

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Московский физико-технический институт (государственный университет)».
Факультет общей и прикладной физики.
Кафедра «Физика высоких энергий».

Выпускная квалификационная работа
(магистерская работа)

Применение «конвейерных» АЦП на установке ВЕС

Выполнил:
студент 124-п группы: _____ Еремеев Дмитрий Романович

Научный руководитель:
к.ф.-м.н. _____ Хохлов Юрий Анатольевич

Рецензент:
к.ф.-м.н. _____ Гапиенко Владимир Алексеевич

Москва
29 июня 2017

Оглавление.

1	Введение.....	3
2	Инструментальная часть.....	6
2.1	Параметры АЦП.....	6
2.2	Формирователь.....	7
2.3	Стендовое изучение.....	9
	Измерения фазы триггера.....	9
	Измерения формы сигнала при помощи осциллографа и методом смещения фазы.....	12
	Подбор функции описывающей сформированный сигнал.....	12
	Нелинейность.....	13
2.4	Измерения перекрёстных помех.....	16
2.5	Дрейф пьедестала.....	17
2.6	Измерения на сигналах от детекторов частиц.....	18
	Измерение формы сигналов от пучковых черенковских счётчиков.....	18
	Вето-счётчики.....	18
	Ch28.....	19
3	Разработка и применение ПО.....	20
3.1	Основной алгоритм.....	20
3.2	Численное моделирование.....	24
3.3	Процессор.....	26
3.4	Формат хранения данных DST.....	29
3.5	Функция идентификации пучковых частиц.....	31
3.6	Применение в пучковых экспозициях (сеансах) и их обработке.....	32
3.7	Влияние pileup на идентификацию.....	35
3.8	Влияние ширины ворот на идентификацию.....	37
3.9	Оценки «чистоты» идентификации.....	39
	Идентификация электронов.....	40
4	Тестовые измерения с ЭМК.....	43
5	Заключение.....	45
6	Список литературы.....	46
	Приложение.....	47

1 Введение

В данной работе представлен опыт применения модуля 32-х канального амплитудно-цифрового преобразования ADC-32АТС на установке ВЕС ИФВЭ. Модуль предназначен для оцифровки сигналов с детекторов частиц, работающих в составе установок на ускорителях с циклическим выводом пучков на фиксированные мишени.

На установке ВЕС большая система амплитудного анализа (1600 каналов) на основе интегрирующих АЦП, в основном – для ЭМК(электромагнитный калориметр) [0], а также ВCh1-3(пучковые черенковские счётчики), Ch-28(большой черенковский счётчик), вето(охранные счётчики). На замену им в Лаборатории Адронной Спектроскопии ИФВЭ разработан и изготовлен модуль ADC-32АТС[1] и несколько типов/вариантов формирователей для согласования, нормализации, отбора входных сигналов. Данный модуль также будет использоваться для работы с прототипом активной мишени (АМ) на ячеистых лавинных фотодиодах (ЯЛФД, SiPM).

Преимущества модуля ADC-32АТС связаны с тем, что в нём используются высокоскоростные конвейерные АЦП типа SHC (sample-and-hold) с тактовой частотой оцифровки до 65 МГц. Данные АЦП позволяют анализировать не только конечную величину амплитуды сигнала, но, так же получить информацию о его форме. Наличие такой информации позволяет получить ряд важных преимуществ, таких как: подавление шумов различного рода, например, связанных со случайным наложением событий(pile-up шумы), шумов ФЭУ, уменьшить дрейф пьедесталов, и т.д. Использование конвейерных АЦП так же позволяет расширить динамический диапазон детектора. Кроме того, имеется ряд попутных преимуществ вытекающих из данной реализации: малое мертвое время отклика прибора, возможность применения внутренней цифровой задержки, что избавляет от необходимости использования внешних задержек сигнала, например, таких как кабели, удобная настройка режима работы в виде выбора рабочих окон считывания сигналов, использование пороговой фильтрации, и т. д.

Важным эксплуатационным качеством является возможность расположения модуля в непосредственной близости от детектора(«наддетекторное размещение»). В сочетании с программным построением события системы сбора данных это дает ряд преимуществ по сравнению с традиционной магистрально-модульной архитектурой. Важным преимуществом является высокая степень самодостаточности модуля с возможностью гибкого масштабирования и расширения функциональности, что позволяет сравнительно легко добавлять новые модули или вводить новые подсистемы. Кроме того, стоит отметить: удобство монтажа и настройки; гибкость конфигурирования архитектуры; минимизация номиналов внешних источников питания (ИП); уменьшение количества кабелей; возможность применения промышленных каналов передачи (E-net, USB) и сетевого оборудования; использование каркаса теперь диктуется только удобством механического размещения; использование современной элементной базы.

Наряду со значительными преимуществами данного подхода возникают и некоторые проблемы, такие как: сложность и стоимость изготовления модулей, увеличение объема передаваемых и хранимых данных, относительно более сложная их обработка. Наличие межканальной наводки (crosstalk) по типу дифференцирования сигнала. Она сказывается на

результате оцифровки и требует тщательного аппаратного подавления, в отличие от интегратора со средним зарядом 0.

Сеанс	Время	АЦП	Тип	Число выборок	Спецсигнал	"Перескок" фазы	Детекторы	Примечание.
44	Осень 2012	интегр.	физический	0				
46	Осень 2014	конв.	методический	15		+	Bch, Ecal	Первое использование SADC
47	Весна 2015	конв.	физический	16		+	Bch, Veto	
48	Осень 2015	конв.	физический	16	+	+	Bch, Veto	Заведён спецсигнал
49	Весна 2016	конв.	методический	16	+		Bch	Устранён "перескок" фазы
50	Осень 2016	конв.	физический	16	+		Bch, Veto	Добавлено считывание тонкой фазы
51	Весна 2017	конв.	методический	16	+		Ch28	Тестовые измерения Ch28

Табл. 1 Общие сведения о применении SADC в сеансах ВЕС. (см. текст)

Впервые SADC на установке ВЕС были применены в, так называемом, 46 сеансе (пучковой экспозиции), прошедшем осенью 2014 года.

Общие сведения по сеансам приведены в Табл. 1.

Предполагается использование в следующих детекторах:

1. Пучковые черенковские счётчики (VCh). Три газовых счётчика расположенных до мишени и предназначенные для идентификации пучковых частиц. Здесь в полной мере может быть использовано преимущество наличия информации о форме сигналов для очистки от pileup.
2. Электромагнитный калориметр (ЭМК,[2]). Предназначен для измерения энергий и координат гамма-квантов и электронов. Состоит из 1552 ячеек, каждая из которых представляет собой пакет пластин свинец-сцинтиллятор со спектросмещающими волокнами.
3. Большой черенковский счётчик (Ch28). 28-канальный счётчик предназначенный для идентификации вторичных частиц.
4. Вето-счётчик (Veto, Guard). Состоит из окружающих мишень восьми внутренних сцинтилляционных и десяти внешних «сэндвичей» свинец-сцинтиллятор. Внутренние счётчики входят в триггер установки и на данный момент считываются посредством конвейерных АЦП. В будущем планируется перевести оставшиеся 8 счётчиков на SADC.
5. Активная мишень (AT,[3]). Детектор предназначен для измерения импульса и направления отдачи нуклона в мишени. Чувствительный объём составляют сцинтилляционные волокна в которых ионизационные потери частиц переизлучаются в видимую часть спектра и детектируются при помощи ЯЛФД (SiPM). На данный момент находится в стадии разработки. В этом дипломе работа с ЯЛФД не рассматривается.

Основные задачи выполненные в данной дипломной работе:

1. Разработано и реализовано новое программное обеспечение работающее с модулем SADC.
2. Выполнены стендовые измерения различных характеристик модуля, такие как: нелинейность, перекрестные наводки, дрейф пьедесталов, временные характеристики.
3. Проведена обработка экспериментальных данных, полученных во время использования модуля в составе установки.
4. Проведено выявление и анализ различных поломок и проблем, а так же, их полное или частичное устранение.

5. Был получен опыт работы с конвейерными АЦП и аналоговыми формирователями.

Некоторые используемые определения:

- SADC - конвейерные АЦП
- «Хит» - в данном случае совокупность выборок с одного канала АЦП, представляющих собой осциллограмму.
- «Событие» - совокупность хитов попавших в определённый временной интервал от триггера.
- «Сброс»(спилл) - совокупность всех событий записанных за время вывода частиц из ускорителя. В каждом сбросе содержится около 30 тыс. событий («триггеров»).
- «Pileup» - наложение нескольких сигналов, вызванное прохождением частиц близких по времени к рассматриваемым.

2 Инструментальная часть.

2.1 Параметры АЦП.

В модуле используются высокоскоростные конвейерные трехкаскадные АЦП типа SHC (sample-and-hold), 8 канальные, 12 битные с частотой оцифровки до 40 - 65 МГц. Частота оцифровки зависит от используемой элементной базы. В рассматриваемом модуле частота считывания составляет 40 МГц (промежуток между выборками - 25 нс). Максимальное число выборок: 16. Окно во время которого производится считывание составляет 400 нс.

Модуль предназначен для цифровой обработки быстрых сигналов детекторов частиц в 2-х-тактном рабочем цикле, определяемом работой ускорителя. В 1-м такте - т.н. **сбросе** - во время вывода частиц из ускорителя, на вход модуля поступает случайный (пуассоновский) поток аналоговых сигналов. Эти сигналы подвергаются оцифровке, первичной обработке и буферизации. Во 2^м такте, во время подготовки ускорителя к следующему сбросу, буферизованные в течение сброса данные передаются на компьютер. На ускорителе протонов У-70 типичная длительность цикла около 10 с, сброса – около 2 с. Для отладочных целей в модуле предусмотрена возможность внутренней генерации цикла с произвольной структурой.

Модуль обеспечивает следующие функции:

- тактируемую оцифровку аналоговых сигналов, поступающих по 32 независимым каналам; предусмотрена возможность маскирования (исключения) каналов;
- организацию конвейерного потока цифровых данных и их синхронный отбор из потока по триггерному сигналу с заданным временным окном и количеством выборок (тактов);
- пороговую фильтрацию и форматирование данных; отобранные по триггеру, обработанные и отформатированные данные со всего модуля составляют т.н. «событие»; событие дополняется заголовком;
- буферизацию событий за весь сброс, формирование заголовка сброса и передачу всех данных сброса (заголовка и событий) в компьютер.

Мёртвое время зависит от частоты, числа выборок, числа замаскированных каналов. Минимальное мёртвое время при частоте 40МГц и 32 каналах составляет 1.6 мкс, максимальное - 3.6 мкс.

Возможна установка задержки между триггерным сигналом и данными от 1 до 128 тактов АЦП. При установке задержки в 64 такта триггер по времени совпадает с приходом данных.

Модуль позволяет быстро устанавливать пороги срабатывания, число выдаваемых выборок и маскирование каналов.

В основной моде работы данные от модуля поступают в компьютер системы сбора данных (ССД) по локальной сети Ethernet-1000. Для отладки и тестирования в модуле реализована передача данных в компьютер по шине USB-2.0

Модуль ADC-32АТС выполнен в виде платы размером 230 X 160мм. (соответствует евромеханике), питание составляет +8÷12В., потребление (без формиратора) — 0,75А.

2.2 Формирователь

Исходные сигналы с разных детекторов имеют сильно различающиеся характеристики. Их необходимо нормализовать в дифференциальный сигнал с динамическим диапазоном до ± 2 В и минимальными длительностями переднего и заднего фронтов, диктуемыми максимальной частотой тактирования АЦП. Для этой цели служат модули специализированных 32-канальных формирователей, подсоединяемых к модулю ADC-32АТС через многоконтактный разъем. Через этот же разъем на модуль формирователя подается набор питаний (+5 В, -5 В, +3.3 В, +1.8 В) и линии специальных интерфейсов. Схема формирователя приведена на (Рис. 1).

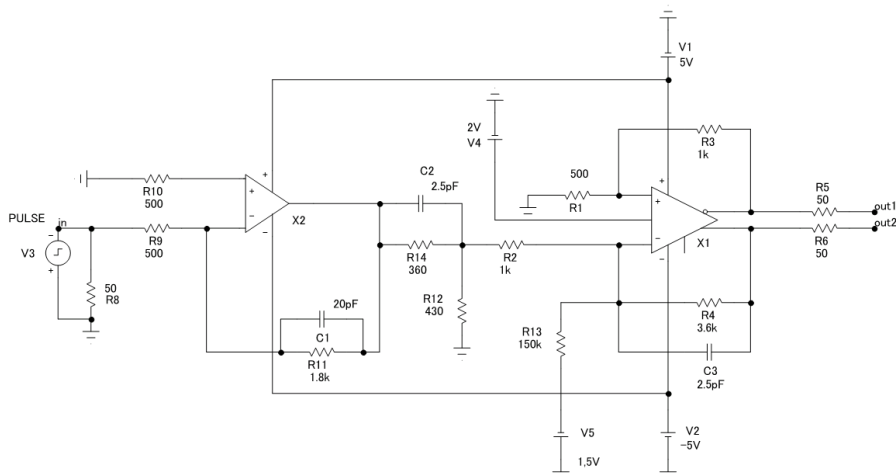


Рис. 1: Принципиальная схема усилителя-формирователя.

На данный момент существует три модификации формирователя:

- 1) Для сигналов с активной мишени на ЯЛФД (ячеистый лавинный фотодиод). Отличается наличием цепи для подачи питания на ЯЛФД, временем формирования и большим коэффициентом усиления.
- 2) Для пучковых черенковских и вето-счётчиков вокруг мишени на 16 каналов.
- 3) Модификация второго варианта на 32 канала с большей длительностью формирования.

	ВCh1-3	Вето	Ch28	ЭМК	ЯЛФД	Стенд
форм. 1					+	
2	+	+		+		
3			+			+

Табл. 2: Применение формирователей в составе детекторов.

Рассматриваемые формирователи предназначены для растяжения по времени коротких сигналов с детекторов частиц, поэтому сигнал с генератора взят достаточно коротким по сравнению со временем формирования, что в хорошем приближении совпадает с δ -функцией, как и сигналы с большинства обсуждаемых ниже детекторов. По той же причине одна и та же форма функции используется, как при упражнениях с генератором, так и при обработке данных с различных детекторов.

При моделировании на вход подаётся трапециевидный сигнал со следующими параметрами: ширина: 30 нс, время нарастания: 5 нс, время спада: 5 нс, амплитуда: -100 мВ.

Параметры выходного сигнала:

время нарастания: 86.486 нс (~3.5 выборки), время спада: 202.7 нс (~8 выборок),
амплитуда: 1.373 В.

Результаты моделирования в программе MicroCap9 прохождения сигнала приведены на Рис. 2.

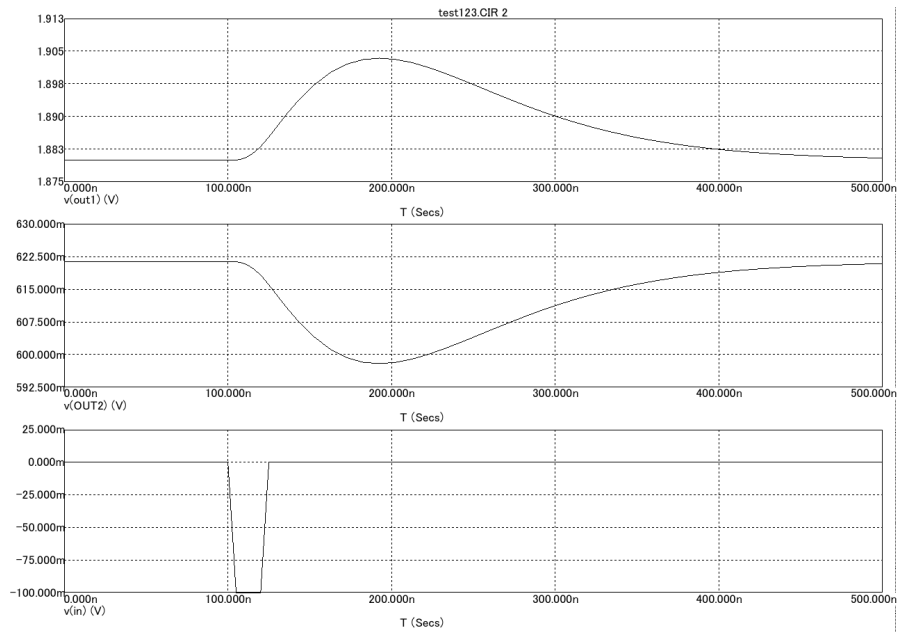


Рис. 2: 1,2) две выходные фазы; 3) входной сигнал.

2.3 Стендовое изучение

Для изучения характеристик формирователя и платы АЦП был создан стенд.

Основные задачи:

1. Измерения фазы триггера.
2. Измерения параметров сформированного сигнала.
3. Восстановление формы сигнала по данным с АЦП.
4. Подбор вида функции для описания выходного сигнала.
5. Измерения нелинейности.
6. Измерения crosstalk.
7. Оценка стабильности пьедестала.

