служит для симметризации нагрузки выходного каскада ОУ. Резисторы R_{12} , R_{13} служат для изоляции от ОУ схемы выборки-хранения АЦП. Резистором R_9 регулируется постоянное смещение на выходе при отсутствии входного сигнала (пьедестал).

Базовая принципиальная схема одного канала усилителя-формирователя (УФ) приведена на рис. 1. Каждый канал УФ построен на двух быстродействующих ОУ. Первый каскад выполнен на обычном ОУ LMH6609, второй — на полностью дифференциальном ОУ LMH6551, который помимо времяформировки сигнала также выполняет функции дифференциального драйвера АЦП. Передаточная характеристика в приближении бесконечного быстродействия ОУ равна

$$K(\omega) = A \frac{1 + j\omega\tau_0}{(1 + j\omega\tau_1)(1 + j\omega\tau_2)(1 + j\omega\tau_3)}$$

где A — коэффициент усиления для постоянного сигнала, а постоянные времени

выражаются следующим образом через параметры элементов схемы:

$$\begin{aligned}\tau_0 &= R_5 C_2 \\ \tau_1 &= R_4 C_1 \\ \tau_2 &= \frac{R_5(C_2 + C_3)}{1 + R_5(R_6 + R_7)/(R_6 R_7)} \\ \tau_3 &= R_{10} C_4\end{aligned}$$

Ноль в $K(\omega)$ использовался в экспериментальном варианте УФ для подавления экспоненциального хвоста (компенсация полюса нулём) в сигнале от ячеистых лавинных фотодиодов. Для вариантов УФ, предназначенных для работы с ФЭУ (возможно с дополнительным предусилителем), и в других случаях гауссоподобных сигналов без длинного хвоста на заднем фронте ноль в $K(\omega)$ не нужен.

При $\tau_0 = 0$ каждый n -кратный полюс с постоянной времени τ в $K(\omega)$ соответствует слагаемому $\theta(t)p_{n-1}(t)e^{-t/\tau}$ во временной области при подаче на вход дельта-функции ($\theta(t)$ — функция Хевисайда, $p_{n-1}(t)$ — полином степени $n - 1$). Для того, чтобы иметь симметричный импульс с более-менее одинаковым наклоном обоих фронтов, выгоднее τ всех полюсов иметь одинаковыми — в противном случае будет образовываться длинный экспоненциальный хвост на заднем фронте с наибольшей из всех постоянной времени. В нашем случае это означает трёхкратный полюс с откликом $\sim \theta(t)t^2 e^{-t/\tau}$ во временной области на дельта-функцию на входе.

Во всех вариантах плата УФ соединяется с платой ВАЦП через 150-ти контактный разъем типа DIN4612. От УФ к ВАЦП передаются 32 дифференциальных аналоговых сигнала (уникальных либо повторяющихся, см. ниже УФ-3); от ВАЦП к УФ — напряжения питания (+5; -5; +3.3; +1.8) В, а также шины SPI и считывания термодатчиков (при их наличии в составе УФ). Сборка УФ-ВАЦП по основным размерам (высота и глубина) совместима с каркасом Евромеханики 6U, но может использоваться и без него.

В дальнейшем речь идет только об УФ для применения с ФЭУ, несколько вариантов показаны на рис. 2.

- УФ-1 Имеет входные разъёмы типа РЦ-00, предназначен для подачи сигналов с относительно неплотно расположенных детекторов (измерительных каналов) по коаксиальным 50-омным кабелям. 32 разъема располагаются с двух сторон на торце платы.
- УФ-2 Предназначен для многоканальной калориметрии, имеет два входных 96-ти контактных разъёма типа DIN-46412 для подключения жгута из 16-ти коаксиальных кабелей через переходные панели. Недействующие контакты при этом используется в качестве "земли". При большом числе каналов комплекты "УФ + ВАЦП" могут устанавливаться в каркас Евромеханики.
- УФ-3 Имеет 8 каналов с входными разъёмами РЦ-00, предназначен для оцифровки коротких сигналов с эффективно учетверенной частотой оцифровки (160

МГц). Для этого сформированный на каждом канале сигнал посредством дифференциальных повторителей на базе LMH6551 разветвляется на 4 входа ADC-32АТС, установленного в т.н. режим "x4". Режимы "x2" и "x4" подробно описаны в [1].

При тестировании ВАЦП с электромагнитным калориметром (раздел 5) использовался УФ-0 с наличием (ненужного) нуля в $K(\omega)$. Однако постоянная времени τ_0 была достаточно мала, поэтому качество сигнала по форме не отличался от сигнала при $\tau_0 = 0$, то есть не имел отрицательного выброса на заднем фронте.

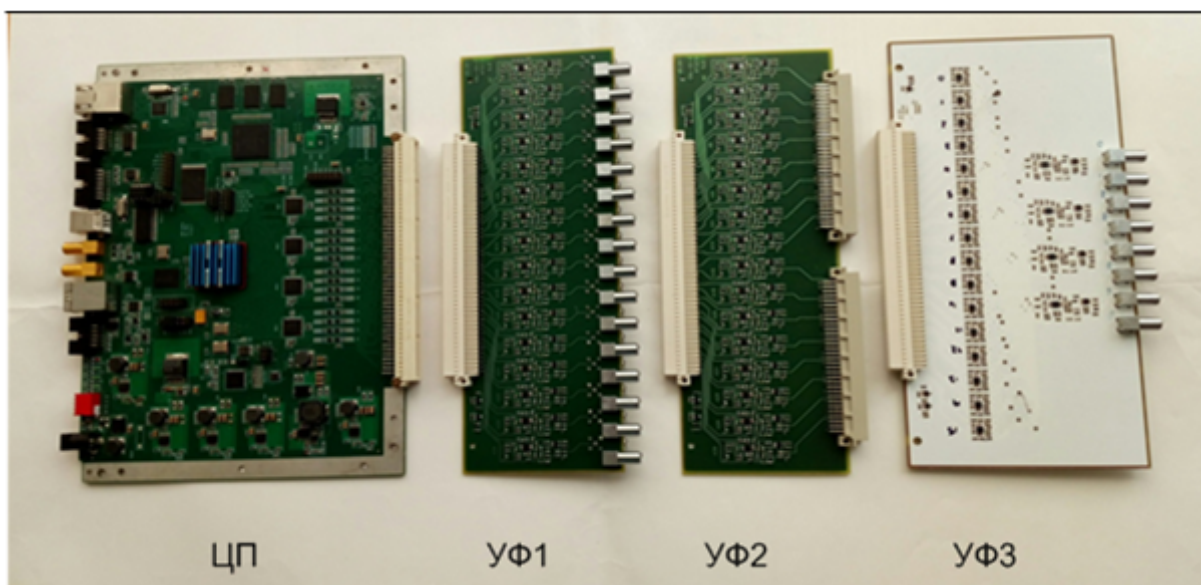


Рис. 2. Плата ADC-32АТС (слева) и варианты плат УФ

3. Параметризация формы импульса. Процедура фитирования сигналов

В данной работе, если явно не оговорено другое, для описания формы импульса на выходе УФ (как от генератора, так и от детекторов) применяется следующая параметризация:

$$f_0(t) = \theta(t) \frac{1}{e^{-(t-\tau)/\kappa} + 1} t(e^{-\alpha t} + be^{-\beta t}) \quad (1)$$

где $\alpha, \beta, b, \kappa, \tau$ — произвольные параметры, подбираемые для конкретного канала УФ и источника сигнала. Данная параметризация никак физически не мотивирована, и её следует рассматривать как эмпирический рецепт, который в наших условиях описывает форму сигнала с достаточной точностью.

Фитирование сигналов выполняется методом наименьших квадратов (МНК) с единичными весами (ошибками). Для минимизации используется алгоритм UOBYQS ([3]), который является модификацией UOBYQA из [4].

В общем случае допускается до 5 импульсов в одном событии, которые параметризуются функцией

$$f(t) = \sum_{k=1}^5 a_k f_0(t - t_k) + p$$

где a_k, t_k, p — параметры фита. Иногда пьедестал считается известным и одинаковым для всех событий, в таком случае p заранее фиксируется. Для предотвращения неоднозначностей (разные наборы параметров, дающие одинаково хорошее описание экспериментальных данных) и возникновения нефизических отрицательных амплитуд a_k при фите все a_k параметризуются как квадраты вспомогательных параметров $a_k = q_k^2$.

Во всех разделах данной работы, за исключением 6, допускался только один импульс. Квадратичная параметризация амплитуды сигнала для малых амплитуд в данном случае сохранилась по историческим причинам и является нежелательной, поскольку для малых сигналов, сравнимых с шумом УФ, приводит к систематическому завышению амплитуды в положительную область.

4. Стендовые измерения

Проверка работоспособности и измерение основных характеристик УФ и ВАЦП производились на автоматизированном стенде в составе: цифровой генератор произвольных импульсов Tektronix AFG3102; цифровой осциллограф LeCroy WaveRunner 606Zi; источник питания; испытуемые УФ и/или ВАЦП; компьютер с Ethernet-каналом для связи с приборами.

При стендовых измерениях идеальностью лабораторных приборов пренебрегалось. Таким образом, предельные величины соответствующих характеристик ВАЦП — временное и амплитудное разрешение, линейность — нужно рассматривать как ограничения сверху.