Состав стенда:

1. Генератор Tektronix-AFG3102.
2. Осциллограф LeCroy-WaveRunner606Zi.
3. Источник питания.
4. Компьютер с Ethernet-каналом для SADC.
5. Плата SADC и усилитель-формирователь.

Функционал:

1. Автоматическое управление генератором.
2. Считывание осциллографа.
3. Считывание данных модуля.

Плата АЦП в режиме внутренних запусков способна самостоятельно генерировать циклы с произвольной структурой (число событий в сбросе, задержка между сбросами, задержка между событиями) с выдачей триггеров. От выдаваемого платой триггера запускается генератор. Генератор подключен к компьютеру по Ethernet- каналу что позволяет управлять параметрами выходного сигнала.

На вход платы формирователя подаётся типовой сигнал генератора (раздел 2.2).

Измерения фазы триггера.

Фазой триггерного сигнала называется задержка между передним фронтом триггерного сигнала (на входе модуля АЦП) и передним фронтом его синхронизированной версии (с 40 МГц тактовым сигналом АЦП). С точностью до константного вклада эта фаза есть временной интервал между временем какой-либо из выборок АЦП и временем прихода внешнего триггера, то есть для синхронного с триггером сигнала фаза есть время прихода сигнала относительно выборок АЦП (с точностью до знака и константного вклада).

Фаза триггера кодируется тремя пятибитными числами. Первое из которых представляет собой грубую фазу, а два оставшихся- поправки к ней.

Для получения фазы можно использовать 2 метода:

1. Грубый. Просто берётся значение грубой фазы S . Дискретность составляет 2.083 нс, что соответствует тактовой частоте 480 МГц. Распределение по фазе приведено на

рис. 3. Максимальное значение фазы соответствует отношению тактовой частоты к частоте выборок (480/40). Грубая фаза равномерно распределена от 0 до 12 единиц и с периодом равным 4 мс пробегает от большего значения к меньшему (Рис. 4).

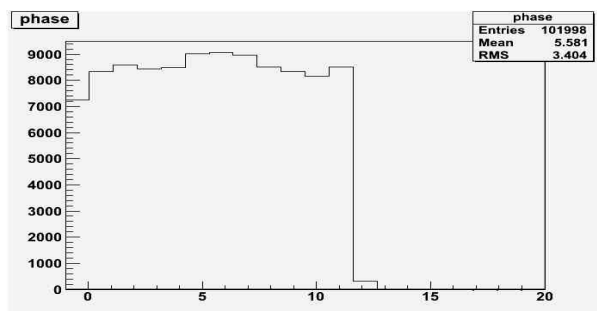


Рис. 3: Распределение по C (грубой фазе).

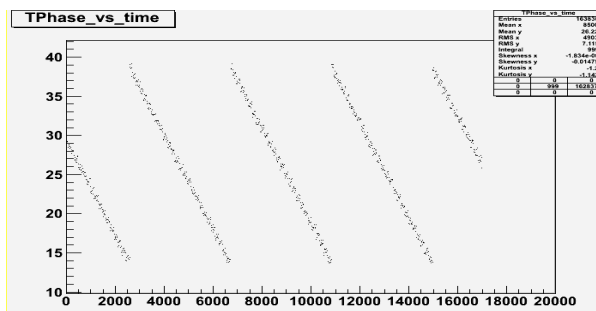


Рис. 4: Зависимость фазы C от времени (мс.).

2. Точный. В качестве фазы берётся величина:

$$T_{phase} = C - \Delta_0 + \Delta_1;$$

C - грубая фаза,
 Δ_0 и Δ_1 - поправки к ней,

Тактирующий сигнал CLK асинхронен, как по отношению к триггеру ST (запускающему сигналу), так и по отношению к блоку АЦП ST_SYNC (40МГц). Возникает необходимость в наличии двух поправок (Рис. 5). Физически в «прошивке» ПЛИС (Программируемая логическая интегральная схема) Δ_0 , Δ_1 формируются с помощью вентиляльной линии задержки с отводами, в качестве которой берётся цепь быстрого переноса для реализации сумматоров в ПЛИС (Рис. 6).

Все триггеры тактируются сигналом CLK (480 МГц) в результате в каждом такте в триггерах оказывается снимок линии задержки в момент фронта тактового сигнала. Далее цепочка триггеров анализируется и в ней ищется переход из 0 в 1 типа 000001111111, номер позиции этого перехода от 0 до 31 и записывается в качестве Δ_0 или Δ_1 .

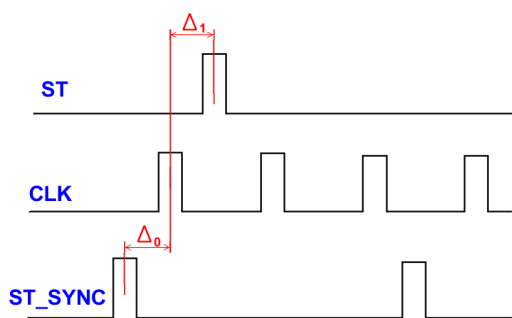


Рис. 5: Δ_0 , Δ_1 - поправки к фазе. ST- триггер. CLK- «clock» счётчика. ST_SYNC- «clock» АЦП.

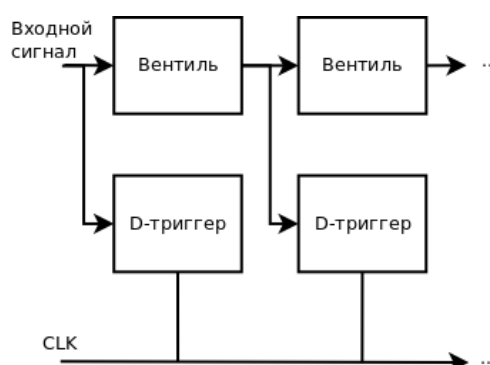


Рис. 6: Формирование поправки к фазе Δ .

При равномерной шкале $T_{phase} = C - \Delta_0 + \Delta_1$, но отсчёты имеют разные ширины (вследствие разброса параметров вентиляй, триггеров, системы разводки сигналов в ПЛИС, скачков питания, температуры), поэтому применена следующая процедура: строятся калибровочные гистограммы $H(\Delta_0)$, $H(\Delta_1)$ по достаточно большому числу событий (>10000) (рис. 7 и 8).

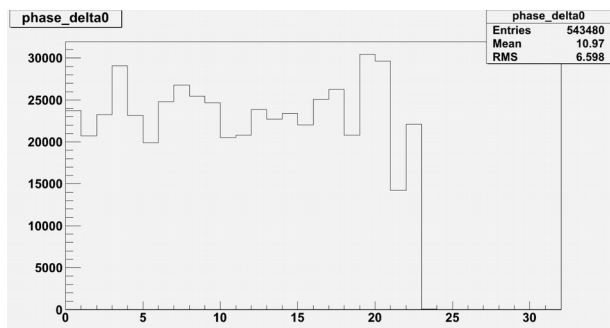


Рис. 7: Распределение по Δ_0 (первая поправка к фазе).

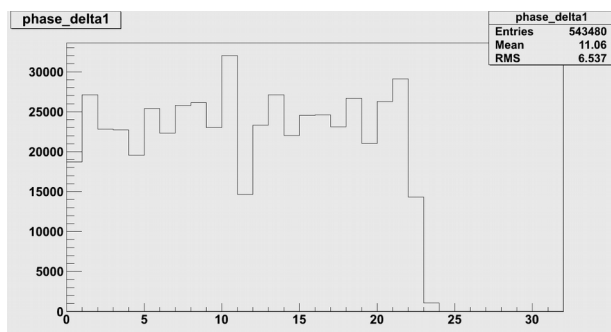


Рис. 8: Распределение по Δ_1 (вторая поправка к фазе).

Функция преобразования $T(\Delta)$ находится следующим способом:

$$T_0[i] = \left(\sum_{a=0}^{a=i-1} H[a] \right) / N_{event};$$

Окончательно точная фаза вычисляется по формуле:

$$T_{phase} = (C - T_0[\Delta_0] + T_1[\Delta_1]) * 2.083.$$

T_0 и T_1 - функции преобразования.

2.083 нс - «шаг» фазы триггера.

Значение получается в наносекундах.

Итоговое разрешение (RMS) по времени равно 0.07 нс [10].

После первой обработки данных с SADC была обнаружена неисправность в проекте связанная с неоднозначностью определения фазы триггера. В половине случаев вместо максимального значения грубой фазы 12 выдавался 0 или 1. Для устранения этой неоднозначности в gup48 в один из каналов АЦП был заведён триггерный сигнал. По положению этого сигнала определялось наличие перескока в каждом событии. Добавление спецсигнала позволило, также, обнаружить некорректную запись данных в 1% событий. Начиная с gup49, обе эти проблемы устранены.

Измерения формы сигнала при помощи осциллографа и методом смещения фазы.

На (Рис. 9) показана измеренная осциллографом форма сигнала на выходе формирователя с включёнными выборками (sampling). Хорошо видны пики во время открытия/закрытия конденсаторов. Расстояние между пиками равно 25 нс. Положение пика относительно начала сигнала зависит от фазы триггера.

Для измерения неискажённой формы необходимо отключить процесс считывания конвейерных АЦП. На (Рис. 10) точками показаны 20 сигналов снятых на выходе осциллографа наложенных на одну картинку. Затем были включены выборки и записаны 256 оцифрованных событий с АЦП при том же входном сигнале. Каждый хит (16 выборок) был отложен на одном и том же графике со сдвигом по времени на грубую фазу триггера согласно формуле:

$$t(i) = i - \frac{t_{phase}}{12}; i = 0, 1, 2, \dots, 15;$$

t_i — новое положение выборки.

i - номер выборки.

t_{phase} - фаза триггера.

В результате такого «**смещения на фазу**» получается усреднённая восстановленная форма сигнала. На (Рис. 10) крестами изображена восстановленная форма. Видно хорошее соответствие исходного и восстановленного импульсов, отсутствие значительных искажений.

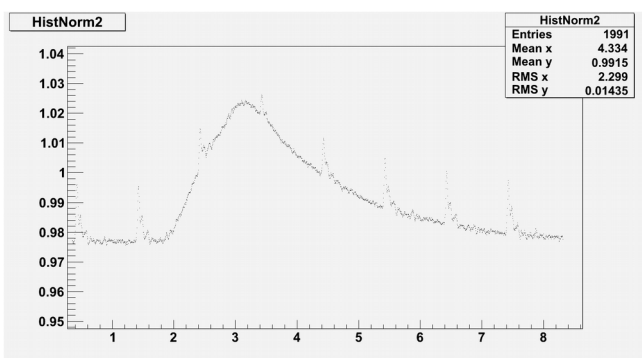


Рис. 9: Форма сигнала с включённым сэмплением.

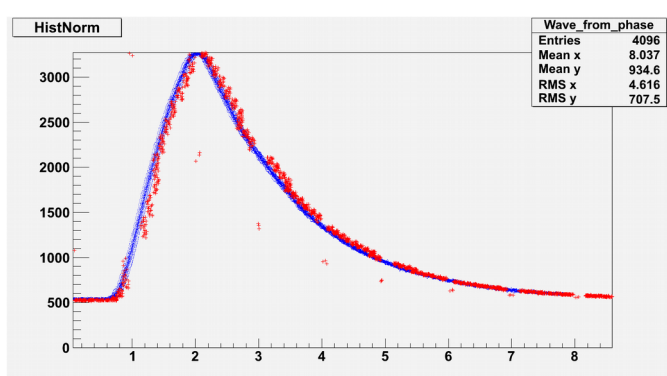


Рис. 10: точками показаны 20 сигналов на выходе формирователя измеренные осциллографом. Кресты: восстановленный путём поправки на фазу сигнал.

Подбор функции описывающей сформированный сигнал.

Полученная форма описывается функцией (1) со своими параметрами для каждого канала. В дальнейшем везде используется функция такого вида.

$$\theta(t-t_0) * \frac{1}{e^{\frac{(-t+C_1+t_0)}{C_2}} + 1} * (t-t_0) * A * (e^{-\alpha*(t-t_0)} + B * e^{-\beta*(t-t_0)}) \quad (1)$$

$A(t-t_0)(e^{-\alpha(t-t_0)} + B * e^{-\beta(t-t_0)})$ - хорошее приближение для отклика идеализированной времяформирующей цепи (при бесконечной и равномерной полосе частот операционного усилителя) на входную δ -функцию.

t_0 - начало сигнала.

A - амплитуда сигнала.

θ - тета функция Хевисайда.

$(t - t_0)$ - линейная функция.

$e^{-\alpha(t-t_0)}$ - «медленная» экспонента.

$e^{-\beta(t-t_0)}$ - «быстрая» экспонента $\alpha > \beta$.

B - отношение «медленной» и «быстрой» экспонент.

$\frac{1}{e^{\frac{t_0-t+C_1}{C_2}} + 1}$ - зеркально отражённая функция Ферми.

C_1 - сдвиг функции Ферми по времени.

C_2 - «растяжка» функции Ферми (аналог

«температуры» Ферми).

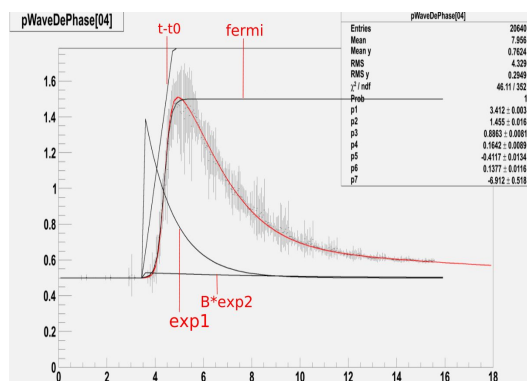


Рис. 11: Функция отклика и её составные части.

Составные части функции изображены на рис. 11.

В табл. 3 приведены полученные в результате подгонки функции по усреднённым формам параметры определяющие форму для первых четырёх каналов.

№ канала	α	B	β	C_1	C_2
0	0.798979	1.068604	0.804591	0.786785	-1.158625
1	0.798852	1.268701	0.80447	0.764675	-1.300229
2	0.793489	1.051903	0.799141	0.799853	-1.108918
3	0.795613	2.362349	0.801249	0.794353	-1.152314

Табл. 3: константы фитирования для первых четырёх каналов.

В дальнейшем параметры, определяющие форму усреднённого сигнала, фиксируются. При пособытийной подгонке сигналов свободными являются два параметра: t_0 - время начала сигнала и A - амплитуда. Пьедестал фиксируется как среднеарифметическое между первыми четырьмя выборками для отслеживания возможных медленных вариаций вызванных сетевыми наводками, нестабильностью питания или иными причинами.

$$Ped = (S_1 + S_2 + S_3 + S_4) / 4;$$

Нелинейность.

Для определения нелинейности измерительного тракта (формирователь-АЦП) были проведены измерения всех 32 каналов. Амплитуда входного сигнала изменялась в диапазоне от 20 мВ до 1 В с шагом в 6 мВ. Амплитуда на выходе получается при подгонке параметров функции по каждому хиту.

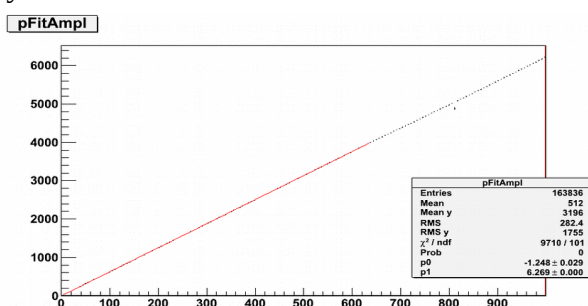


Рис. 12: По горизонтали: амплитуда подаваемого сигнала в мВ. По вертикали: амплитуда полученная в результате фита. Сплошная линия: результат фитирования прямой. Область зашкала: >650 мВ.

Для одного из каналов график зависимости полученной в результате фита амплитуды сигнала от амплитуды входного сигнала приведён на рис. 12. По вертикали отложена амплитуда сигнала в отсчётах ацп, полученная в результате подгонки. По горизонтали- амплитуда сигнала, подаваемого с генератора в милливольтгах. Ошибки- среднеквадратичное отклонение. Каждая точка соответствует одному циклу измерений из 1000 событий. Данные точки отфитированы прямой $Y(V) = a \cdot V + b$ в рабочей области АЦП (0-650мВ). Коэффициент наклона составляет 6.194 ± 0.16 . Смещение мало: -1.376 ± 0.27 . Вся область правее ≈ 650 мВ находится в «зашкале» (превышает 4096 отсчёт АЦП). Тем не менее, амплитуда таких сигналов восстанавливается, хоть и с меньшей точностью. Таким образом, SADC имеет больший динамический диапазон чем 12бит (~ 12.5).