Стенд имеет функции управления генератором и ВАЦП, приема данных с осциллографа и ВАЦП. ADC-32ATC в режиме внутренних циклических запусков с внешним триггерным сигналом генерирует рабочие циклы с произвольно заданной структурой: паузой между активными фазами цикла и числом триггеров в активной фазе цикла — сигналов запуска процесса измерения (приема события). Длительность активной фазы цикла (имитация фазы вывода частиц из ускорителя, т.н. "сброса") определяется неявно числом триггеров и периодом их следования от внешнего генератора.

При измерении временного разрешения ВЦП фазы триггера в п.4.1 сигнал с одного канала генератора пассивно разветвлялся на 2 сигнала: аналоговый входной сигнал и сигнал триггера для NIM-входа ADC-32ATC. Рабочий диапазон УФ и порог NIM-входа -0.4 В таковы, что в некотором диапазоне амплитуд один и тот же

сигнал может использоваться как входной аналоговый и как триггерный. Пассивное разветвление вместо двух синхронных каналов генератора использовалось для того, чтобы исключить возможный взаимный джиттер двух каналов генератора.

Недостатком метода пассивного разветвления является то, что диапазон изменения амплитуды, при котором обеспечивается работа триггерного NIM-входа, достаточно узок. Поэтому при измерении линейности и амплитудного разрешения АЦП в п.4.2 триггер и синхронный с ним входной аналоговый сигнал подавались с двух синхронизированных между собой каналов генератора.

Для целей тестирования на вход УФ всегда подавался импульс одинаковой формы в виде трапеции длительностью по основанию 30 нс и временами нарастания и спада по 5 нс. В дальнейшем этот импульс будет называться стандартным. Частота оцифровки ВАЦП не синхронизирована с импульсом. С хорошим приближением можно считать, что поступающие на вход модуля ВАЦП триггерные импульсы имитируют случайный запуск с равномерным распределением по времени относительно фазы тактового генератора ВАЦП.

В модуле ADC-32АТС применяются микросхемы АЦП с небуферизованной схемой выборки-хранения. На рис. 3 показан измеренный цифровым осциллографом сигнал на выходе УФ при подаче стандартного входного импульса для двух условий:

1. УФ нагружен на вход ВАЦП, работающего с тактовой частотой 40 МГц.
2. УФ нагружен на вход ВАЦП, микросхема ВАЦП отключена (в режиме Power-Down).

В первом случае хорошо видны выбросы в моменты открытия конденсаторов схемы выборки-хранения. Открытие происходит за $1/2$ периода тактовой частоты до запоминания. За это время выходной каскад УФ обязан погасить помеху от схемы выборки-хранения, что накладывает определённые требования на его быстрое действие.

Далее описаны основные результаты, полученные с помощью стенда.

4.1. Форма одиночного импульса. Метод "сдвига на фазу". Точность измерения фазы триггера

В каждом отдельном событии ВАЦП выдаёт набор выборок сигнала с временным интервалом, равным периоду оцифровки. Импульс во всех тестовых событиях имеет одинаковую форму и амплитуду, а частота оцифровки не синхронизирована со временем прихода импульса.

Этим можно воспользоваться для восстановления по массиву событий формы импульса на входе ВАЦП на существенно меньшем временном масштабе, чем период оцифровки. Для этого достаточно откладывать на одном временном графике значения выборок всех событий с некоторым сдвигом по оси абсцисс, который определяется для данного события временем прихода сигнала с началом отсчёта, привязанного к тактовому генератору ВАЦП. Поскольку тестовый импульс всегда синхронен с

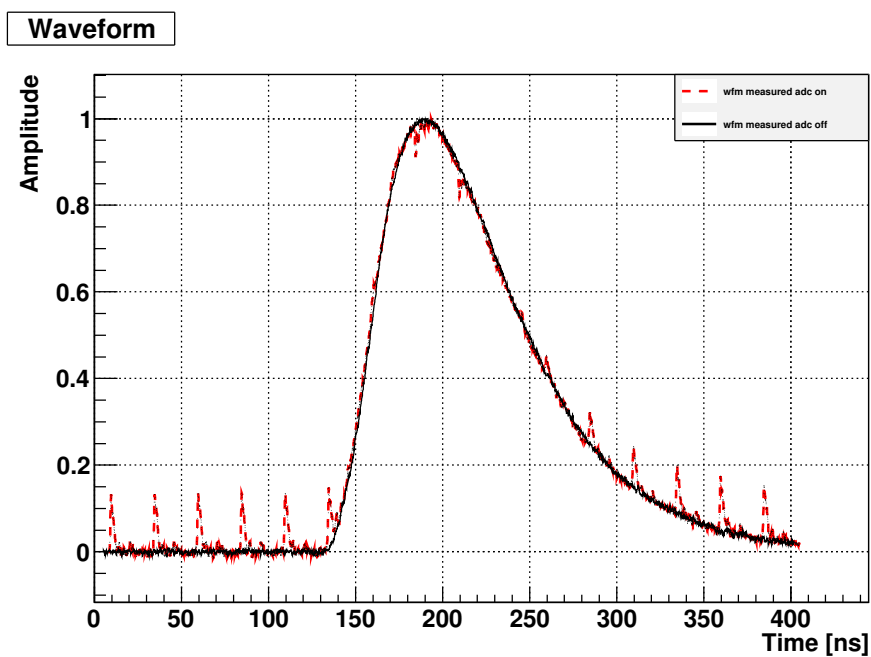


Рис. 3. Цифровая осциллограмма на выходе УФ, нагруженного на вход ВАЦП, при подаче на его вход тестового импульса: штриховая (красная) линия - микросхема АЦП тактируется; сплошная (черная) линия - микросхема АЦП отключена. Пьедестал вычтен, импульс отнормирован на 1 в максимуме, реальная амплитуда импульса 1.33 В при полном диапазоне АЦП 2 В.

триггером, то в качестве необходимого временного сдвига можно использовать фазу триггера ([1]).

Далее мы будем называть этот метод восстановления формы сигнала методом сдвига на фазу. Фаза триггера и амплитуды выборок всегда измеряются с некоторой конечной точностью, поэтому иногда на практике ось времени разбивается на бины и в центре каждого бина откладывается среднее значение амплитуд выборок, которые попали в этот бин. В этом случае мы будем использовать название "метод сдвига на фазу с усреднением".

Блок измерения фазы триггера в ADC-32АТС представляет собой время-цифровой преобразователь (ВЦП), который измеряет временной интервал между входным триггерным сигналом и его версией, синхронизированной с частотой оцифровки ВАЦП. Двухступенчатый ВЦП состоит из счётчика, работающего с тактовой частотой 480 МГц (измерение Φ , грубая фаза), и двух вентилях линий задержки с отводами (ЛЗО) для уточнения, после которого получается точная фаза. Уточняющие величины, считываемые из ЛЗО, будем обозначать как ϕ_t (для входного триггерного сигнала START) и ϕ_s (для синхронизированной версии START, обозначаемой START_SYN).

Задержки отдельных элементов ЛЗО отличаются друг от друга, неизвестно их конкретное значение, и они имеют температурную зависимость. Поэтому для использования данного ВЦП необходима его калибровка. Она делается на основе следующего статистического метода, причем возможна с использованием как специальных тестовых импульсов, так и на реальных детекторах.

Если входной сигнал распределён равномерно по времени, то высота бина в гистограмме величины ϕ ¹ пропорциональна задержке соответствующего элемента ЛЗО. В случае равенства задержек гистограмма должна быть плоской. Реальная гистограмма от нее отличается — см. рис. 4.

По гистограмме строится функция преобразования $F(\phi)$ следующим образом:

$$F(\phi) = \sum_{i=0}^{\phi} h_i / \sum_{i=0}^{31} h_i$$

где h_i — значение в бине i гистограммы.

Собственно точная фаза триггера Φ_{fine} в наносекундах вычисляется по формуле:

$$\Phi_{fine} = 2.083 \cdot (\Phi - F_t(\phi_t) + F_s(\phi_s))$$

где 2.083 нс — период тактовой частоты 480 МГц.

Для тестирования ВЦП фазы триггера на вход УФ подавался стандартный импульс с амплитудой на выходе около 3000 отсчётов. Форма тестового импульса, полученная методом сдвига на фазу с усреднением при использовании точной фазы триггера, была отфитирована кубическим сплайном с шагом узлов 2.5 нс. Полученный сплайн $f_0(t)$ был использован для пособытийной подгонки сигналов функцией $f(t) = af_0(t - t_0) + p$ с параметрами a , t_0 и p .

¹будем так называть любую из величин ϕ_t или ϕ_s , если соответствующее утверждение применимо для любой из них

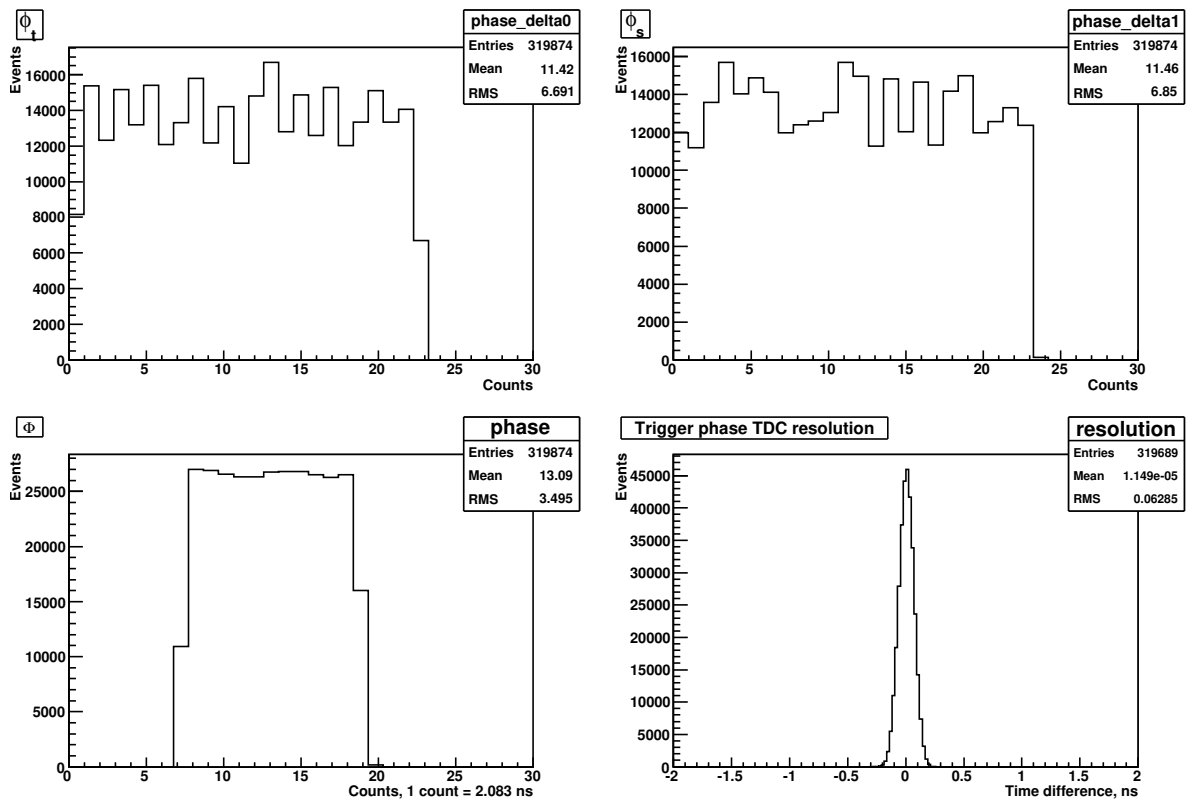


Рис. 4. Распределения измерений для характеристики ВЦП измерения фазы одного из модулей ВАЦП: по уточняющим величинам ϕ_s и ϕ_t (вверху), грубой фазе Φ (внизу слева) и разности отфитированного времени и точной фазы с обратным знаком (внизу справа).

Гистограмма разности t_0 и $-\Phi_{fine} + C$ (время прихода из фазы триггера) показана на рис. 4. Константа C выбрана так, чтобы среднее гистограммы было вблизи нуля. Видно, что точная фаза измеряется с разрешением не хуже 63 пс в смысле среднеквадратичного отклонения.

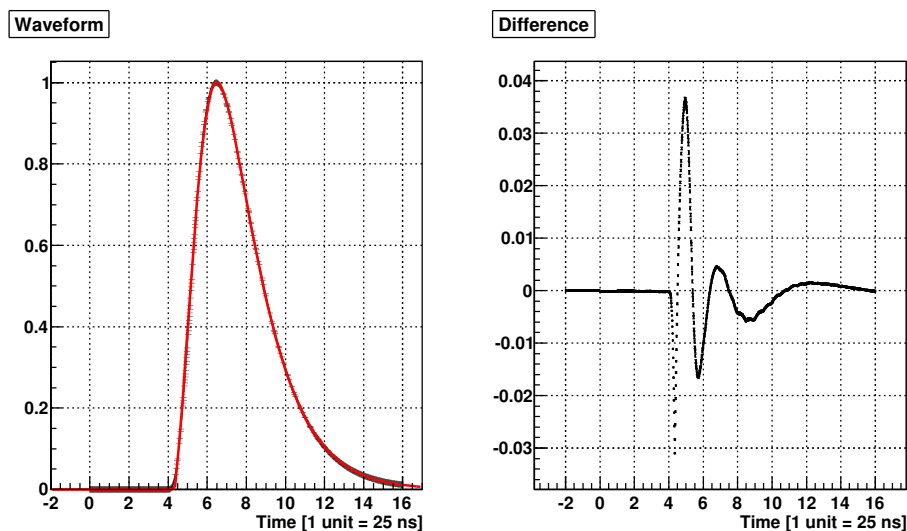


Рис. 5. Слева: восстановление тестового сигнала сдвигом на точную фазу (черные штрихи) и его параметризация (1) (сплошная красная линия). Справа: разность восстановленной формы и ее параметризации.

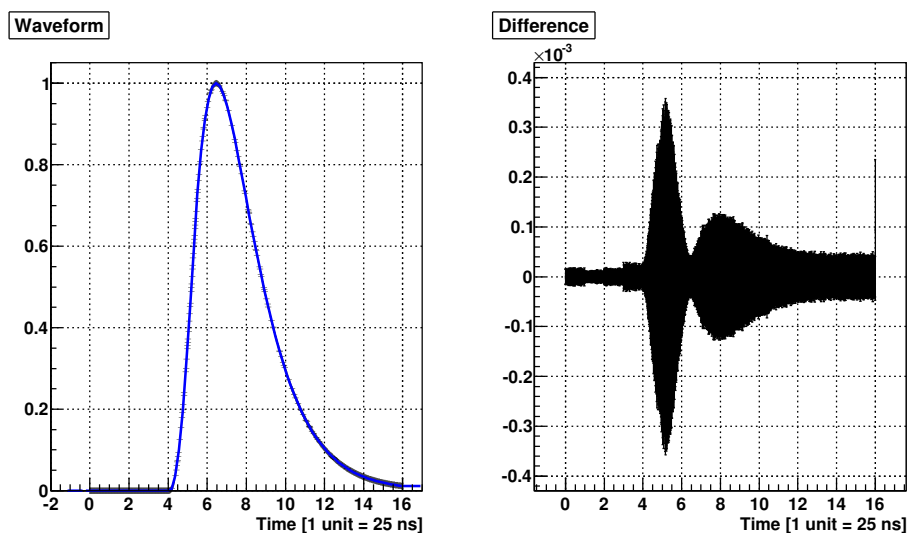


Рис. 6. То же, что на рис. 5, при параметризации сплайном.

4.2. Разрешение по амплитуде. Линейность. Перекрёстные помехи

Для характеристики точности измерения, включая математическую обработку, на вход измерительного тракта УФ – ВАЦП от цифрового генератора подавалась серия стандартных импульсов с известной номинальной амплитудой a_i^g в диапазоне от 30 до 800 мВ (с нарастанием индекса i). Форма импульса на входе ВАЦП определялась единожды методом сдвига на фазу с усреднением с использованием точной фазы триггера при амплитуде, соответствующей около 3000 отсч. ВАЦП. На левой части рис. 5 показаны форма тестового сигнала и его фит параметризацией (1), на правой части — их разность. Для удобства оценки качества аппроксимации импульс отнормирован на 1 в максимуме. Аналогичный рис. 6 показывает существенное улучшение аппроксимации формы сигнала при использовании вместо функции (1) кубического сплайна с шагом узлов 2.5 нс (0.1 периода оцифровки). Результат фита формы импульса нормировался в максимуме на 1 и полученная форма импульса $f_0(t)$ использовалась для подгонки одиночных оцифрованных импульсов функцией $f(t) = a_i^{fit} f_0(t - t_0) + p$ с параметрами a_i^{fit} , t_0 и p .

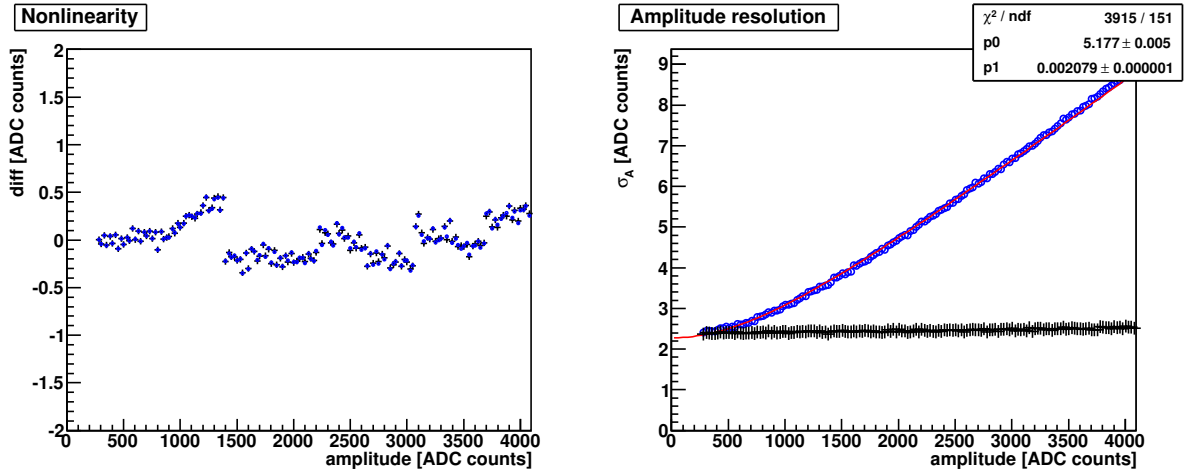


Рис. 7. Характеристики ВАЦП в зависимости от амплитуды импульса при его аппроксимации разными функциями: (1) (синие кружки) и сплайном (черные кресты). Слева - отклонение фитированной амплитуды от прямой, справа - амплитудное разрешение (в отсчетах), для параметризации (1) отфитировано функцией $\sqrt{p_0 + (p_1 a)^2}$.