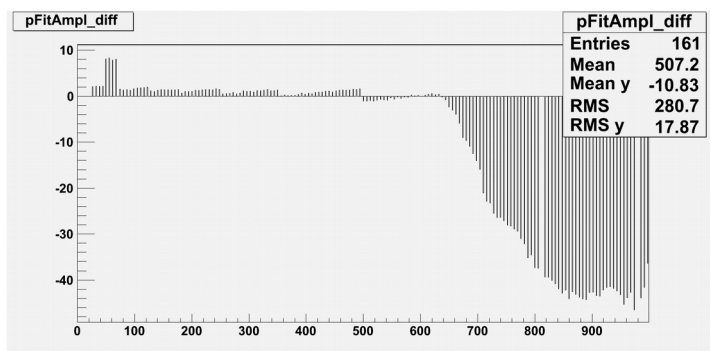


Рис. 13 Нулевой канал: отклонение полученной амплитуды от прямой (Рис. 12) в зависимости от амплитуды подаваемого сигнала в мВ.

Разница между ожидаемым и экспериментальным значениями ($Y(V) - A(V)$) для одного канала приведена на рисунке 13 как функция амплитуды входного сигнала в милливольтгах. Рис. 14 представляет собой профильную гистограмму на которую занесены значения от 9 каналов:

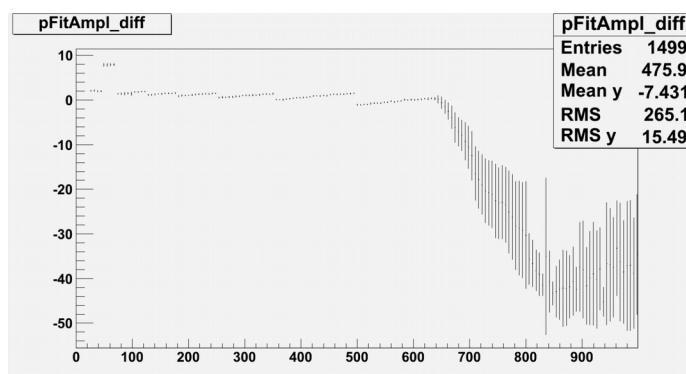


Рис. 14 Профильная гистограмма содержащая отклонение амплитуды от прямой для девяти каналов. Ошибки- дисперсия.

Размер вертикальных ошибок определяется дисперсией. Значительные различия начинаются только в области «зашкала», что может быть вызвано тем, что в одних каналах лучше подобраны параметры функции, а в других- хуже. Видно что в «рабочей» области (< 650 мВ) поведение во всех счётчиках полностью совпадает. Это позволяет предположить, что данное поведение является особенностью используемого генератора.

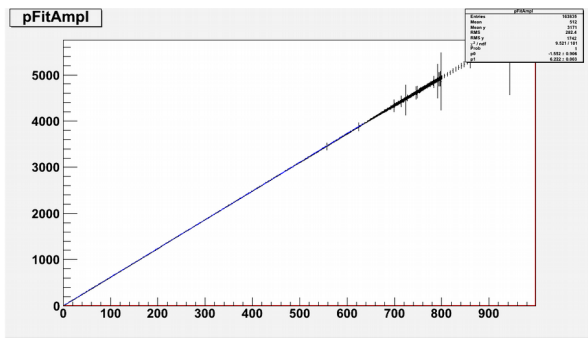


Рис. 15 Зависимость восстановленной амплитуды от амплитуды подаваемого сигнала. С аттенюатором и без него (неразличимы). По горизонтали- амплитуда сигнала на выходе аттенюатора.

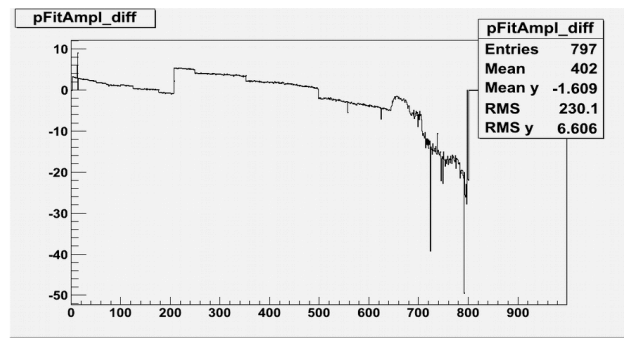


Рис. 16: Измеренное отклонения амплитуды от прямой одного канала с использованием аттенюатора. По горизонтали- амплитуда сигнала на выходе аттенюатора.

Для проверки данного предположения были проведены измерения одного канала с использованием аттенюатора. На рис. 15 показана зависимость восстановленной амплитуды от амплитуды входного сигнала. Занесены амплитуды, как для измерений с аттенюатором, так и без него. Обе прямые полностью совпали. На рис. 16 показано отклонение амплитуды от прямой для измерений с аттенюатором. Коэффициент ослабления составляет 20 Дб. Скачок в 8 отсч., который раньше находился вблизи 60мВ, сместился левее в область 13 мВ. Это свидетельствует о том что в измеренную нелинейность вносит существенный вклад генератор. При этом сильно возросло отклонение от прямой.

Для оценки интегральной нелинейности[4] используются следующие величины:

- I_{LSB} (least significant bit) — в данном случае это максимальное отклонение данных от прямой Δ_{max} , полученной в результате фита.
- I_{FSR} (full scale range) — $\Delta_{max}/4096$.

В итоге I_{LSB} лежит в промежутке между $7.24 \div 8.33$, а I_{FSR} : $0.17\% \div 0.20\%$.

Без учёта пика в районе 65 мВ нелинейность должна упасть до 2.5 (I_{LSB}) и 0.061% (I_{FSR}) Таблицу с результатами измерений можно найти в (Прил. 2).

Для измерения дифференциальной нелинейности недостаточно минимального шага который способен обеспечить генератор ($1 \text{ мВ} \approx 6 \text{ отсч.}$), а также, предполагается провести дополнительные измерения с использованием высокостабильного аттенюатора.

2.4 Измерения перекрёстных помех.

Crosstalk (перекрёстные помехи) - это явления в которых сигнал, переданный по одной линии канала связи, создаёт нежелательный эффект в другой линии. Перекрёстные помехи обычно вызываются паразитными ёмкостными, индуктивными или проводящими связями одной электрической цепи (части цепи, канала связи) с другой.

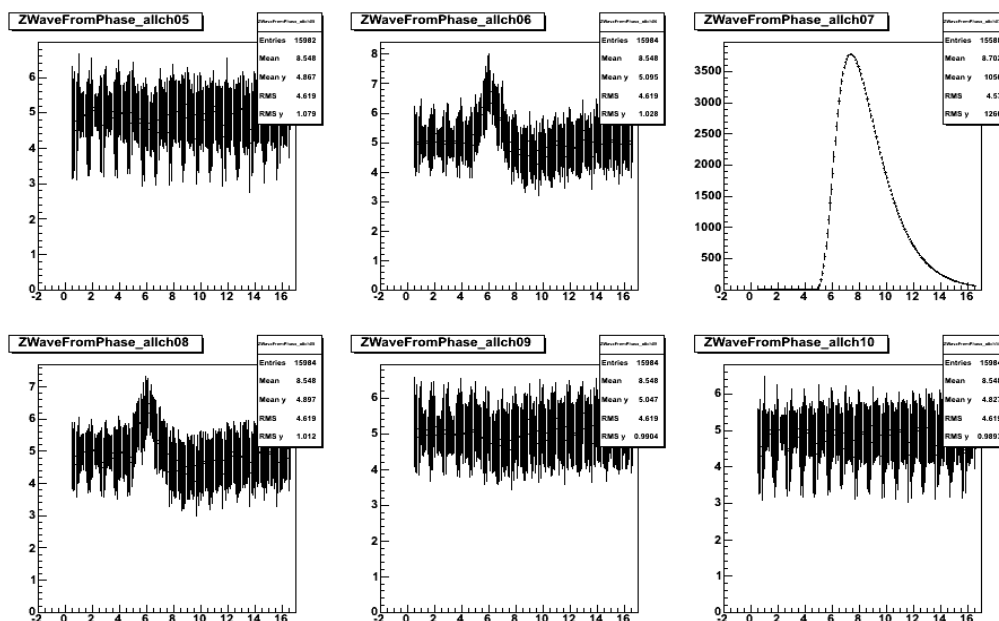


Рис. 17: Формы сигналов 5,6,7,8,9,10 каналов.

Для оценки crosstalk были построены восстановленные методом смещения на фазу усреднённые формы сигналов для всех 32 каналов при подаче сигнала фиксированной амплитуды 598 мВ (≈ 3700 отсч.) поочерёдно в каждый из них. На рис. 17 приведены формы для каналов 5-10 при подаче основного сигнала в 7 канал. Хорошо виден отклик в 6 и 8 каналах. Также, заметен слабый отклик в 5 и 9 каналах.

Поскольку, сигнал помех имеет другой характер (другую форму) по сравнению с «истинным» сигналом, то применить к нему процедуру подгонки без подбора формы, представляется невозможным. В качестве меры crosstalk взят максимум усреднённой формы (максимальное значение по всем выборкам) с вычитанием пьедестала и отложен на двумерной гистограмме в зависимости от номера канала в который подаётся основной сигнал. Величины меньше 1 отсчёта и больше 3700 для удобства отображения приравнены к 0.

Результат можно увидеть на двумерном графике (Рис. 18). По горизонтали- номер канала в который подаётся сигнал. По вертикали- номер наблюдаемого канала. Цветовая шкала в отсчётах АЦП. 15 канал неисправен. В 31 канале есть отклик практически на все каналы что может быть вызвано проблемами в монтаже (например, в RC- фильтре). Хорошо видно что во всех каналах вблизи главной диагонали есть значимый отклик $\langle A \rangle \approx 2$ отсч. Таким образом crosstalk составляет $\sim 0,068\%$ ($2,5/3700$).

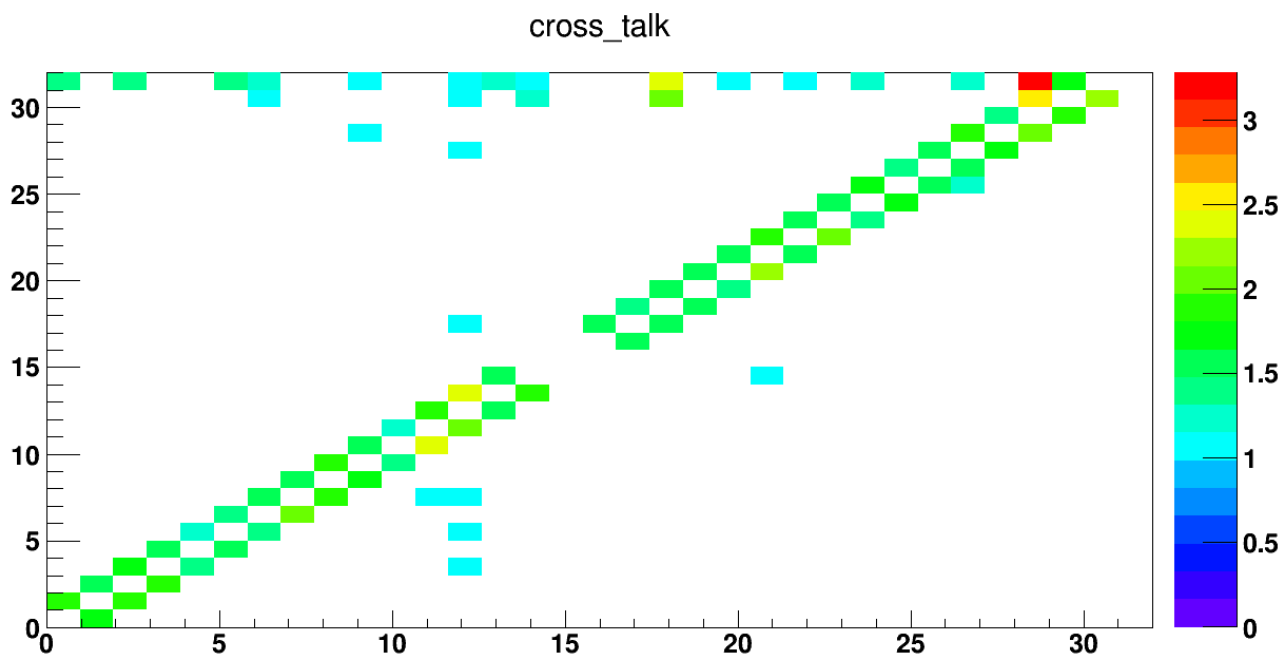


Рис. 18: Зависимость наведённого сигнала от номера канала в который заведён основной сигнал. Номер канала в который подаётся сигнал по горизонтали. По вертикали- номер наблюдаемого канала.

2.5 Дрейф пьедестала.

При фиксированном пьедестале определяется динамически (пособытийно), тем не менее, полезно проверить его стабильность.

Была произведена оценка величины пьедестала (как среднего между всеми выборками при отсутствии импульса) в зависимости от питающего плату напряжения. При этом для каждого канала сравнивались средние значения по всем шестнадцати выборкам в зависимости от напряжения питания. В итоге получено что при увеличении питания на 1В во всех каналах наблюдается уменьшение пьедестала в среднем на 2,9 отсчёта ± 0.076 . При этом заметного изменения среднеквадратичного отклонения (дисперсии) пьедестала не наблюдается (~ 0.866).

Таблица с результатами измерений приведена в приложении (Прил. 1).

2.6 Измерения на сигналах от детекторов частиц.

Измерение формы сигналов от пучковых черенковских счётчиков.

Как сказано выше (см. гл. 2.3), сформированные сигналы с детекторов ожидаются похожими на сигналы с генератора, тем не менее, отличия достаточно существенны чтобы сказаться на результатах обработки. Для каждого канала были проведены измерения на пучке и получены параметры для каждой пары канал-детектор (каждый детектор всегда находится в одном и том же канале). Для нахождения параметров функции фита были произведены осциллографические измерения формы сигналов на выходе платы усилителя-формирователя. На вход были заведены сигналы с трёх пучковых черенковских счётчиков. Визуально отобраны сигналы с одним импульсом. Затем они нормированы на одну и ту же величину. Результат приведён на (Рис. 19). Сплошной линией показаны результаты фита этой гистограммы.

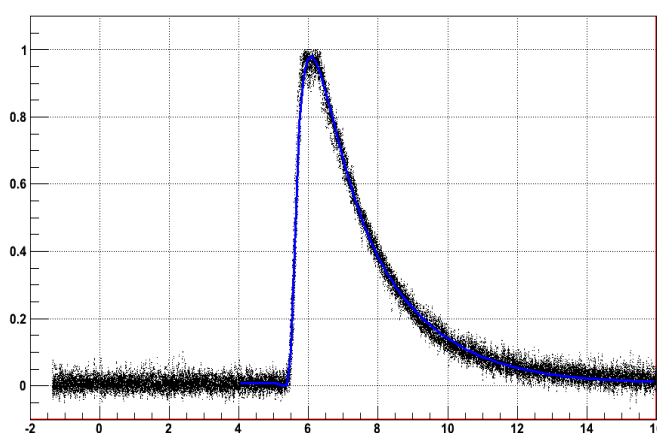


Рис. 19: 5 наложенных друг на друга сигналов на входе осциллографа. Сплошной линией показан результат фитирования.

Параметры полученные в результате фита приведены в (Табл. 4).

Эти параметры занесены в базу geodb (см. раздел 3.3) и использованы при реконструкции.

	t_0	α	B	β	C_1	C_2
Vch1	5.016	0.952986	0.173267	0.616804	-12.258512	0.087275
Vch2	5.682	0.906944	0.163031	0.549902	-2.599801	0.252012
Vch3	4.859	0.927112	0.183675	0.596405	-12.329607	0.097228

Табл. 4: Параметры полученные в результате фита.

Вето-счётчики

Для детекторов охранной системы осциллографических измерений не производилось. Была сделана попытка подобрать параметры используя только «восстановленные» путём поправки на фазу формы. Сложность представляет тот факт, что в отличии от стендовых измерений, амплитуда случайно меняется от хита к хиту. Для получения правильной усреднённой формы каждый из них нужно нормировать на свою величину. Для этого хит нужно отфитировать, при этом полученная амплитуда зависит от исходных параметров функции. Ниже описан первый опыт решения данной задачи. (итерационно)

Данная задача представляет интерес, поскольку при планируемом расширении области применения конвейерных АЦП на установке ВЕС, число используемых каналов составит

более полутора тысяч. Очевидно, что при таких масштабах проведение осциллографических измерений становится невозможно. Требуется разработка алгоритма автоматического подбора параметров сигналов для каждого канала.

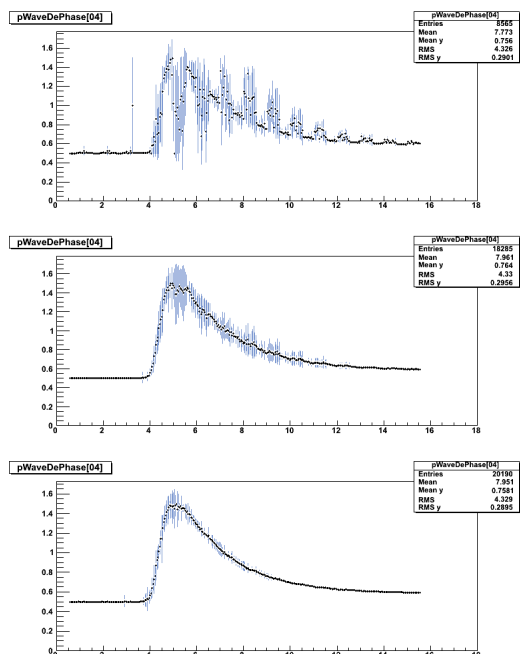


Рис. 20: Профильная гистограмма. Изменение восстановленной формы 4 канала по мере увеличения числа итераций.