Усредненные по серии фиксированных импульсов результаты подгонки представляются в виде графика $\overline{a_i^{fit}}(a_i^g)$. Наилучшая (в смысле МНК) прямая, проходящая через начало координат, определяет коэффициент k (отсч./В) преобразования данного канала. Максимальное (по модулю) во всем диапазоне ka_i^g отклонение измерений от этой прямой (рис. 7) является мерой интегральной нелинейности:

$$I = \max_i |\overline{a_i^{fit}} - ka_i^g|$$

Средняя величина I для 32-х каналов составила 0.8 отсчета, максимальная 4.4 отсчёта (0.1% от полного диапазона).

Среднеквадратичный разброс по серии величины a_i^{fit} дает оценку амплитудного разрешения. Оно также показано на рис. 7 как функция амплитуды ka_i^g . Амплитудное разрешение при аппроксимации сплайном не зависит от амплитуды и составляет 2.4 отсчёта. При использовании функции (1) с ошибкой аппроксимации до 3% от её максимума (рис. 5) разрешение растёт с амплитудой: $\sigma_a = 2.3 \oplus 0.002 \cdot a$ отсчёта.

На рис. 8 показаны гистограммы амплитуды выборки номер 0 при отсоединении/подсоединении генератора к входу УФ. Выборка 0 всегда находится вне импульса, и среднеквадратичное отклонение её распределения по амплитуде определяется шумом. При подсоединении генератора шум увеличивается с 0.7 до 2.1 отсчётов, т.е. в измеренном разрешении ВАЦП 2.4 отсчёта, вероятно, доминирует шум генератора.

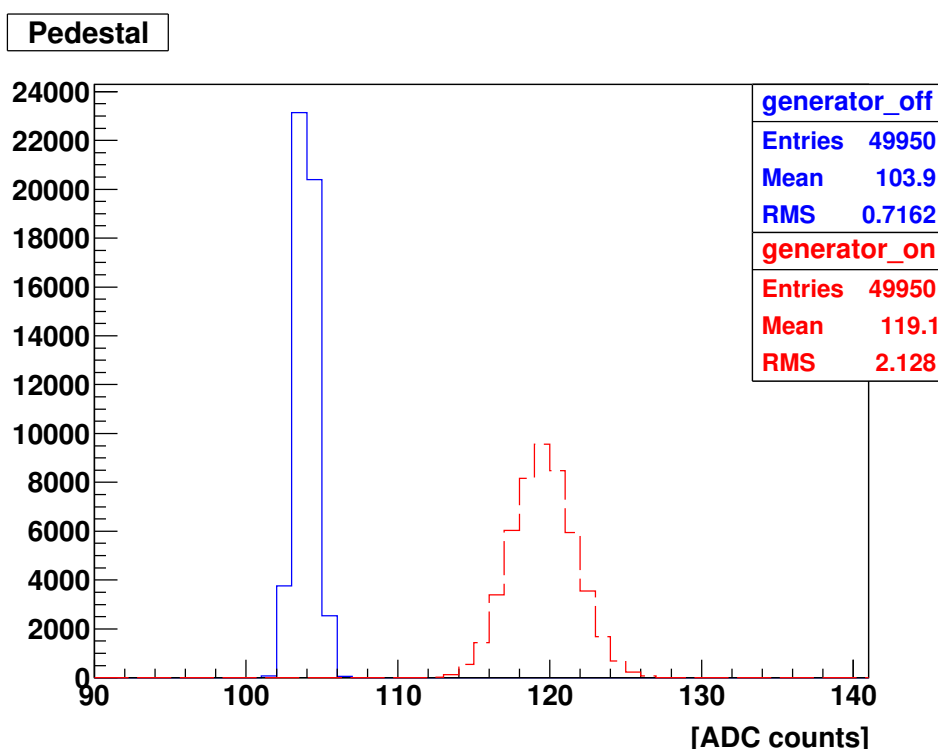


Рис. 8. Распределение по амплитуде начальной выборки ВАЦП с отсоединением (сплошная линия) и подсоединением (штриховая линия) генератора к УФ.

Для оценки перекрестных (межканальных) помех поочередно в каждый из 32-х каналов измерительного тракта многократно подавался стандартный сигнал фиксированной амплитуды 0.85 В (граница диапазона оцифровки), методом сдвига на фазу восстанавливались усредненные отклики в остальных каналах. Помеха характеризовалась максимальным по всем выборкам отклонением по модулю отклика от пьедестала. В каналах, соседних с возбуждаемым, наблюдается помеха величиной не более 1 отсчета (рис. 9).

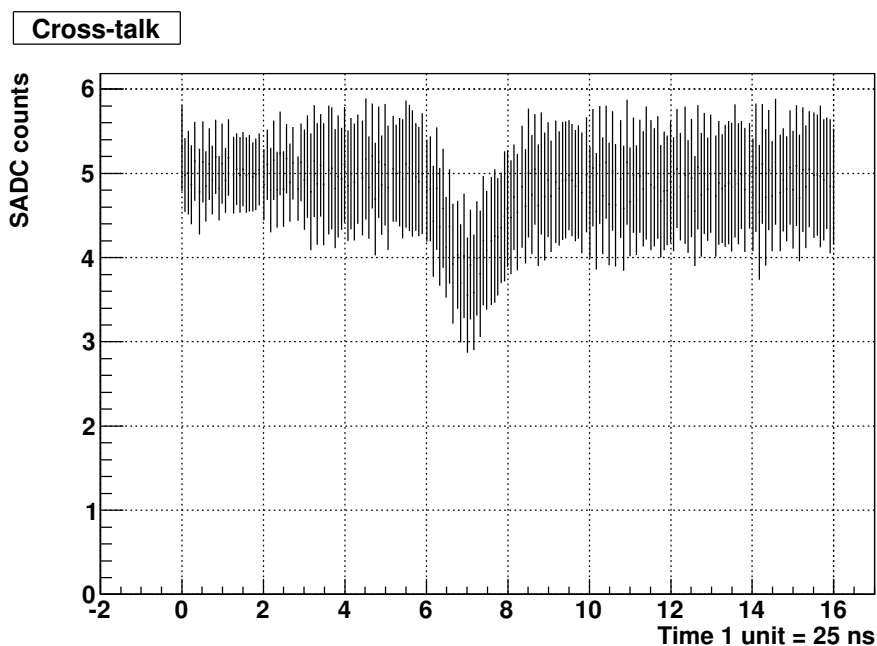


Рис. 9. Усредненный отклик канала ВАЦП, соседнего с возбуждаемым от генератора. Для удобства представления постоянное смещение (пьедестал) приведено к значению 5 отсчётов.

5. Тестирование на электронном пучке электромагнитного калориметра с ВАЦП

Методика применения ВАЦП, включая специально разработанные алгоритмы обработки данных, отрабатывалась на тестовых пучковых измерениях с рядом детекторов.

Одним из перспективных детекторов установки ВЕС для оснащения ВАЦП является ЭМК [5]. Полезными для калориметрии должны оказаться: динамическое измерение пьедестала; дискриминация сигнала от шума для одноячеистых кластеров; временная корреляция сигналов в многоячеистых кластерах; эффективно увеличенный динамический диапазон при фитировании сигнала с исключением выборок с превышением номинального диапазона.

Имеющихся возможностей пучка электронов, в первую очередь диапазона импульсов, недостаточно для отладки методики применения ВАЦП в ЭМК во всей полноте. Такая отладка возможна с использованием контролируемой "засветки" гамма-квантами от распадов нейтральных мезонов, но это потребовало бы пучковой экспозиции детектора достаточно большой площади в составе работающей установки.

Для подтверждения основных характеристик ВАЦП для целей калориметрии была проведена пробная экспозиция группы счетчиков ЭМК. Был задействован ограниченный набор других детекторов установки, позволяющий выработать триггер на пучковую частицу, а при дальнейшей обработке — идентифицировать ее и

восстановить траекторию. Использовался пучок отрицательно заряженных частиц, преимущественно электронов, с поперечным размером на плоскости ЭМК около 4 см. Номинальный импульс 10 ГэВ/с и диапазон импульсов определялся настройкой канала.

Для контрольных измерений в ЭМК была выделена сборка 6x6 малых счетчиков, оснащенных ИАЦП ([6]). Сборка позиционировалась на пучке поочередно каждым счетчиком и облучалась. На рис. 10 показан спектр экспонируемого на пучке счетчика (прилегающего к геометрическому центру сборки) с ИАЦП без требования идентификации пучка, с вычитанием отдельно измеренного среднего значения пьедестала.