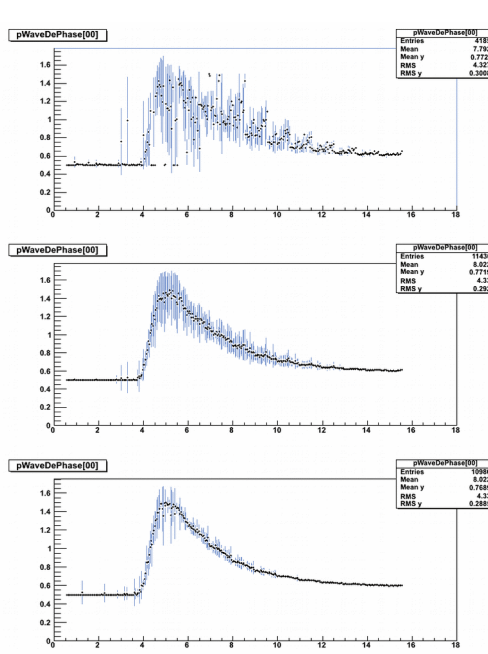


Рис. 21: Профильная гистограмма. Изменение восстановленной формы 0 канала по мере увеличения числа итераций.

Были взяты события в, так называемом, триггере «Main without guard» (вето-счётчики не входят в антисовпадения). Требовалось наличие только одного импульса с амплитудой превосходящей 300 отсчётов АЦП (для уменьшения влияния шумов на результаты). Хиты фитировались с «затравочными» параметрами взятыми из измерений пучковых черенковских счётчиков. Каждый хит нормировался на полученную в результате фита амплитуду. Затем производилась процедура восстановления усреднённой формы сигнала методом смещения на фазу. По этой форме производилось уточнение параметров, определяющих форму функции. Процедура фита повторялась. Пример изменения усреднённой формы по мере увеличения числа итераций для двух разных каналов можно увидеть выше на профильных гистограммах (Рис. 20) и (Рис. 21). Косвенным критерием успешности описания являются: величина ошибок на усреднённой форме, её «гладкое» поведение.

Полученные параметры (прил. 3) занесены в базу geodb и использованы при реконструкции. Работа над вышеописанной процедурой не закончена. На данный момент она требует наличия изначально «хорошего» описания, а также периодического вмешательства в работу.

Ch28

В ближайшем сеансе планируется перевести 28^и-канальный газовый черенковский счётчик на новые АЦП. В н сигналы на выходе гораздо более протяжённой во времени формы по сравнению со всеми другими рассмотренными детекторами. Поэтому требовалось провести осциллографические измерения. В специальном тестовом сеансе, прошедшем весной 2017 года, эти измерения были проведены на пучке. Кроме осциллограмм, записаны и данные с SADC. Обработка предстоит в ближайшее время.

3 Разработка и применение ПО

В связи с появлением нового типа электроники возникает ряд задач требующих решения:

1. Обработка данных, доработка реконструктора.
2. Хранение реконструированных данных, калибровочных констант. Необходимо расширение базы данных.
3. Предоставление пользователю инструментов для использования результатов в физическом анализе.
4. Вычислительное моделирование.

Подробное описание каждого из пунктов приведено ниже.

3.1 Основной алгоритм.

Ниже описан алгоритм используемый для обработки хитов с конвейерных АЦП. На вход подаются хиты (16 выборок), фаза триггера, параметры функции. На выходе получается массив времён и амплитуд импульсов, а так же, номер «главного» импульса. Блок-схема приведена ниже на (Рис. 22).

Описание алгоритма:

1) Пьедестал задаётся как среднееарифметическое между первыми четырьмя выборками. Если среднеквадратичное отклонение пьедестала больше некоторой величины, то присваивается значение по умолчанию (среднее значение пьедестала по всему сеансу).

2) Ищутся локальные максимумы и каждому из них приписываем свой импульс. Для обнаружения размытых импульсов на фоне импульсов с большей амплитудой проверяется наличие немонотонностей при нарастании/спаде сигнала.

Искусственно добавляется еще один импульс если выполняются следующие условия:

- а) присутствует импульс пришедший до ожидаемого времени основного импульса (с учётом поправки на фазу).
- б) не найдено ни одного импульса в диапазоне нескольких выборок от ожидаемого времени прихода основного импульса .

Если разница между первой и второй выборками больше определённой величины, то предполагается наличие «хвоста» от сигнала пришедшего до начала окна считывания.

Для отсекающего влияния шума накладывается ограничение на минимальное отклонение от пьедестала. При невыполнении данного условия новый импульс не добавляется.

3) Задаются стартовые параметры фита. Начиная с первого, импульсам поочерёдно присваиваются амплитуды. Для этого из значения выборки в которой найден импульс вычитается пьедестал и фон от всех предшествующих импульсов.

Время прихода максимума задаётся как положение максимума с вычетом времени нарастания сигнала.

$$A_i = S_i - Ped - \sum_{j=1}^{j=i-1} F_j(x_i) \quad \text{— амплитуда } i^{\text{го}} \text{ импульса.}$$

S_i — значение выборки в которой найден максимум $i^{\text{го}}$ импульса.

$t_i = x_i - const$ - время начала сигнала.

x_i - номер выборки в которой находится $i^{\text{ый}}$ максимум.

$F_j(x_i)$ - значение j -того импульса в точке x_i .

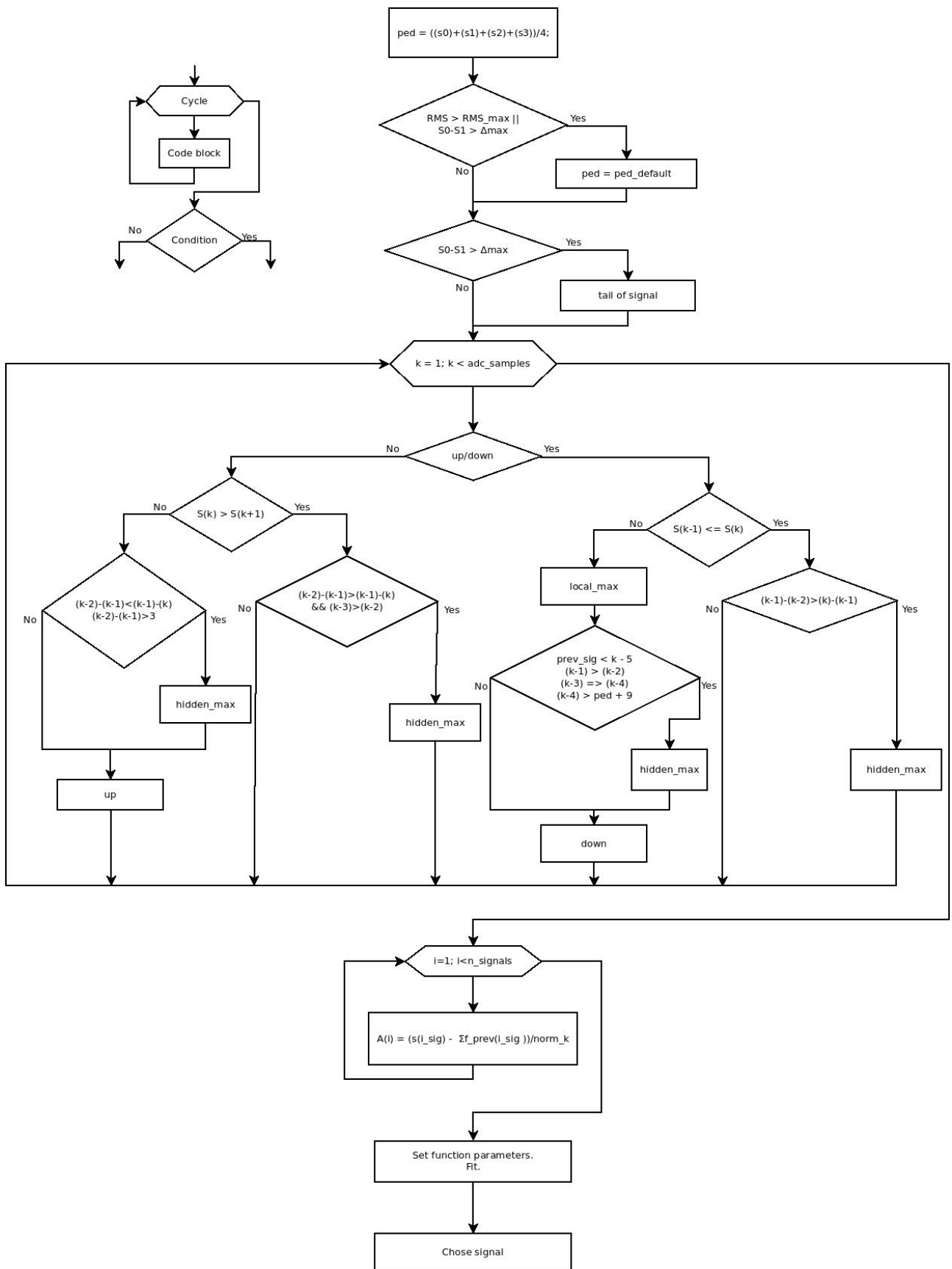


Рис. 22: Блок-схема алгоритма обработки хитов.

4) Производится подгонка по хитам со следующими свободными параметрами: время и амплитуда для каждого импульса. Число параметров изменяется от 2 до 10 в зависимости от количества найденных максимумов. Фитирование производится при помощи одной из модификаций алгоритма оптимизации **uobyqa**, который был предложен M.J.D Powell (2000). [5]

Модифицированная версия программы **uobyqa**, названная **uobyqc**[6]. Автор модификации-И.А.Качаев. Причины написания **uobyqc**: программа **uobyqa** имеет уникальные возможности, но медленная и с крайне неудобным интерфейсом.

Достоинства **uobyqa/uobyqc**: очень стабильный алгоритм оптимизации, который может работать с функциями, имеющими шум, негладкости, разрывы производных. Функция может быть результатом Монте-Карло моделирования, другого фита, интерполяции. Программа не вычисляет значения функции вдали от текущего минимума; диапазон значений функции до 10^{150} .

У пользователя есть контроль над запрошенной точностью одновременно в пространстве параметров и значений функции. При адекватных требованиях пользователя настройках **uobyqc** может быть существенно быстрее **Migrad** (один из алгоритмов используемых **Minuit**) даже на гладких функциях, при общих настройках - сравнима с ним. Программа выдает, как правило, качественную матрицу ковариации и соответственно разумные оценки параметров.

Недостатки: требования к памяти и время CPU для **uobyqa/uobyqc** растут с ростом числа параметров как $O(N^4)$. Требуемая память несколько больше $2 \cdot N^4$ байт для N параметров, т.е. примерно 2 Мб для 30 параметров и 200 Мб для 100 параметров. Требования **Migrad** $O(N^2)$ по памяти и $O(N^3)$ по времени исполнения, т.е. гораздо скромнее. Соответственно число параметров **uobyqc** практически не более 50-100. Ограничение и фиксация параметров в **uobyqc** не реализованы и лежат на пользователе (в **uobyqa** нет и величины шага).

5) Ищется импульс с максимальной амплитудой начало которого лежит в указанных воротах от ожидаемого времени прихода импульса.

6) Заполнение таблицы результатами работы.

Ниже на (Рис. 23) приведён пример результатов обработки двух хитов с пучковых черенковских счётчиков.

Пока что, существенным недостатком актуальной реализации является малая скорость работы. При обработке пучковых черенковских счётчиков на одно событие уходит, в среднем, 20 миллисекунд (процессор AMD Phenom(tm) II X6 1055T). При добавлении в реконструктор 10 охранных счётчиков, время работы увеличивается ещё на ~20 миллисекунд. При этом, практически всё время занимает работа минимизатора (>96% времени).

На вычислительном кластере скорость полной реконструкция одного файла (≈ 300000 событий) составляет 7.9 часов. Из них около 2.6 часа занимает обработка данных с конвейерных АЦП (3 пучковых черенковских счётчика + 10 вето-счётчиков).

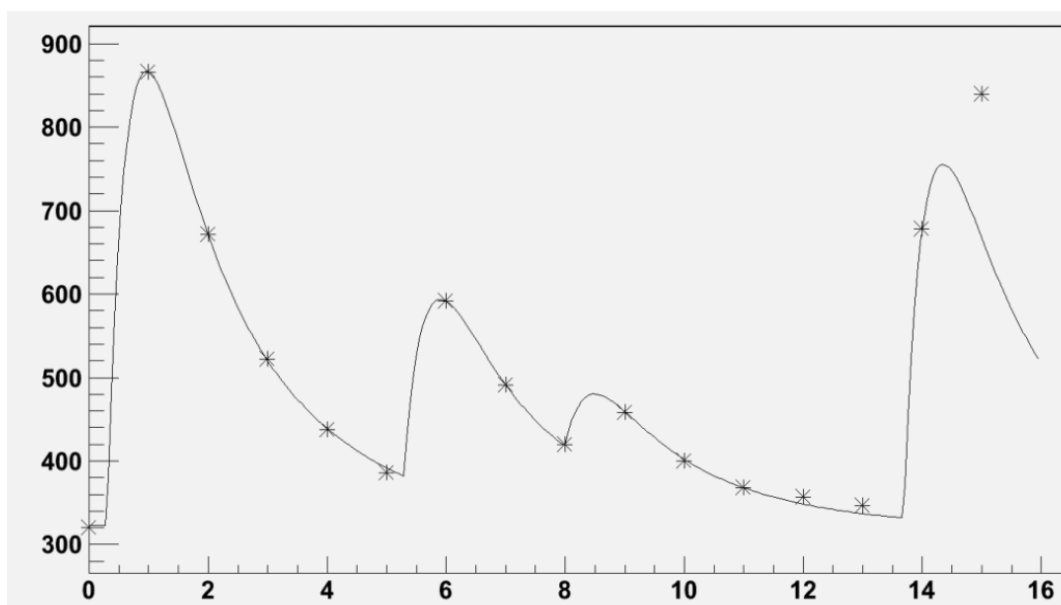
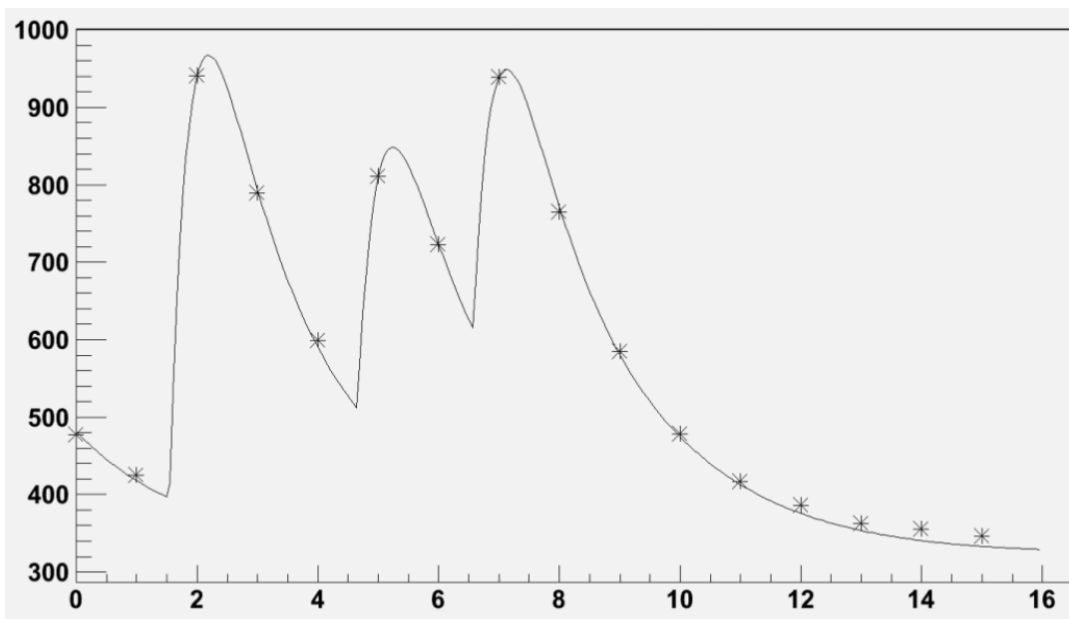


Рис. 23: Два примера результатов обработки хитов. Звёздочками показаны данные с VCh1. Сплошная линия- результат работы алгоритма.

3.2 Численное моделирование.

Цели:

- проверка/изучение характеристик и ограничений, отладка и совершенствование алгоритма.
- рецепты/рекомендации по совершенствованию аппаратуры (оптимизация формовки; потенциальное увеличение частоты)

Для проверки работы алгоритма были сгенерированы наборы хитов с одним «нужным» импульсом (синхронно с триггером) и от нуля до четырёх фоновых импульсов в случайном промежутке -6 до 16 отсчётов; амплитуды генерировались распределёнными по Гауссу. Формы импульсов были взяты из измерений пучковых черенковских счётчиков (раздел 2.6). Из суммы данных импульсов генерировалась выборка из 16 отсчётов (с учётом случайной фазы), которая уже фитировалась суммой из нескольких функций в зависимости от найденных локальных максимумов согласно алгоритму приведённому в разделе (3.1) (стр.20). Предполагалось что параметры точно известны.

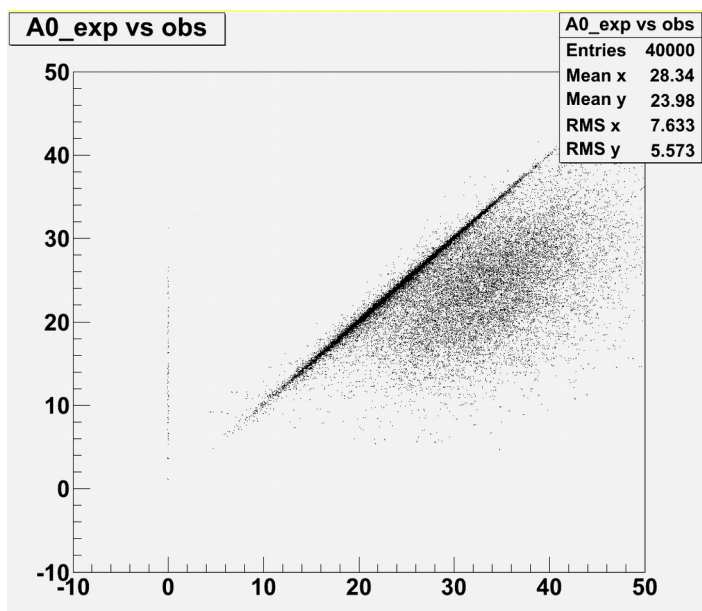


Рис. 25: Сгенерированная амплитуда против восстановленной при трёх фоновых импульсах.



Рис. 24: Пример «слипшихся сигналов»

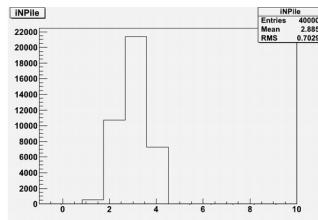


Рис. 26: Распределение по числу восстановленных импульсов при четырёх смоделированных.

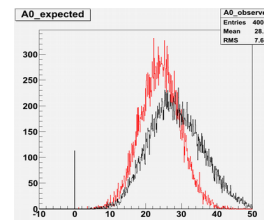


Рис. 27: Распределение по амплитуде сгенерированных и восстановленных импульсов при трёх фоновых импульсах.

В качестве «истинного» искался импульс с максимальной амплитудой начало которого находится в заданном диапазоне (в данном случае ± 2 отсчёта) от смоделированного. Если такого сигнала не найдено то возвращается нулевое значение («несрабатывание»).

С ростом числа сигналов качество работы алгоритма ухудшается. Из (Рис. 25) видно, что алгоритм начинает завышать амплитуды, что объясняется тем, что два и более близлежащих импульса становятся неразличимы (Рис. 24 б.), что приводит к тому что количество найденных импульсов ниже числа сгенерированных. Распределение по числу обнаруженных импульсов при четырёх исходных приведено на (Рис. 26). По той же причине, а также потому что малый импульс теряется на фоне больших, возрастает и доля несрабатываний. При одном импульсе их нет, а при пяти их доля составляет уже 0.42% (см. Табл. 5).

N_{sig}	Несраб, %
1	0
2	0.072
3	0.087
4	0.3
5	0.415

Табл. 5 зависимость числа несрабатываний от числа смоделированных сигналов.

Начинает искажаться, также, исходно равномерное распределение импульсов по времени, (Рис. 29). На (Рис. 28) показана корреляция между смоделированным временем и восстановленным.

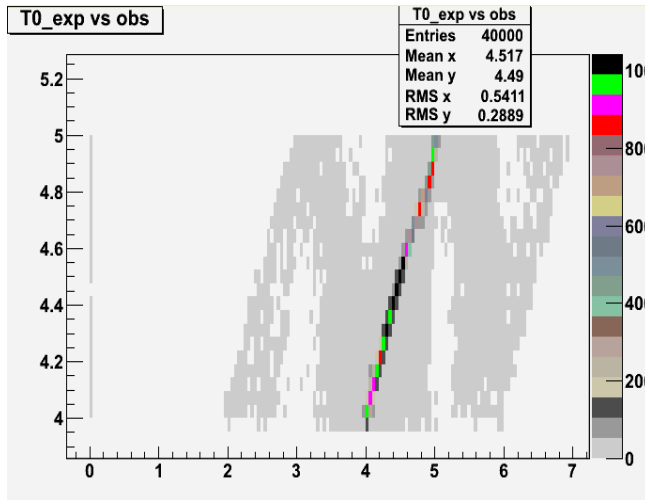


Рис. 28: Корреляция между смоделированным временем начала основного сигнала и восстановленным.

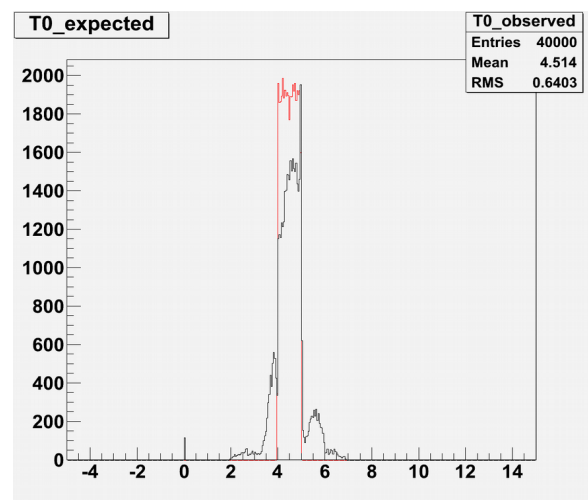


Рис. 29: Распределение по времени начала сигнала. Красным(светлее): ожидаемое. Чёрным(темнее): наблюдаемое.

3.3 Процессор

В разделе описана программная реализация алгоритма. Он во многом повторяет соответствующий раздел описания «OFF: фреймворк для обработки данных в эксперименте ВЕС» [7]. Раздел может быть пропущен читателем без ущерба для понимания остальной части диплома.

Для первичной обработки (реконструкции) данных в эксперименте ВЕС используется «фреймворк» off. «Фреймворк» состоит из библиотечного кода и набора процессоров, программы для запуска процессоров и различных утилит. Процессором называется некоторый вычислительный алгоритм с некоторым числом входов и одним выходом, поведение которого зависит только от входных данных и предыстории, но не зависит от состояния других процессоров.

При создании фреймворка были взяты за основу следующие принципы:

1. каждой задаче соответствует процессор.
2. Процессоры сохраняют результат своей работы в структурах в смысле языка С, причём результатом работы отдельного процессора является единственная структура заранее (на этапе компиляции) предопределённого типа.
3. Процессор может иметь некоторое количество входных структур, типы и количество которых (за исключением процессоров с переменным числом входов) задаются на этапе компиляции. Информация во входных структурах может использоваться процессором для вычисления результата.
4. Каждый процессор имеет контекст (некоторый собственный набор данных). В дальнейшем будем называть совокупность процессора и какого-либо контекстного объекта *процессорным объектом*. Контекст позволяет иметь неограниченное число различных процессорных объектов, использующих одни и тот же программный код (процессор).
5. Процессор ничего не знает о том как к нему попадают входные структуры, как и где будет использован результат его работы. Эти задачи решает среда исполнения процессоров. Среда исполнения процессоров предоставляет некоторые сервис, такие как создание гистограмм, печать диагностических сообщений, распределение памяти.
6. Чтобы получить максимальную гибкость и избавить программный код от синтаксического мусора, применяется технология препроцессинга: исходный код процессора перед компиляцией компилятором С или С++ обрабатывается специализированным препроцессором, который берёт на себя решение некоторых рутинных задач: регистрация процессора в таблице процессоров, генерация кода автоматической инициализации некоторых полей структуры контекста.

7. Фреймворк предполагает пособытийную обработку: на каждое событие (имеется в виду физическое событие зарегистрированное на экспериментальной установке) запускается некоторое множество процессорных объектов. Возможности повторно обработать одно и то же событие нет. Это довольно жёсткое требование, в которое плохо вписываются некоторые задачи связанные с калибровкой различных детекторов экспериментальной установки.
8. Набор запускаемых процессорных объектов и их спецификация потока информации между ними (соединение входов с выходами) задаётся в конфигурационном файле. Существует универсальная программа (off), которая при запуске зачитывает указанный в командной строке конфигурационный файл и запускает процессорные объекты в бесконечном цикле, пока какой-нибудь из них не возвратит код завершения цикла обработки. Конфигурационный файл содержит только информацию о соединении входов процессорных объектов с выходами, порядок запуска процессорных объектов вычисляется автоматически программой off.
9. Принята политика выделения памяти на основе «пула», который целиком освобождается перед переходом у обработке нового события.

Общая схема части реконструктора, отвечающая за обработку SADC приведена ниже (Рис. 30):

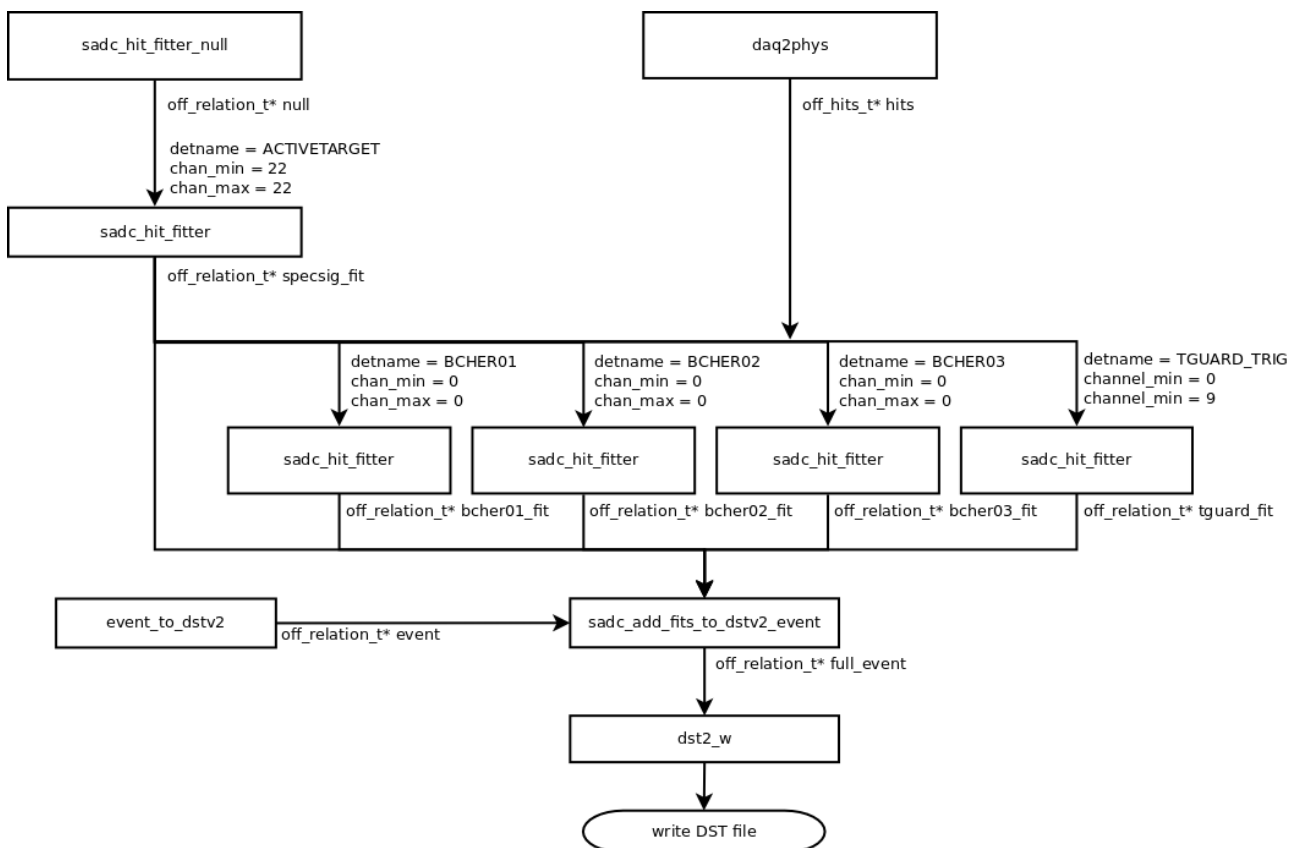


Рис. 30: Блок-схема Отвечающая за обработку SADC часть реконструктора.

Добавленные в реконструктор в ходе рассматриваемой работы процессоры для задач SADC:

sadc_hit_fitter:

Параметры определяемые в конфигурационном файле:

- **detname:** имя детектора (BCHER01, TGUARD_TRIG).
- **subdet:** номер субдетектора.
- **chanel_min:** диапазон каналов для обработки.
- **chanel_max**

На вход процессора подаётся таблица (описание на стр. 29) с результатами обработки спецсигнала (см. раздел 2.3) для привязки тактового генератора АЦП к триггеру, а также, таблица из процессора daq2phys содержащая данные с детекторов.

На выходе получается таблица вида {hit(off_dst_hit_t), extval_fit(off_dst_hit_extval_fit), function(off_dst_function_t)} содержащая фиты хитов. Кроме того, её (таблицу) можно подать на вход другого процессора sadc_hit_fitter в качестве фита спецсигнала.

Алгоритм:

Процессор обрабатывает хиты от конвеерных АЦП для заданного во входных параметрах детектора. Если на вход подаётся спецсигнал, то он используется для уточнения работы.

Функция и параметры фитирования берутся из калибровочной константы SADC_WFM из базы данных «geodb», которая содержит параметры установки.

Формат записи констант в базе данных:

(defcalib SADC_WFM номер_субдетектора #(номер канала, id функции, число параметров, параметры[0-N])

Пример записи для счётчика вето-системы:

```
(defcalib SADC_WFM0 #(0.0 1.0 7.0 304.288818 3.642857 0.864571 0.163603 -0.394478 0.12243 -8.121382
1.0 1.0 7.0 300.644401 3.690476 0.907124 0.176237 -0.434949 0.159261 -4.26651
2.0 1.0 7.0 270.659347 3.5 0.886333 0.164191 -0.41168 0.137697 -6.912353
3.0 1.0 7.0 274.283456 3.928571 0.867727 0.146418 -0.364891 0.292315 -2.332869
4.0 1.0 7.0 280.517130 3.589927 0.965471 0.196850 -0.553560 0.292272 -1.404384
5.0 1.0 7.0 290.447374 3.006820 0.844729 -0.131112 0.356470 0.200585 -5.363386
6.0 1.0 7.0 291.367954 3.025139 0.928892 -0.169469 0.417478 0.162180 -3.614343
7.0 1.0 7.0 301.111270 3.461725 0.954961 0.203945 -0.465401 0.232902 -2.469517
8.0 1.0 7.0 287.0 4.692 0.950220 0.171009 0.439310 0.23012 -2.8294
9.0 1.0 7.0 290.038751 3.502819 0.942509 0.149331 -0.414367 0.238136 -2.222368 ))
```

sadc_hit_fitter_null:

Возвращает пустую таблицу, необходимую для передачи на вход sadc_hit_fitter при отсутствии спецсигнала, так как формат входных данных жёстко закреплён.

sadc_add_fits_to_dstv2_event:

Модифицирует входную таблицу, записывая в неё таблицы полученные от процессора sadc_hit_fitter.

На вход подаётся событие off_relation_t пригодное для записи в файл DST (без таблицы hit_fit), а также произвольное число таблиц sadc_hit_fitter.

На выход передаётся событие off_relation_t с таблицей hit_fit пригодное для записи в DST файл.

3.4 Формат хранения данных DST.

На установке «ВЕС» в качестве основы для модели данных DST (Data Summary Tape) [8] взята реляционная модель. Связи между различными объектами (треки, γ -кванты, хиты, кластера) выражены при помощи отношений, которые в дальнейшем будут также называться таблицами. Данный подход обладает следующими достоинствами: Связи являются внешними по отношению к объектам, в результате чего отсутствует необходимость постоянной модификации структур, описывающих объекты, с целью включения в них различных ссылок на другие объекты. Различные таблицы можно комбинировать, применяя операции реляционной алгебры. Таким образом пользователь довольно легко может генерировать связи, которых изначально не было.

При этом программное обеспечение ни в коей мере не претендует на полное соответствие реляционной модели, описанной например в [9], а лишь представляет узкоспециализированное средство для хранения и обработки данных, полученных в результате реконструкции событий с установки ВЕС.