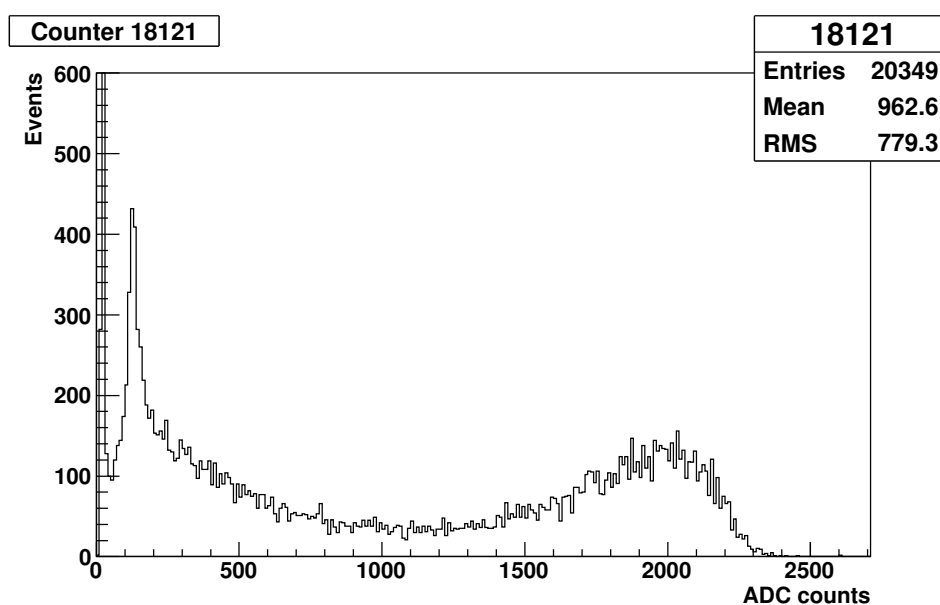


Рис. 10. Спектр показаний ИАЦП для одного из счетчиков ЭМК; среднее значение пьедестала выставлено в 20 отсчетов для удобства представления и без потери информации о начальном участке спектра

В спектре выделяются несколько структур: пьедестальный шум около нуля; пик энерговыделения с минимальной ионизацией (т.н. *mir* – пик) в области около 120 отсчетов; подложка от адронных взаимодействий во всем диапазоне энергий²; пик в середине шкалы от поглощения значительной доли электромагнитного ливня, правый край пика соответствует центральному попаданию электронов в счетчик. Калибровочные коэффициенты (в МэВ/отсчет ИАЦП) для счетчиков сборки определялись отдельной процедурой и использовались в дальнейшем.

Для испытаний центральная часть сборки (4x4, по числу смонтированных на печатной плате каналов ВАЦП) переключалась через УФ в ВАЦП, и процедура экспозиции с перемещением сборки повторялась.

Далее в данном разделе приняты следующие соглашения:

²Толщина счетчика ЭМК по пучку составляет около 1 длины яд. взаимодействия

1. Время прихода сигнала измеряется в системе отсчёта тактового генератора ВАЦП в периодах этого тактового сигнала. Моментам времени выборки ВАЦП соответствуют целые числа $0, 1, \dots$
2. Пьедестал считается нулевым (при применении теоретических конструкций к реальным сигналам пьедестал предварительно вычитается).
3. Считается, что события содержат единственный импульс, который полностью помещается в массив выборок ВАЦП. Это справедливо в силу низкой интенсивности пучка. В формулах для упрощения считается, что число выборок бесконечно: зарегистрированный массив выборок ВАЦП мысленно продолжается нулевыми выборками при целочисленных временах в обе стороны до бесконечности.

5.1. Метод восстановления формы одиночного импульса

В принципе, описанный в разделе 4 метод сдвига на фазу с усреднением может быть непосредственно применён и для реальных сигналов с любого детектора со стабильной формой импульса при условии, что полезный сигнал синхронизован с сигналом триггера. Однако относительная статистическая ошибка восстановления усредненного сигнала в каждом бине i по времени есть:

$$\sigma = \frac{\sigma_a}{\bar{a}} \frac{1}{\sqrt{N_i}}$$

где \bar{a} и σ_a — среднее значение амплитуды импульса и его среднеквадратичный разброс, N_i — число событий в бине.

В отличие от сигнала генератора, разброс амплитуды сигнала калориметра велик. В нашем случае (см. рис. 10) $\sigma_a/\bar{a} = 0.81$. При общем количестве событий в данном канале (счетчике) 20000 и ширине бина $1/10$ периода дискретизации АЦП точность восстановления импульса в бине составит 1.8%. Это значимо ограничивает точность восстановления формы импульса с заранее неизвестной параметризацией, а после этого затрудняет оценку отклонения параметризованной формы от реальной. Для преодоления этих проблем был разработан новый метод [7], неполное изложение которого приводится далее.

Метод состоит в том, чтобы вместо истинной экспериментальной формы импульса построить эффективную форму. Очевидно, что если бы мы знали в каждом событии интеграл сигнала, то предварительная нормировка на него выборки АЦП полностью погасила бы обсуждавшиеся выше статистические флуктуации. В реальности интеграл сигнала не известен, но можно попытаться использовать в качестве его оценки сумму амплитуд всех выборок сигнала. Соответственно возникает ошибка численного интегрирования истинной формы импульса методом прямоугольников с шагом по времени, равным периоду дискретизации ВАЦП. Для типичных модельных форм импульсов, похожих на реальные, она составляет всего несколько процентов.

Итак, вместо непосредственно измеренных значений выборок a_i для построения эффективной экспериментальной формы используются нормированные:

$$a'_i = a_i / \sum_k a_k$$

Если истинная форма импульса есть $f_0(t)$, то эффективная форма $f_{\text{eff}}(t)$ получается из неё с помощью следующей формулы:

$$f_{\text{eff}}(t) = f_0(t) / \sum_{k=-\infty}^{+\infty} f_0(t+k) \quad (2)$$

Очевидно, что знаменатель в формуле для $f_{\text{eff}}(t)$ есть периодическая функция с периодом единица. Более того, легко заметить, что если $f_0(t)$ умножить на произвольную периодическую функцию $r(t) > 0$ с периодом 1, то эффективная форма не изменится. Это означает, что хотя эффективная форма может быть экспериментально извлечена с существенно более высокой точностью, чем истинная, ценой этого является неизвестный периодический множитель $r(t)$.

Периодический множитель с периодом дискретизации ВАЦП является неестественным с физической точки зрения. Почти очевидно, что узкие классы функций, используемых для параметризаций, как 1 из раздела 3, не содержат в себе двух функций, отличающихся друг от друга на нетривиальный периодический множитель. Поэтому, если у нас есть параметризация для $f_0(t)$, мы можем образовать из неё параметризацию для $f_{\text{eff}}(t)$ и однозначно отфитировать экспериментальную эффективную форму. Существенным плюсом использования для фита эффективной формы является то, что уже на умеренной статистике можно наблюдать достаточно тонкие отличия параметризованной формы от экспериментальной. В первом приближении можно принять, что отличие будет такого же масштаба и для истинных форм (параметризованной и реальной).

Калориметрические измерения с ВАЦП были сделаны с ранней версией прошивки ПЛИС, в которой отсутствовало измерение точной фазы триггера. Помимо этого, всегда существуют флуктуации времени сигнала относительно триггера. Излагаемый метод является развитием метода сдвига по фазе, когда необходимое временное смещение ("фаза") определяется только из выборок ВАЦП.

Легко показать, что центр тяжести импульса:

$$\tau(t_0) = \int t f(t - t_0) dt / \int f(t) dt$$

обладает свойством:

$$\tau(t_0) = \tau(0) + t_0$$

то есть с точностью до постоянного сдвига является временем прихода сигнала. Можно по аналогии ввести его дискретный вариант:

$$T(t_0) = \sum_k k a_k / \sum_k a_k \quad (3)$$

где a_k — значения выборок ВАЦП, t_0 — время прихода сигнала, в общем случае не известное. Если известна истинная форма импульса $f_0(t)$, то

$$T(t_0) = \frac{\sum_k k f_0(k - t_0)}{\sum_k f_0(k - t_0)} = t_0 + \frac{\sum_k (k - t_0) f_0(k - t_0)}{\sum_k f_0(k - t_0)}$$

Очевидно, что последнее слагаемое есть периодическая функция с периодом единица, обозначим её $\psi(t_0)$:

$$T(t_0) = t_0 + \psi(t_0)$$

Поскольку T есть некоторое приближение к τ , полученное с помощью численного интегрирования, то следует ожидать, что для физически адекватных форм импульсов $\psi(t_0)$ отличается от константы на некоторую малую величину.

Обозначим обратную к $T(t_0)$ функцию (полагая ее существование) как $t_0(T)$. Если сдвинуть сигнал на 1 вправо (то есть увеличить t_0 на 1), то по определению дискретного центра тяжести T тоже увеличится на 1. Выразим это так: $t_0(T + 1) = t_0(T) + 1$. Значит,

$$t_0(T + 1) - (T + 1) = t_0(T) + 1 - (T + 1) = t_0(T) - T$$

Если ввести $\lambda(T)$ следующим образом:

$$t_0(T) = T + \lambda(T)$$

то получим: $\lambda(T + 1) = \lambda(T)$, т.е. λ периодична с периодом 1.

Поскольку $\lambda(T)$ есть константа с малой поправкой, то можно разложить её в ряд Фурье и ограничиться несколькими его первыми членами.

Распределение по t_0 является равномерным, если импульсы на входе АЦП никак не привязаны к фазе тактового генератора оцифровки. Плотность же распределения T есть производная $dt_0(T)/dT$. Если ограничиться первой гармоникой

$$\lambda(T) = \lambda_0 + a \sin 2\pi T + b \cos 2\pi T \quad (4)$$

то плотность распределения по T будет

$$\rho(T) = 1 + 2\pi a \cos 2\pi T - 2\pi b \sin 2\pi T \quad (5)$$

Фитируя экспериментальную гистограмму для T параметризацией $\rho(T)$ (с точностью до нормировки), можно определить неизвестные коэффициенты a и b и тем самым искомую функцию преобразования $t_0(T)$.

5.2. Результаты тестирования

Для восстановления формы импульса в ЭМК отбирались только события с большой амплитудой ($\sum_k a_k > 1000$) — это необходимо для получения высокого разрешения по T , а также снижения влияния шума УФ и повышенных флуктуаций самой формы импульса при малом количестве света в калориметре.