Для нового типа электроники («SADC») и алгоритма её обработки было необходимо расширение DST. При этом требовалось выполнить следующие условия:

- оптимальная полнота сохраняемой информации
- удобство использования
- сохранить совместимость со старыми версиями
- гибкость (обеспечить возможность дальнейшей доработки, число выборок, изменение вида функции, структуры детекторов...)

При этом неизбежно увеличивается объём сохраняемой информации. Если раньше на один канал приходилось лишь 32 бита, то теперь- 680 бит.

Описание используемых структур:

```
{
  uint32_t  address;
  uint32_t  value;
} __attribute__((packed)) off_dst_hit_t;
```

Описание полей:

address: адрес хита.

value: значение хита.

Структура содержит адрес хита и его значение. Сейчас для сохранения совместимости со старым ПО производится эмуляция интегрирующих АЦП и в качестве значения (*value*) записывается амплитуда отобранного сигнала с соответствующей нормировкой.

```
{
  float    ped;
  float    chisq;
  uint8_t  ndf;
  int8_t   n_sig;
  int8_t   sig_chosen;
```

```

float    sample_interval_ns;
float    time_shift;
float    amplitude_time[8][2];
} __attribute__((packed)) off_dst_hit_extval_fit_t;

```

Структура применяется для хранения результата фита сигнала с конвейерных АЦП (SADC). Фит производится суммой пьедестала и нескольких (не более 8) одинаковых по форме сигналов с разным временем прихода и амплитудой. В будущем возможно увеличение числа сигналов без потери совместимости. То есть если $F(t)$ суммарный сигнал, то он задаётся формулой (t измеряется в долях интервала между выборками АЦП):

$$F(t) = \text{ped} + \sum_{i=0}^{n_sig} \text{amplitude_time}[i][0] * f(t - \text{amplitude_time}[i][1])$$

Форма одиночного сигнала хранится в отдельной структуре `off_dst_function_t` описание которой приведено ниже.

Поля структуры имеют следующее назначение:

- **ped**: пьедестал.
- **chisq**: χ^2 фита.
- **ndf**: число степеней свободы.
- **n_sig**: число одиночных сигналов в фите (в массиве `amplitude_time`)
- **sig_chosen**: индекс основного сигнала в массиве `amplitude_time`, если равен -1, то основной сигнал отсутствует. Основной сигнал- это сигнал синхронный с триггером, именно он, как правило, интересен при анализе данных.
- **sample_interval_ns**: интервал между выборками АЦП в наносекундах.
- **time_shift**: время (в долях интервала между выборками АЦП), которое нужно добавить к `amplitude_time[i][1]`, чтобы получившиеся времена не зависели от фазы триггерного сигнала относительно тактового сигнала АЦП при условии, что сами сигналы синхронные с триггером (т.е. **time_shift** - это так называемая «фаза триггера»).
- **amplitude_time**: двумерный массив содержащий амплитуду и время каждого одиночного сигнала в фите.

```

typedef struct
{
    uint32_t    id;
    float       par[32];
} __attribute__((packed)) off_dst_function_t;

```

Применяется для описания одиночного импульса, при фите сигналов с конвейерных АЦП (SADC), время измеряется в долях интервала между выборками АЦП.

Описание полей:

- **id**: идентификатор сигнала.
- **par**: параметры сигнала.

3.5 Функция идентификации пучковых частиц.

Для физического анализа обычно используется набор пользовательских функций, что позволяет каждому пользователю минимизировать работу со структурой DST, а также, не разбираться с деталями алгоритма реконструктора и особенностями разных периодов/сеансов работы.

Одной из таких функций является функция идентификации пучковых частиц на основе VCh1-3.

Переход на новый тип АЦП привёл к необходимости доработки функции, уже существовавшей до этого. По возможности, требовалось сохранить пользовательский интерфейс.

Вызов функции идентификации пучка возможен как с передачей всего события, так и только трёх амплитуд пороговых счётчиков VCh1-3 и номера сеанса. Счётчик считается сработавшим при превышении определённого порога. 3 порога определяются независимо друг от друга, т.е. области срабатывания в пространстве 3-х амплитуд — параллелепипеды. 3 значения давления газа, определяющие (при фиксированном импульсе пучка около 29 ГэВ) излучающие сорта частиц, зависят от задач пучковой идентификации в данном сеансе. Усиление ФЭУ так же определяет амплитуду сигнала и зависит от сеанса.

При непротиворечивости их показаний назначается соответствующий тип частицы с качеством (силой) Standard. Счетчик может определяться как вышедший из строя либо пособытийно в случае недопустимой амплитуды АЦП, либо пофайлово- по зафиксированным неисправностям. В этом случае его показания игнорируются и используются оставшиеся два счётчика. При их непротиворечивости назначается тип частицы с качеством Loose. В случае противоречивых показаний любого из 2-х или 3-х работающих счетчиков, а также при менее чем 2-х работающих счетчиках частица не идентифицируется (тип UNKNOWN). Выводом функции является кодовое битовое число содержащее в себе два параметра: код частицы и сила идентификации.

Возможные варианты:

Частицы:

- a) **BEAM_IDENT_UNKNOWN**
- b) **BEAM_IDENT_PI**
- c) **BEAM_IDENT_K**
- d) **BEAM_IDENT_E**
- e) **BEAM_IDENT_ANTI_P**

Силы идентификации:

- a) **BEAM_IDENT_STANDARD**
- b) **BEAM_IDENT_LOOSE**
- c) **BEAM_IDENT_VERY_LOOSE**

Пример вызова:

```
int beam_id = funBeam_ident_ev(ev);           //получаем id частицы
if(BEAM_IDENT(beam_id, PI, STANDARD))
    printf("Particle = PI. Strength = STANDARD.\n");
```

3.6 Применение в пучковых экспозициях (сеансах) и их обработке.

Описанные в разделе 3 алгоритм, процессоры и новая версия DST были использованы при реконструкции 47, 48, 50 сеансов. В данном разделе рассматривается опыт применения конвейерных АЦП на примере run50. В этом сеансе в SADC были заведены три пучковых черенковских счётчика и 10 триггерных вето-счётчиков. Стоит отметить, что в этом сеансе были устранены ошибки связанные с перескоком фазы и порчей 1% событий. Импульс пучка находился вблизи 29 ГэВ. Для сравнения с интегрирующими АЦП взят run44.

Сеанс проходил в два этапа:

1. Бериллиевая мишень. Все три черенковских счётчика заполнены воздухом. Первые два откачаны до давления $P_{1,2} = 0.35$ атм (пионы светят, каоны и антипротоны- нет), а третий до $P_3 = 0.85$ (светят и пионы и каоны, антипротоны- нет). Т.е. при одновременном срабатывании всех трёх счётчиков частица идентифицируется как π -мезон, при срабатывании только третьего счётчика- как К-мезон. При несрабатывании всех трёх- как антипротон. Все остальные комбинации считаются ошибками и записываются в «Unkown».
2. Свинцовая мишень (для изучения реакций Примакова). В этой части сеанса первый и второй черенковский счётчики были накачаны гелием до давления $P_{1,2} = 0.31$ атм. (под порог пионов), при этом светят электроны и мюоны. Третий счётчик заполнен воздухом с давлением $P_3 = 0.35$ атм. (под порог каонов $P = 0.57$ атм), светят пионы, электроны, мюоны. Срабатывание всех трёх счётчиков означает пролёт электрона. При срабатывании только последнего- пиона. При несрабатывании всех трёх- К-мезона или антипротона.

Полученные амплитудные спектры для всех трёх счётчиков для «бериллиевой части» Run-50 приведены на (Рис. 31). Пороги срабатывания выставляются в точке минимума между пьедесталом и основным спектром.

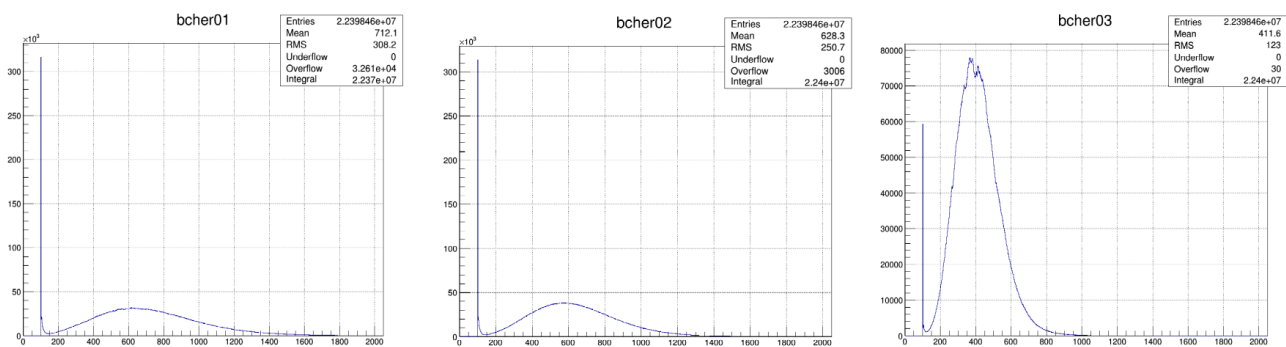


Рис. 31: Амплитудные спектры пучковых черенковских счётчиков.

На (Рис. 32) показаны двумерные распределения найденной амплитуды в одном счётчике относительно другого. На первом распределении большая область по центру- частицы соответствующие пионам, узкая область в левом нижнем углу- К-мезонам или антипротонам. Вдоль вертикальной оси- область неэффективности второго черенковского счётчика, а вдоль горизонтальной- первого.

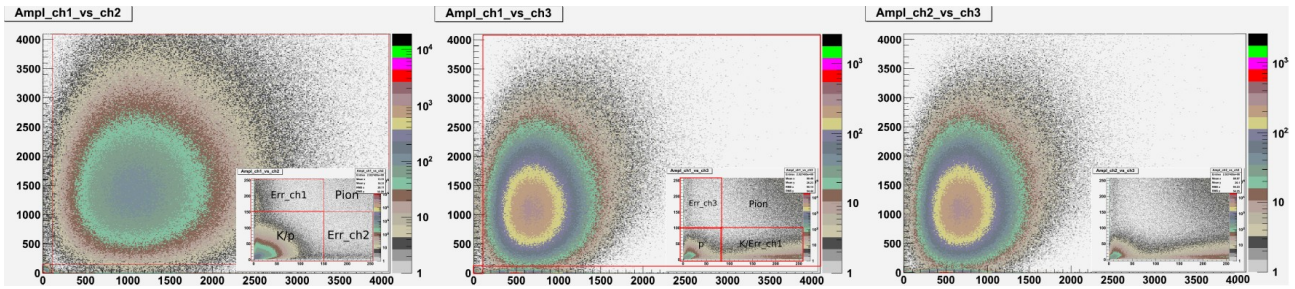


Рис. 32: Распределения по найденной амплитуде пучковых черенковских счётчиков попарно. В правом углу- увеличенная область $0 \div 250$ отсч.

На (Рис. 33) изображено распределение по времени прихода t_0 отобранных импульсов для всех трёх пучковых черенковских счётчиков. Левее на распределениях- время до поправки на фазу. Среднеквадратичное отклонение $\sigma = 0.306$ близко к соответствующему равномерному распределению.

$$\sigma_{uniform} = \sqrt{\frac{(t_{max} - t_{min})^2}{12}} = 0.289$$

Характер искажений схож с модельным (см. раздел 3.2), что связано с особенностями алгоритма и, вероятно, большой дискретностью.

Правее- после поправки. При фите гауссом σ составляет от 0.0633 до 0.0889. $0.075 * 25 \approx 1.875$ нс что уже может быть вызвано дрожанием («джиттер») сигнала детектора относительно триггера, а также самого триггера относительно пролета пучковой частицы.

Попытки обрезать допустимые ворота по времени приводят к резкому увеличению доли Unkownp при пучковой идентификации. Зависимость доли определённого сорта идентификации от ворот по времени рассмотрена в разделе 3.8.

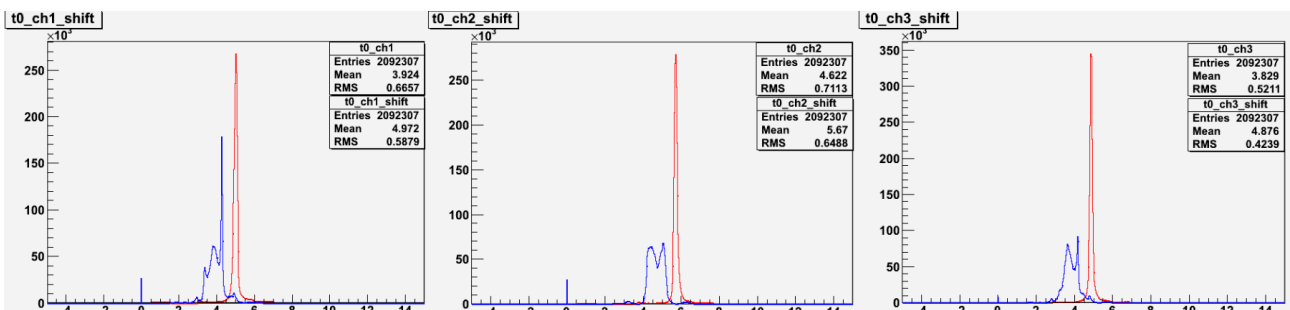


Рис. 33: ВCh1-3. Распределение по времени прихода **основного импульса** для всех трёх счётчиков до поправки (левее) и после поправки на фазу (правее). При несрабатывании счётчика записывается 0.

На (Рис. 34) занесены времена прихода всех найденных сигналов (ожидаемый сигнал вместе с pileup) во втором черенковском счётчике. Правее изображено время с поправкой на фазу, левее- без. «Модуляция» до поправки на фазу повторяются с периодом в один отсчёт. Возможно, дело в том что минимизатор не уходит сильно по времени от начальных значений, которые присваиваются как номер выборки в которой найден максимум с вычетом времени нарастания сигнала $(i_{localmax} - t_{rise})$.

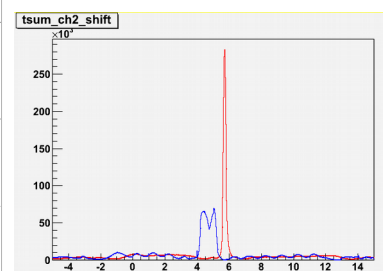


Рис. 34: Времена прихода включая импульсы от pileup

На (Рис. 35) занесены времена прихода основных сигналов в первом черенковском счётчике относительно второго без поправки (слева) и с поправкой на фазу (справа). Видна корреляция, хотя зависимость не линейная. Возможно, наблюдаемая корреляция после поправки на фазу (рис. 36) связана с «джиттером» триггера.

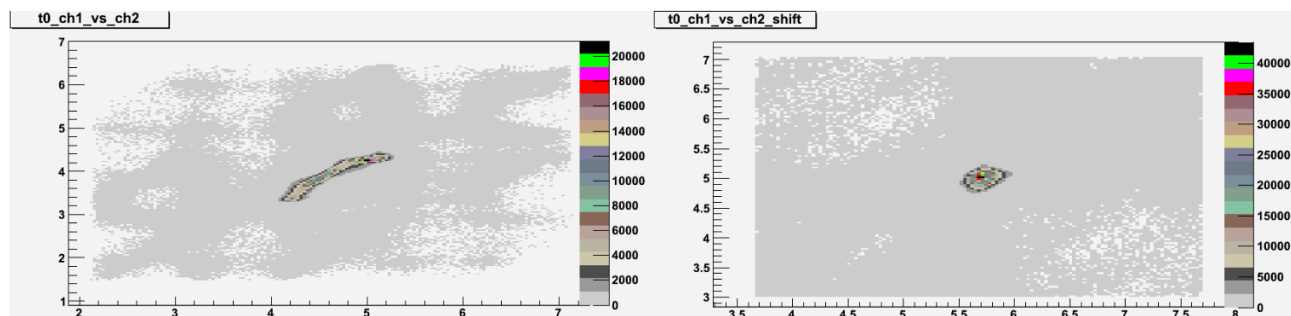


Рис. 35: Распределение по времени для Ch1 и Ch2 без поправки (слева) и с поправкой на фазу (справа).

В таблице 7 приведены результаты идентификации пучковых частиц в 50 сеансе. Для сравнения приведены доли в 44 сеансе (Табл. 6). В нём давления в черенковских счётчиках совпадают с «бериллиевой» частью 50 сеанса.

		Be	
sort	Ch1/2/3	N	%
π	+++	572421	97.663598
K	--+	7033	1.199935
p	---	795	0.135639
e		n/a	
err_ch1	-++	n/a	
err_ch2	+--		
err_ch3	++-		
onl_ch1	+--		
onl_ch2	-+-		
unk		5866	1.000827
tot:		586115	100

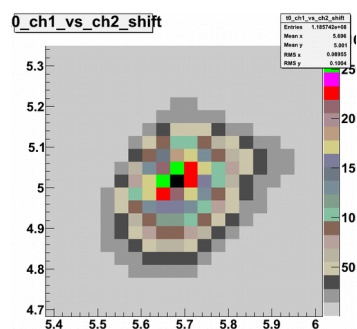


Рис. 36 Распределение по времени для Ch1 и Ch2 после поправки на фазу. Крупный масштаб.