Гистограмма для T , построенного согласно (3), была отфитирована функцией (5) с параметрами a и b , см. рис. 11 (слева). Эти параметры задают (с точностью до λ_0) $\lambda(T)$ из (4). Распределение по $t_0 = T + \lambda(T)$ (рис. 11, справа) равномерно, как и должно быть. Константа λ_0 выбрана произвольно для смещения начала распределения к нулю.

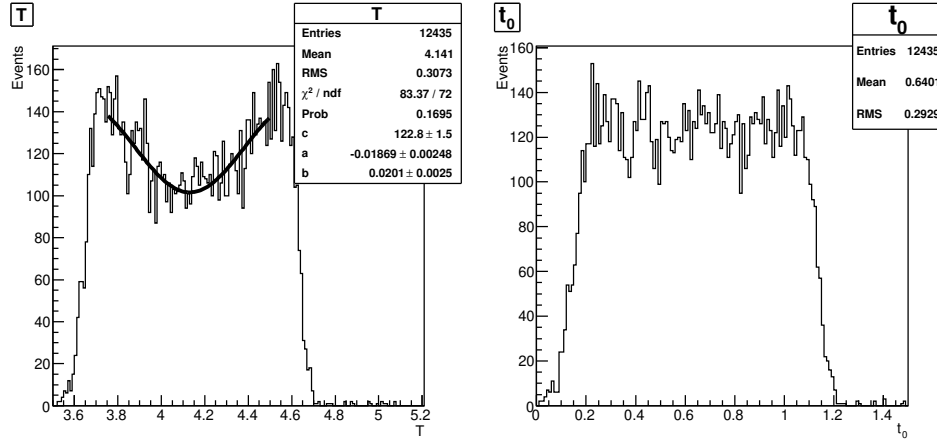


Рис. 11. Слева: распределение по времени "центра тяжести" (гистограмма) и его фит гармонической функцией (линия). Справа - распределение по "истинному" времени t_0 .

Вычисленные для каждого события t_0 использовались в качестве смещения по времени для построения эффективной формы импульса в данном канале в виде профильной гистограммы, см. рис. 12. Эта форма фитировалась функцией $f_{\text{eff}}(t)$, построенной на основе стандартной параметризации (1) по формуле (2). Подгоночная функция и отклонение данных от неё показаны здесь же.

Параметры фита $f_{\text{eff}}(t)$ были подставлены в параметризацию (1). Полученная в итоге форма $f_0(t)$ была использована для пособытийной подгонки измерений ВАЦП в данном канале одним импульсом с подлежащими определению амплитудой a сигнала и его временем прихода t_0 . Пьедестал определялся по первым двум выборкам. Среднеквадратичное отклонение амплитуды выборки номер 0 (шум) составляло примерно 1.5 отсчёта.

Спектр амплитуд a выравнивался с соответствующим спектром ИАЦП подбором коэффициента (≈ 1.3), имеющего смысл относительной чувствительности ВАЦП и ИАЦП в данном канале (рис. 13).

На рис. 14 показано двумерное распределение по временам t_0 импульсов центрального счетчика экспозиции (горизонтальная ось) и счетчика из его ближайшего окружения (вертикальная ось) для событий из области пика ЭМ-ливня. Диагональный "хвост" длиной ~ 5 нс в сторону меньших t_0 может быть связан с запаздыванием выработки триггера относительно пучкового времени из-за использования неоптимизированной пороговой схемы совпадений. Распределение по разности времен в 2-х счетчиках (рис. 15) имеет среднеквадратичное отклонение $\sigma_{\delta t} \approx 1.5$ нс. Это

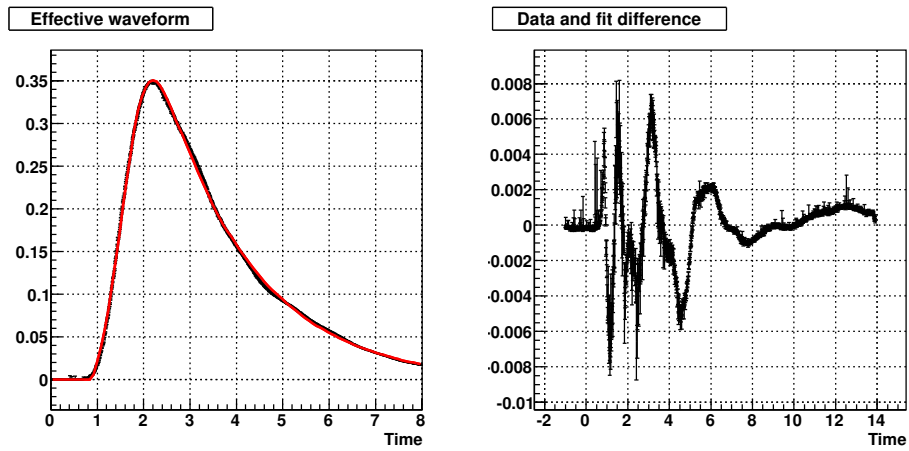


Рис. 12. Слева: эффективная форма импульса (точки профильной гистограммы с ошибками) для одного из каналов ЭМК и подгоночная функция (сплошная линия). Справа: отклонение эффективной формы от подгоночной функции.

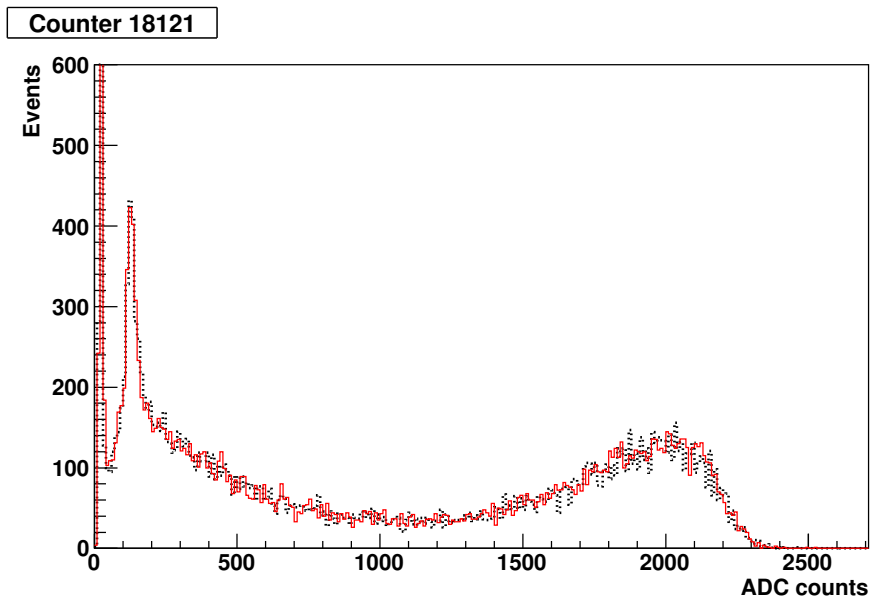


Рис. 13. Спектры ИАЦП (черные точки) и отфитированных амплитуд ВАЦП (сплошная красная линия). При фите не использовалась квадратичная параметризация амплитуды, упомянутая в п.3.

весьма большое значение связано с тем, что в построение гистограммы включены сигналы с амплитудами больше 6 отсчётов, а временное разрешение ВАЦП обратно пропорционально амплитуде.