Табл. 6: Результаты идентификации частиц в run44.

		run50					
		Be (Ch1,2 откачаны на π)			Pb (Ch1,2 откачаны на e^-)		
sort	Ch1/2/3	N	%	Ch1/2/3	N	%	
1 π	+++	195317398	96.174131	--+	791418383	94.384479	
2 K	--+	4197998	2.067091	---	31295300	3.732274	
3 p	---	482213	0.237441	n/a			
4 e		n/a			+++	4576376	0.545778
5 err_ch1	-++	1414979	0.696735	-++	4500030	0.536673	
6 err_ch2	+--	855155	0.421078	+--	6477711	0.772531	
7 err_ch3	++-	745451	0.367059	++-	36015	0.004295	
8 onl_ch1	+--	45047	0.022181	+--	113783	0.01357	
9 onl_ch2	-+-	29010	0.014285	-+-	87202	0.0104	
unk	$\Sigma 5-9$	3089642	1.521337	$\Sigma 5-9$	11580793	1.381124	
tot:		203087251	100		838504800	100	

Табл. 7: Результаты идентификации частиц в run50.

Видно что по сравнению с 44 сеансом доли К(2.06% vs 1.19%) и р(0.23% vs 0.13%) ниже, а доли π (94.38% vs 97.66%) и Unknoun (1.52% vs 1.00%) выше что, вероятно, вызвано pileup-ом в сеансе run44. Причины такого поведения рассмотрены ниже.

3.7 Влияние pileup на идентификацию.

Для сравнения с интегрирующими АЦП были взяты измерения проведённые в сеансе run44, прошедшего осенью 2012 года.

Число pileup сигналов пропорционально интенсивности пучка. Распределение по интенсивности на бериллиевой части run50 изображено на (Рис. 37).

Зависимость среднего числа алгоритмически обнаруженных сигналов $\langle N \rangle = (N_{ch1} + N_{ch2} + N_{ch3}) / 3 N_{tot}$ от интенсивности пучка I приведена на (Рис. 39). При интенсивности вблизи нуля среднее число сигналов $\langle N \rangle$ должно быть близко к 1, так как по триггеру требуется наличие пролетевшей частицы. В реальности $\langle N \rangle \approx 1.5$, что может происходить по одной из следующих причин:

1. Недостатки алгоритма. Можно проверить на модели.
2. Наличие шума различной природы, помимо pileup (шум ФЭУ, послеимпульсы, отражения в кабеле,...).

При этом распределение по числу обнаруженных сигналов близко к Пуассоновскому (Рис. 38 сплошная линия).

С ростом интенсивности наблюдается почти линейное возрастание с отклонением от него в виде «насыщения». Также, распределение отклоняется от Пуассоновского, что объясняется склонность алгоритма к занижению числа сигналов, что видно из моделирования (раздел 3.2). Распределение по числу сигналов при $I=2000 \cdot 10^3$ событий/с приведено на (Рис. 40).

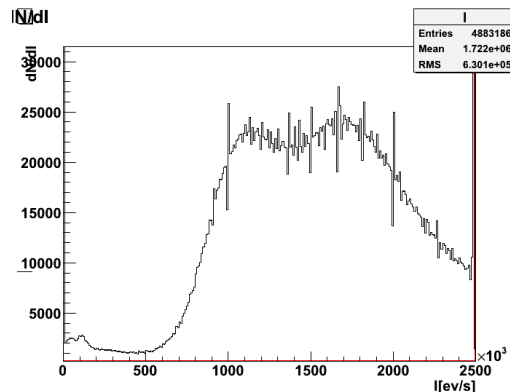


Рис. 37: Интенсивность в бериллиевой части run50.

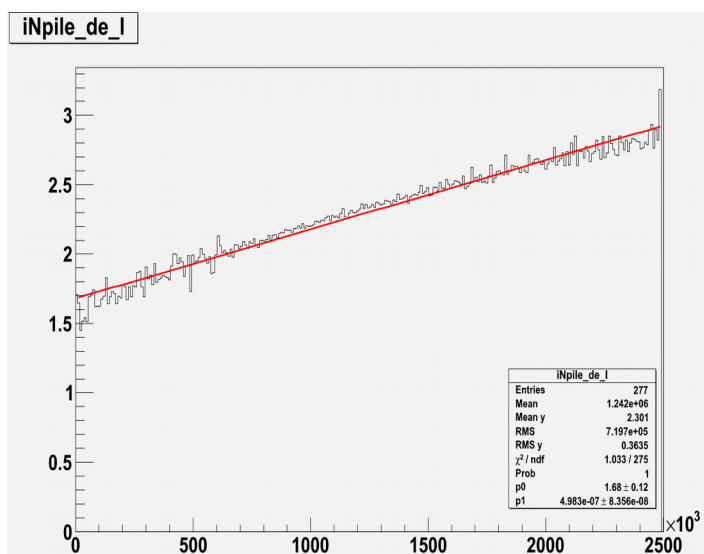


Рис. 39: Зависимость среднего числа импульсов от интенсивности (сек^{-1}).

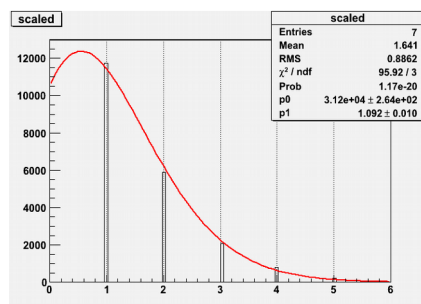


Рис. 38: Распределение по числу найденных сигналов при $I = 5 \cdot 10^3$.

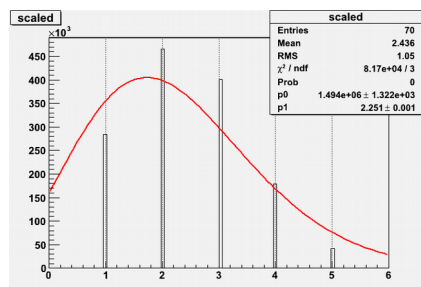


Рис. 40: Распределение по числу найденных сигналов при $I=2000 \cdot 10^3$.

При минимальной интенсивности влияние pileup практически отсутствует. При «идеальной» очистке от pileup во всём диапазоне распределение по сортам не должно изменяться с ростом интенсивности.

Зависимость доли событий определённого сорта от интенсивности пучка приведена на рис. 41. Красным (бледным) показаны данные с интегрирующих АЦП. Чёрным (ярким)- с конвейерных АЦП.

При низкой интенсивности результаты идентификации слабо отличаются между конвейерными и интегрирующими АЦП. С ростом интенсивности возрастает число ложных срабатываний. Из рисунка видно как в интегрирующих АЦП все типы (K , p , $Unknown$) почти полностью «перекачиваются» в «пионы». В конвейерных АЦП доли π , K , p «перетекают» в неопределённости. В целом, конвейерные АЦП показали гораздо меньшую зависимость от pileup по сравнению с интегрирующими.

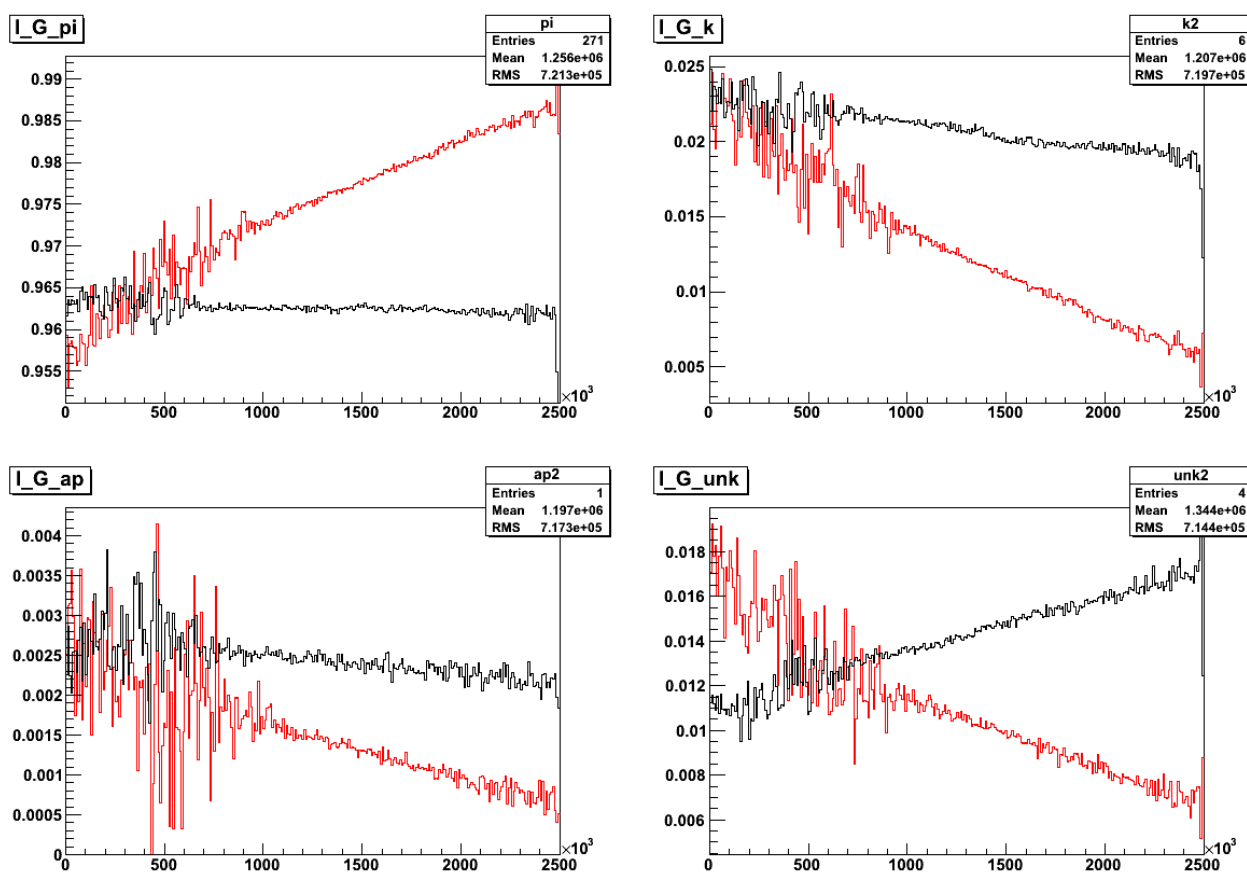


Рис. 41: Доля частиц определённого сорта(%) в зависимости от интенсивности (событий в сек). Красным/бледным: Run44, Чёрным/ярким: Run50-Be.

Отдельно стоит отметить резкое уменьшающуюся протечку пучковых каонов в пионную идентификацию по сравнению с run44, что важно для физических задач.

3.8 Влияние ширины ворот на идентификацию.

В отличие от интегрирующих АЦП, где временное окно фиксировано и составляет 100 нс, на конвейерных есть возможность его изменения. Чем больше окно, тем больше pileup сигналов попадает в интеграл, что сказывается на результатах идентификации частиц.

Зависимость доли частиц определённого сорта от ширины ворот по времени в которых ищется сигнал для бериллиевой части сеанса приведена на рис. 42. По горизонтали- ворота в отсчётах АЦП (1отсч. = 25нс.) в обе стороны ожидаемого времени прихода основного импульса. По вертикали- процент частиц данного сорта.

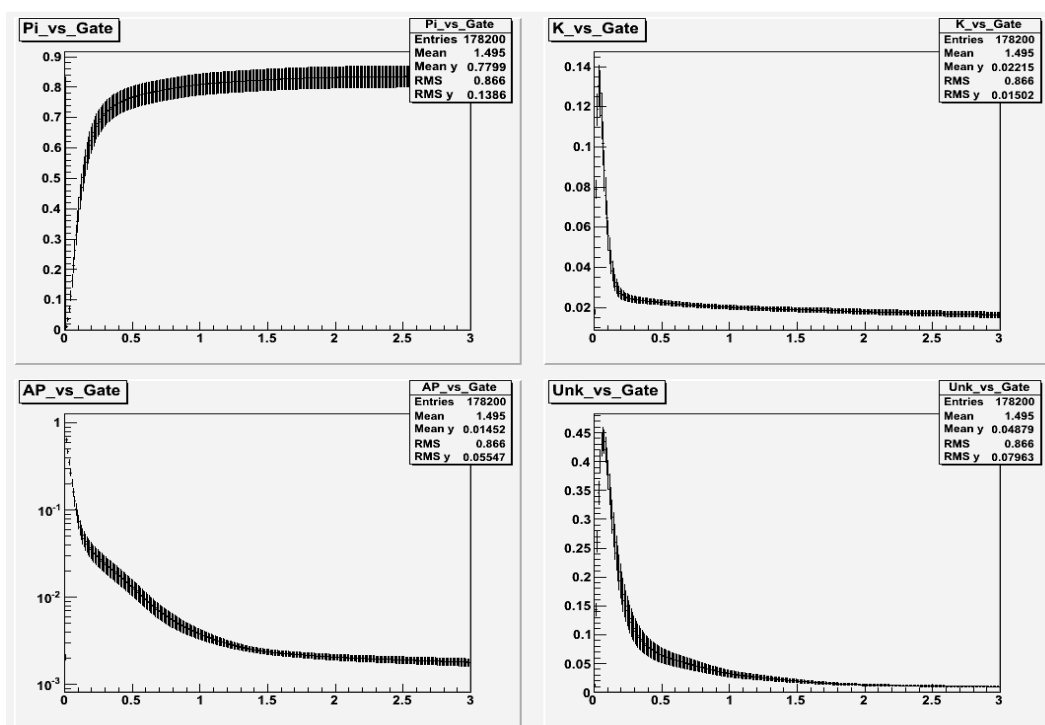


Рис. 42: Зависимость доли частиц определённого сорта от выбранных ворот на бериллиевой части сеанса.

По мере увеличения ворот, доля «пионов» возрастает, так как, во временное окно начинает попадать всё больше фоновых импульсов и, соответственно, возрастает число ложных срабатываний. По мере уменьшения ворот очень резко возрастает доля неопределённых частиц, а так же, К-мезонов и \bar{p} . При t_{gate} вблизи нуля преобладают антипротоны, так как, при столь малых временах ни в одном из счётчиков не обнаруживаются сигналы.

На (Рис. 43) приведена зависимость доли частиц определённого сорта от t_{gate} ворот по времени на свинцовой части сеанса.

Выбор ворот, вообще, зависит от поставленной физической задачи и требуемого баланса между «эффективностью выделения» и «чистотой». В целом, разумным представляются ворота от 1(50нс.) до 2(100нс.) отсчётов.

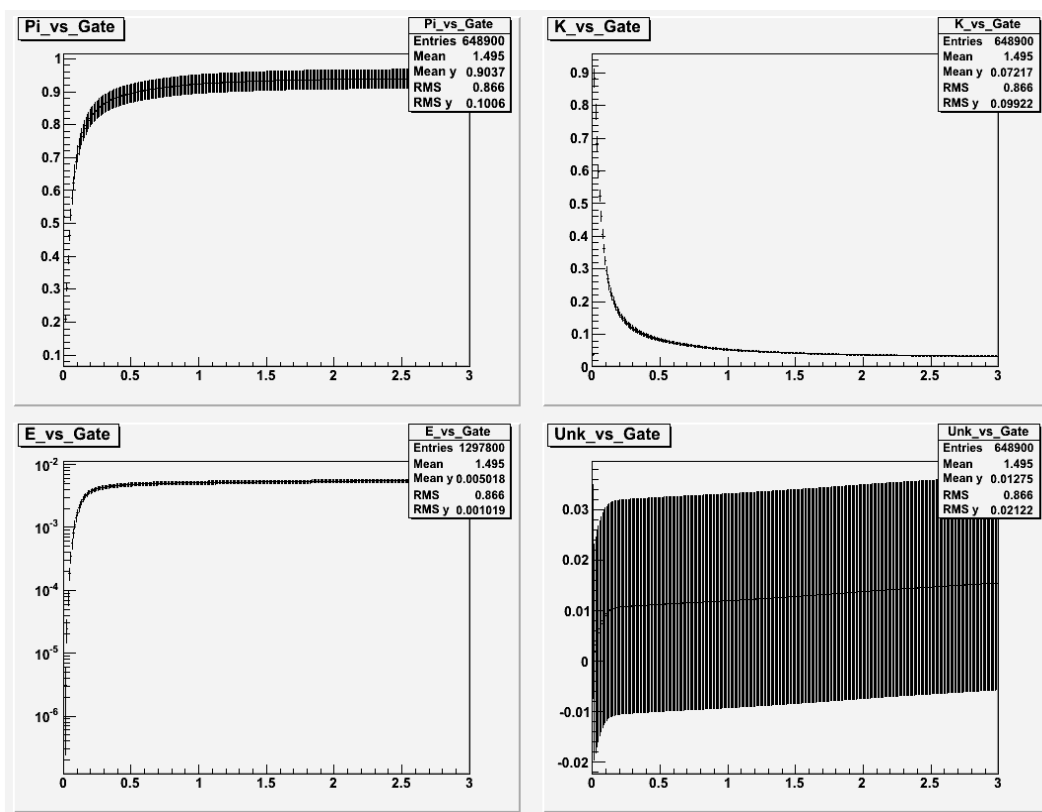


Рис. 43: Зависимость доли частиц определённого сорта от выбранных ворот на свинцовой части сеанса.