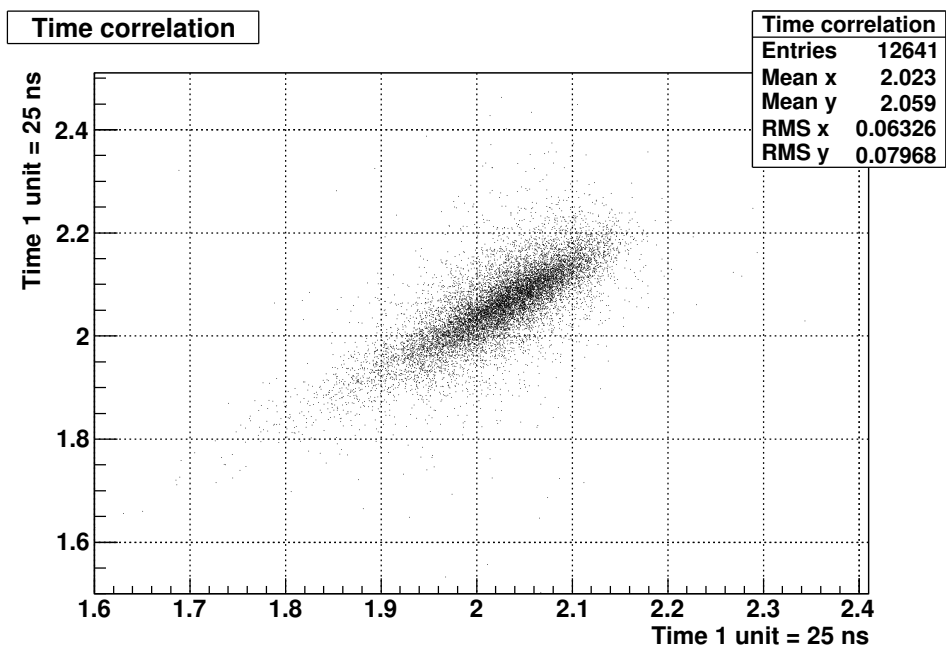


Рис. 14. Корреляция времен сигналов в двух счетчиках ЭМК

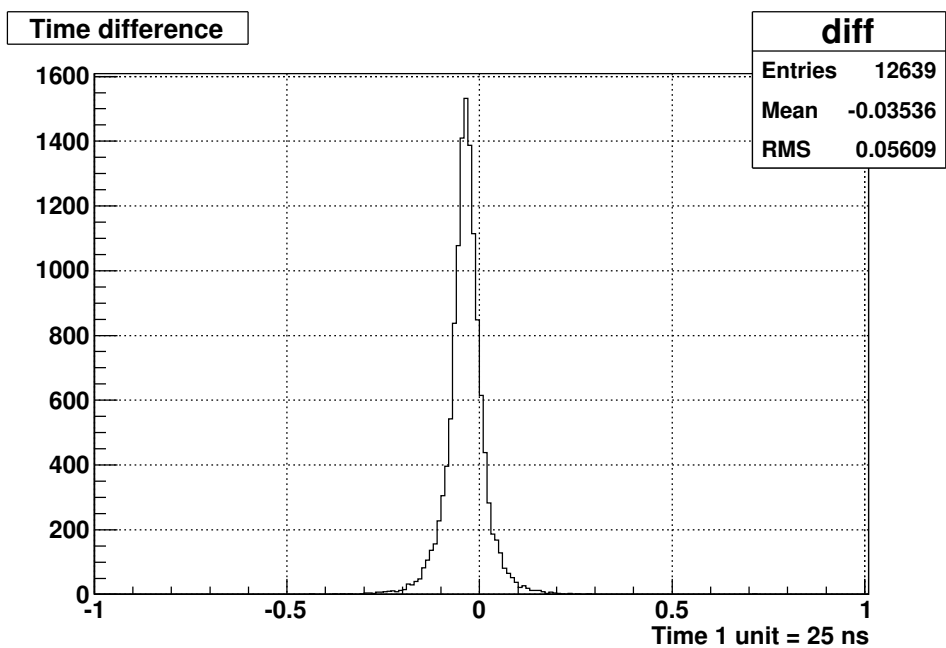


Рис. 15. Распределение по разности времен сигналов в двух счетчиках ЭМК

В дальнейшем на времена сигналов накладывалось условие отбора: $|t_0 - \bar{t}_0| < 0.7$ ед.

При идентификации электронов по пучковым черенковским счетчикам π^0 -пик исчезает, подавляется адронная подложка слева и под электронным пиком. Спектр для энергии ливня строился как сумма показаний ИАЦП или подгоночных амплитуд ВАЦП по всем модулям сборки, взвешенных с известными калибровочными коэффициентами. На рис. 16 показаны спектры энергии ливня при облучении пучком одного из счётчиков, измеренные с ИАЦП и ВАЦП. Отличающееся примерно на 100 МэВ положение результирующих гауссовских пиков связано с несовершенством калибровки. Разрешение σ_E/E составляет $3.530 \pm 0.026\%$ для ИАЦП и $3.550 \pm 0.026\%$ для ВАЦП. Для всех 16 счётчиков в пределах ошибок измерения разрешение ВАЦП не хуже разрешения ИАЦП. Можно оценить сверху вклад разрешения ВАЦП, связанный с неточным знанием или флуктуациями от события к событию формы импульса, как такая квадратичная добавка к разрешению (3.53%), которая приводит к увеличению разрешения на 2 ошибки измерения (0.052%). Определенный таким образом дополнительный вклад разрешения ВАЦП не более 0.6%.

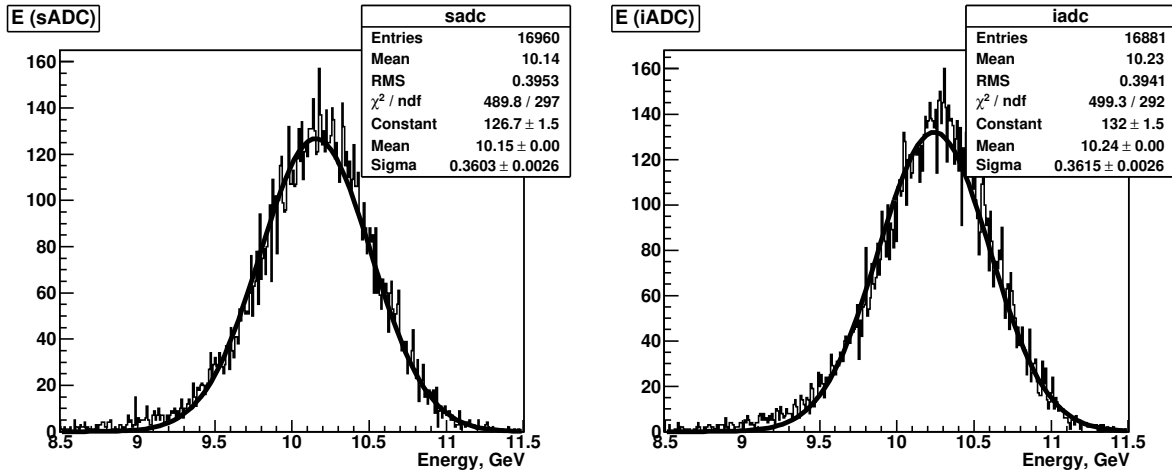


Рис. 16. Распределение по суммарной энергии в сборке модулей ЭМК с ВАЦП (слева) и ИАЦП (справа)

6. Применение ВАЦП на установке ВЕС для черенковских счётчиков и сцинтилляционных вето-счётчиков

6.1. Алгоритм для применения ВАЦП в условиях наложения импульсов

Пороговые пучковые черенковские счетчики установки ВЕС работают при высокой нагрузке. Главным требованием к алгоритму обработки данных с ВАЦП является эффективное обнаружение синхронного с триггером импульса в условиях наложения

импульсов. При этом точностные требования к измерению амплитуды второстепенны. Малое число каналов (счетчиков) позволило выполнить прямые осциллографические измерения для получения формы одиночного импульса на выходе УФ с укороченной формировкой.

Алгоритм ([8]) восстанавливает сигнал в данном канале ВАЦП в виде суммы одиночных импульсов. Он включает несколько шагов:

1. Определение пьедестала по начальным выборкам либо как среднее по большому числу событий заведомо без сигнала
2. Определение числа импульсов на основе поиска локальных максимумов, с дополнительными проверками и ограничениями
3. Задание стартовых значений параметров подгонки (амплитуд и времен)
4. Подгонка МНК с равновеликими ошибками

Результатом работы алгоритма являются набор пар амплитуда/время, задающие последовательность импульсов на пьедестале. Для целей идентификации пучковой частицы среди этих импульсов ищется т.н. "основной" - синхронный в пределах разрешения (некоторого временного окна) с триггером установки, остальные считаются пришедшими "не во-время" ("off-time"). На рис. 17 приведён пример обработки пучкового события с ВАЦП черенковского счётчика.

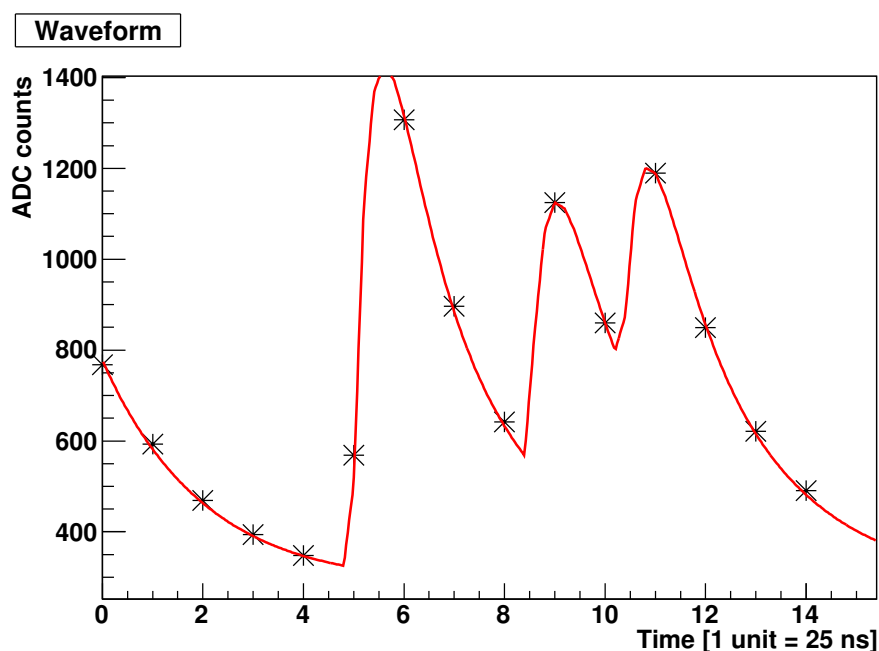


Рис. 17. Результат подгонки (сплошная линия) данных с ВАЦП пучкового черенковского счетчика (звездочки)

6.2. Результаты применения пучковых черенковских счетчиков с ВАЦП для идентификации частиц

Для идентификации частиц пучка на установке ВЕС в большинстве случаев используются три черенковских счетчика VCh. Показатели преломления (состав и давление газа) в них подбираются так, что при номинальном импульсе (29 ГэВ/с) превышение пороговой скорости черенковского излучения в двух из них достигается для частиц легче каонов, а в третьем - легче (анти)протонов. Условием идентификации по трем сортам частиц (пион, каон, антипротон) является непротиворечивость 3-х измерений. В противном случае сорт частицы считается неопределенным ("unknown").

При использовании для оцифровки ИАЦП с довольно широким интервалом интегрирования эффект наложения пучковых частиц приводил к ошибочной идентификации, что проявлялось среди прочего в сильной зависимости видимого состава пучка от его интенсивности, см. рис. 18.

Применение ВАЦП позволило разделить импульсы по времени. Распределение по времени основного ("on-time") импульса после поправки на точную фазу имеет среднеквадратичное отклонение $\sigma_t \approx 0.08 \text{ ed.} = 2 \text{ нс}$, включающее временные флуктуации ("джиттер") как сигнала со счетчика, так и триггера относительно пролета пучковой частицы.

Одним из следствий наложений является ложная идентификация каонов как пионов. Количественная оценка была получена по интенсивности пика от распада $K^- \rightarrow 3\pi^\pm$, происходящего на базе от последнего VCh до мишени установки, в спектре инвариантной массы $^3 M_{3\pi}$. По сортам идентификации с использованием ВАЦП события распада распределились следующим образом: K — 92%, π — 3.7%, \bar{p} — 0.4%, неопределенно — 4%. Для сравнения, соответствующие числа в экспозиции с ИАЦП составили около 57%, 32%, 0.2% и 10%. Таким образом, применение ВАЦП почти вдвое повысило эффективность идентификации каонов и на порядок снизило примесь каонов при идентификации пионов.

В настоящее время для дальнейшего улучшения идентификации VCh переведены на измерения в ВАЦП в т.н. режиме x4.

6.3. Применение ВАЦП в вето-счетчиках и многоканальном черенковском счетчике (МЧС)

По сравнению с калориметрическими и пучковыми измерениями, эти применения ВАЦП характеризуется умеренными нагрузками и требованиями к амплитудному разрешению. Использование развитого для ЭМК метода восстановления усредненной формы одиночного импульса позволило перевести оцифровку вето-счетчиков и МЧС в ВАЦП без трудоемких осциллографических измерений.

Счетчики вето-системы (18 штук) в кинематической области фрагментации мишени установлены сравнительно близко от неё, имеют весьма малые размеры ($< 10^3 \text{ см}^2$) и изготовлены на основе пластического скинтиллятора с довольно быстройдействующим ФЭУ-85. Таким образом, вариации времени "истинных" сигналов счет-

³Масса вторичных частиц полагалась равной массе пиона

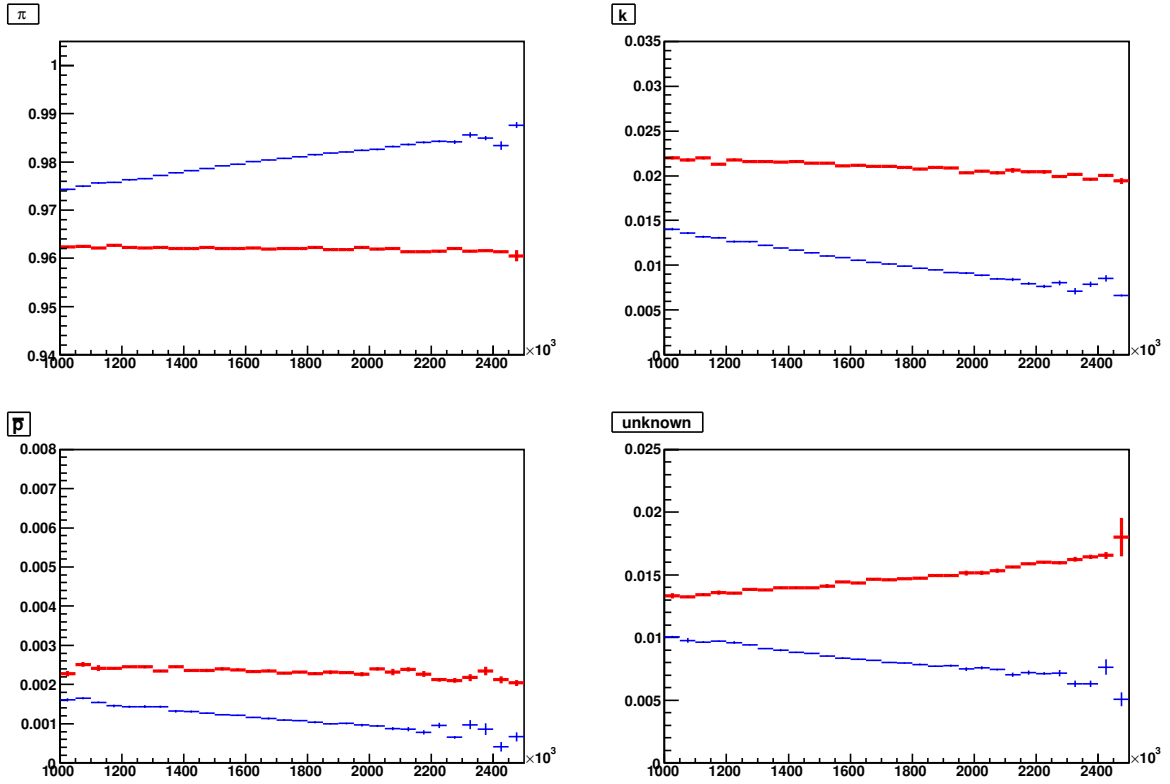


Рис. 18. Зависимость "сортности" идентификации пучка от его средней интенсивности (в s^{-1}): доли пионов (слева сверху), каонов (справа сверху) и антипротонов (слева внизу), а также неопределенного сорта (справа внизу). Красная (жирная) линия — при применении ВАЦП, синяя (тонкая) — ИАЦП.

чика относительно триггерного сигнала малы. Это позволило с помощью ВАЦП эффективно отделить их от фоновых срабатываний, которые при применении ИАЦП регистрировались примерно в 15% событий.

В МЧС вторичных частиц используются ФЭУ, которые характеризуются недостаточно выраженным амплитудным распределением одноэлектронных импульсов. Они оснащены чувствительными усилителями. Необходимость регистрации при таких условиях слабых сигналов ФЭУ, начиная с одноэлектронных, влечет высокую чувствительность к шумам различного происхождения. Применение ВАЦП вместо ИАЦП позволяет подавить несинхронные с триггером (шумовые) срабатывания.

7. Заключение

Разработаны формирователи сигналов для ВАЦП ADC-32ATC (12 бит, 40 МГц, 32 канала, 15 выборок на канал), методы и алгоритмы обработки данных с них. Выполнены стендовые измерения характеристик измерительного тракта. Интегральная нелинейность не превышает 0.1% в полном диапазоне. Амплитудное разрешение в среднеквадратичном смысле 2.4 отсчёта и не зависит от амплитуды входного сигнала. Межканальные наводки не более $2.5 \cdot 10^{-4}$ (-72 дБ).

Разрешение по времени с калиброванным ВЦП точной фазы триггера 63 пс в среднеквадратичном смысле при амплитуде сигнала 3000 отсчётов. Это делает перспективным применение ВАЦП в качестве высокоточного ВЦП, например, для времяпролетных измерений, для измерения взаимного "джиттера" пучковых сцинтилляционных счетчиков, для точной временной привязки событий к триггеру "off-line" без применения формирователей со следящим порогом.

Получен опыт работы с детекторами на пучках частиц. Применение ВАЦП с пучковыми черенковскими счетчиками при высокой загрузке позволило улучшить идентификацию пучковых частиц. На оцифровку ВАЦП переведены вето-счетчики и многоканальный черенковский счетчик.

Применение ВАЦП к калориметрии 10-ГэВ-ных электронов на калориметре типа "шашлык" свинец-сцинтиллятор не выявило их дополнительного по сравнению с ИАЦП вклада в энергетическое разрешение σ_E/E ; оценка сверху дополнительного вклада составляет 0.6%.

Список литературы

- [1] Волков Е.В. и др. Автономный модуль амплитудно-цифрового преобразования ADC-32ATC с оцифровкой формы импульса. Препринт ИФВЭ 2017-8. Протвино, 2017.
- [2] Analog Devices. AD9222 — Octal, 12-bit, 40/50/65 MSPS Serial LVDS 1.8V A/D Converter. Rev. F. Data sheet.

- [3] Igor Kachaev. PWA tools and methods developed by VES group. Athos 2013.
<http://bison.ihep.su/~kachaev/Powell/README>
<http://bison.ihep.su/~kachaev/Powell/uobyqc-0.9.tar.gz>
- [4] Powell M.J.D. UOBYQA: unconstrained optimization by quadratic approximation. Mathematical Programming, Series B (Springer) 92: 555–582. 2002.
- [5] Дорофеев В. и др. Новый электромагнитный калориметр модернизированной установки ВЕС. ПТЭ 2016, №5, с. 38-46
- [6] Сенько В.А., Солдатов М.М., Якимчук В.И. 96-канальный модуль МИСС преобразования "заряд-цифра" для калориметров физики высоких энергий. Препринт ИФВЭ 2012-19. Протвино, 2012
- [7] Ивашин А.В. Частное сообщение
- [8] Еремеев Д.Р. Применение конвейерных АЦП в эксперименте ВЕС. Магистерская работа. МФТИ, 2017. http://www.ihep.ru/files/Eremeev_diploma.pdf

Рукопись поступила 17 мая 2019 г.

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного авторами.

Еремеев Д.Р. и др.

Применение модуля ADC-32АТС с оцифровкой формы импульса на установке ВЕС.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы **L^AT_EX**.

Подписано к печати 27.05.2019 Формат 60 × 84/16. Цифровая печать.
Печ.л. 1,9. Уч.-изд.л. 2,68. Тираж 80. Заказ 3. Индекс 3649.

НИИ «Курчатовский институт» – ИФВЭ
142281, Московская область, г. Протвино, пл. Науки, 1

www.ihep.ru; библиотека <http://web.ihep.su/library/pubs/all-w.htm>

Индекс 3649

П Р Е П Р И Н Т 2019-2,
НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, 2019