3.9 Оценки «чистоты» идентификации.

В этом разделе сделаны попытки провести оценку «протекания» частиц из одного сорта в другой на примере рассмотрения распада $K^- \rightarrow \pi^-\pi^+$. Для этого была взята «бериллиевая» часть 50 сеанса и отобраны события в триггере beam (не требуется взаимодействие в мишени и отсутствие сигнала в вето-счётчиках). Требовалось наличие только одной вершины, а также, треков двух отрицательно и одной положительно заряженных частиц. Идентификация вторичных частиц не производится. Всм вторичным частицам приписывается масса π -мезона.

Одним из критериев для ложной идентификации «протечки» каонов в другие типы может служить двумерное распределение событий по продольной координате Z вершины взаимодействия (распада) от инвариантной массы системы, которая приведена на (Рис. 44).

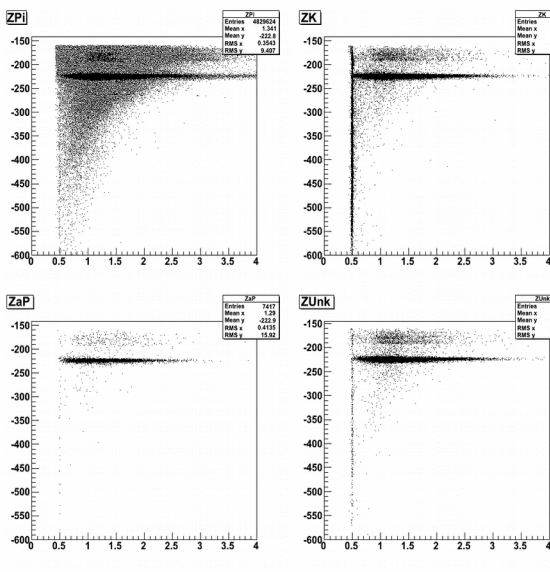


Рис. 44: Run50. Вертикальная ось: координата первичной вершины(см). Горизонтальная ось: масса $\pi\pi^+$ системы(ГэВ).

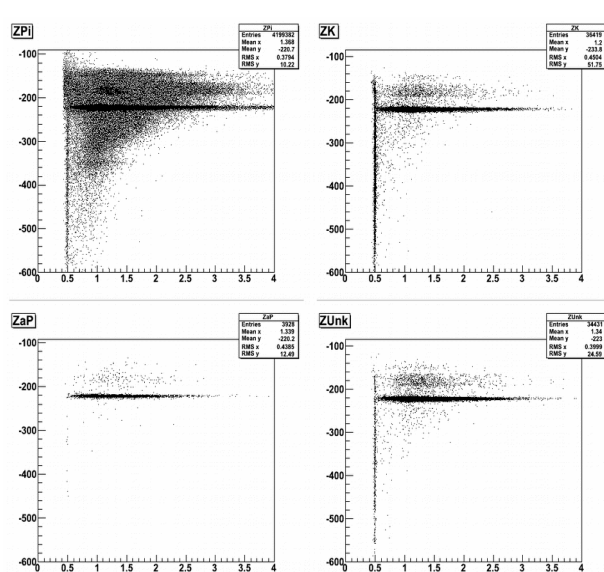


Рис. 45 Run44. Вертикальная ось: координата первичной вершины(см). Горизонтальная ось: масса $\pi\pi^+$ системы(ГэВ).

Направление пучка примерно совпадает с осью Z . Яркая область вблизи $Z = -220$ см. соответствует взаимодействиям в мишени.

На распределении частиц с каонной пучковой идентификацией (рис. 44 справа сверху) хорошо видна вертикальная прямая в области ~ 0.494 ГэВ, что соответствует массе K -мезона. При других сортах идентификации данная область должна быть сильно ослаблена. Для сравнения на рис. 45 приведены распределения для 44^{го} сеанса. В распределении с пионной пучковой идентификацией (слева сверху) хорошо видно что в 50^{ом} сеансе, область ~ 0.494 ГэВ значительно меньше заселена. Численные оценки приведены ниже. В обоих сеансах хорошо заметно проникновение каонов в «Unknown» (справа снизу).

На рис. 46 приведены распределения по инвариантной массе системы для разных идентифицированных сортов пучковых частиц. Для очистки от фона было взято обрезание по Z координате вершины распада до мишени (область < -250). Хорошо виден распадный пик в области 0.494 ГэВ, что соответствует массе K -мезона(правая верхняя картинка). Видно что

этот пик присутствует не только в «каонах», но и в распределениях по всем остальным сортам частиц, хоть и ослаблен.

По отношению этих пиков можно попытаться оценить долю каонов ошибочно идентифицированных как другие частицы.

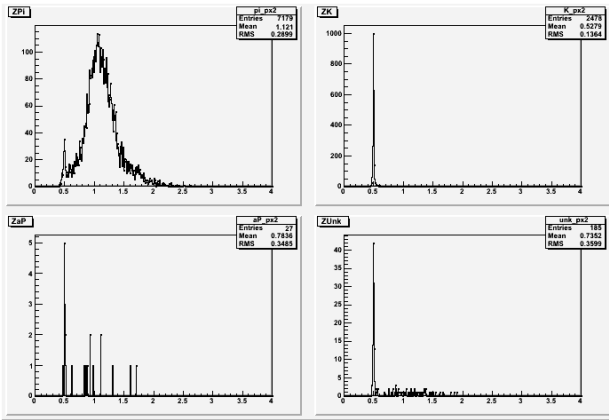


Рис.46: run50-Be. Распределение по инвариантной массе системы $\pi\text{-}\pi^+$. Есть обрезание по вершине. Наверху: пионы и каоны. Внизу: антипротоны и не определённые частицы.

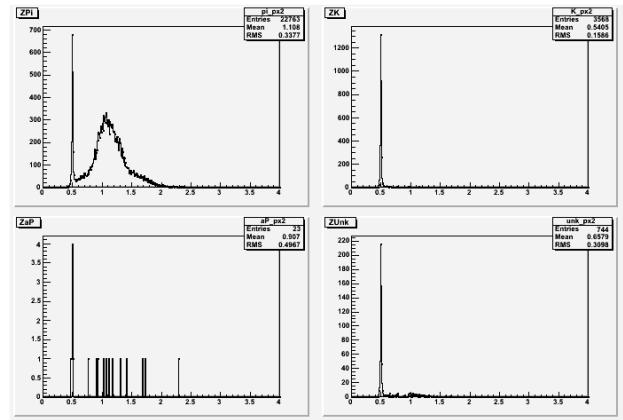


Рис. 47: run44. Распределение по инвариантной массе системы $\pi\text{-}\pi^+$. Есть обрезание по вершине. Наверху: пионы и каоны. Внизу: антипротоны и не определённые частицы.

Для каждого из распределений был произведён фит функцией Гаусса пика в области 0.494 ГэВ. Фон описан функцией: $a(m - m_0)^b$.

$$k_{fr} = \frac{I_k}{I_{pi} + I_k + I_{ap} + I_{unk}}, \text{ где } I_i = \int_{-\infty}^{\infty} f_{igauss} \quad (2)$$

Результат оценки протекания по распадному пику каона приведён в таблице 8.

		π , %	K, %	p, %	unk, %	Σ , %
%	run44	32.34	57.12	0.19	10.35	100
	run50	3.74	91.98	0.37	3.91	100
σ , ГэВ	run44	0.00756	0.007413	0.00714	0.00758	
	run50	0.00974	0.007055	0.00584	0.00798	
m, ГэВ	run44	0.495	0.4949	0.4958	0.4954	
	run50	0.4938	0.4943	0.4962	0.4956	

Табл. 8 Доли частиц в «каонном пике». (см. текст)

Значительно снизилась протечка «каонов», и соответственно, «загрязнение пионов». Видно что около теперь только ~8% «K-мезонов» ошибочно идентифицируются как « π » и «Unknown».

Идентификация электронов.

Как сказано выше, на «свинцовой» части сеанса во всех трёх пучковых черенковских счётчиках изменился рабочий газ и давления, по сравнению с «бериллиевой» частью. В частности, для электронов средний сигнал упал до ~1 ф.э. Следовательно, значительно

изменилась интенсивность черенковского света. Изменились амплитудные спектры (рис. 48). Это потребовало подбора новых порогов в функции идентификации.

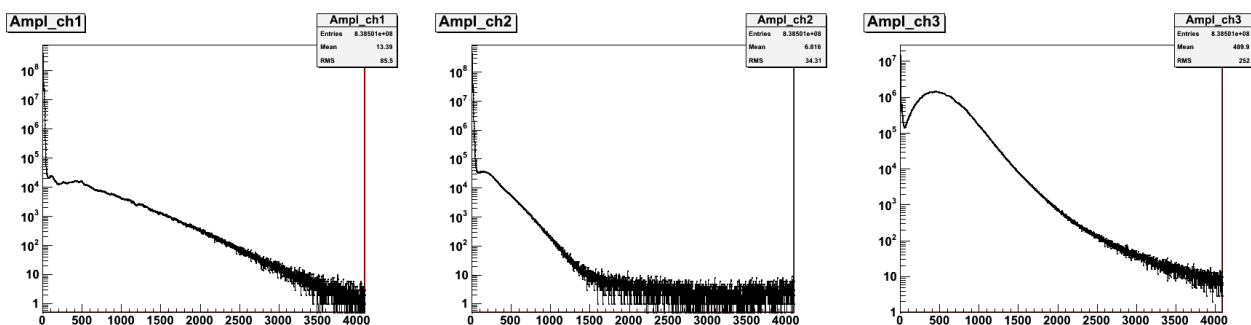


Рис. 48: Спектры трёх черенковских счётчиков на свинцовой части run50. ВCh1,2 откачаны под порог пионов . ВCh3 откачан под порог каонов.

На рис. 49 и 50 приведены двумерные распределения по амплитуде первых двух черенковских счётчиков относительно друг друга. Видно сильную заселённость в областях прилегающих к осям координат, что соответствует событиям когда только в одном из двух счётчиков виден сигнал, что объясняется малой интенсивностью света.

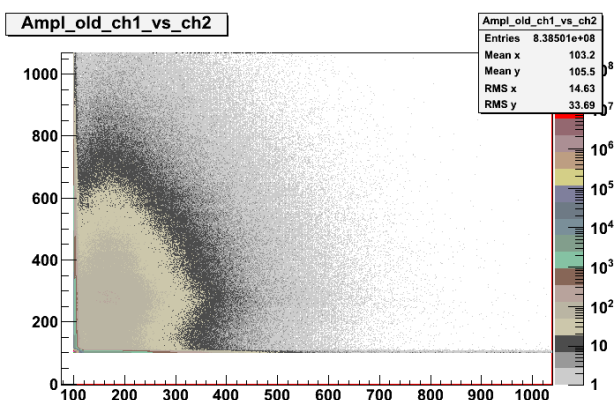


Рис. 49: Распределение по амплитуде ВCh1, ВCh2 относительно друг друга run50.

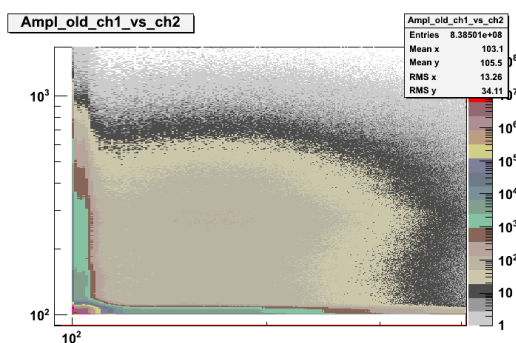


Рис. 50: Распределение по амплитуде ВCh1, ВCh2 относительно друг друга run50. Логарифмический масштаб.

В настоящее время рассматриваются меры по улучшению электронной идентификации. Ниже на рис. 51 приведён спектр масс 3π системы.

В спектре с электронной идентификацией (слева снизу) доминирует процесс тормозного излучения с последующей конверсией γ -кванта: $e^-Z \rightarrow Ze\gamma \rightarrow Ze^-e^+e^-$ [11].

Из сравнения спектров для «электронной» и «unknown» идентификаций видно, что «протечка» в «unknown» составляет около 50% и сравнима с потерей в «unknown» остальных двух типов (π , K).

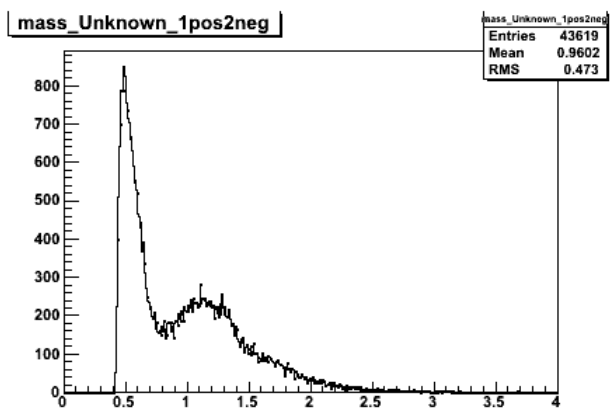
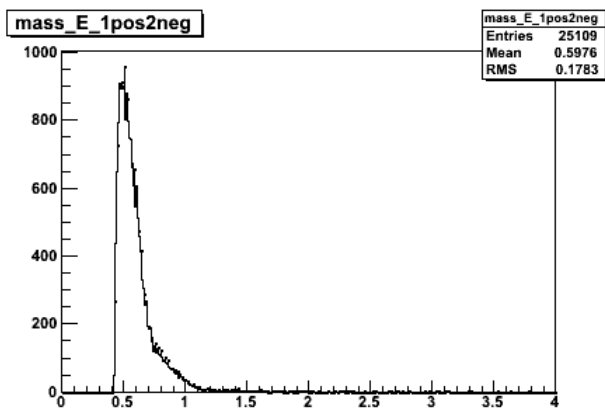
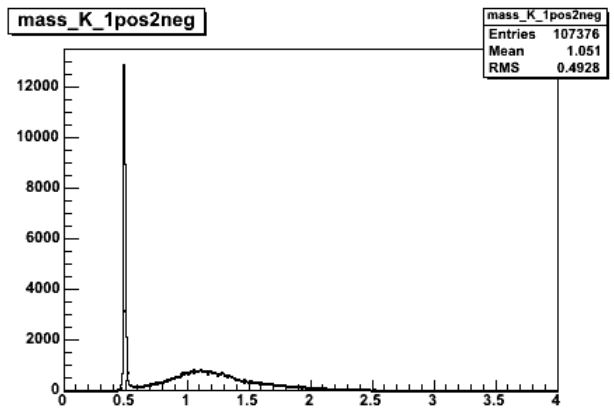
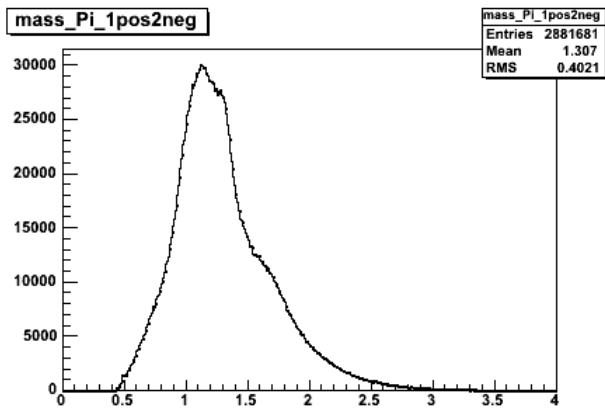


Рис. 51: Спектр масс системы $\pi\pi\pi$ на свинцовой части run50 . Сверху: π , K . Снизу: e , Unknown .

4 Тестовые измерения с ЭМК

В 44^{ом} сеансе в новые АЦП была заведена сборка из 4x4 малых (43x43 см) счётчиков электромагнитного калориметра. Производилась тестовая экспозиция на пучке электронов 10 ГэВ. Передвигая калориметр по вертикальной и горизонтальной осям, прошли через все 16 счётчиков так чтобы пучок поочерёдно центрировался на каждый из них. Данные измерения были проведены, как для конвейерных, так и для интегрирующих АЦП.

Осциллографических измерений не проводилось. Для каждого счётчика была подобрана форма сигнала по методу описанному в разделе 2.6. По этим формам подобраны параметры функций фита. При помощи алгоритма описанного в разд. 3.1 были получены амплитуды.

На рис. 52 приведены амплитудные спектры сигналов от электронов в электромагнитном калориметре в центральном счётчике. Одновременно изображены результаты, как для интегрирующих, так и конвейерных АЦП. Шкала амплитуд откалибрована до совпадения спектров АЦП. Правый край спектра соответствует максимальному энерговыделению ливня (попаданию электрона в центр ячейки). В области 125 отсчётов виден пик от МПР мюонов.

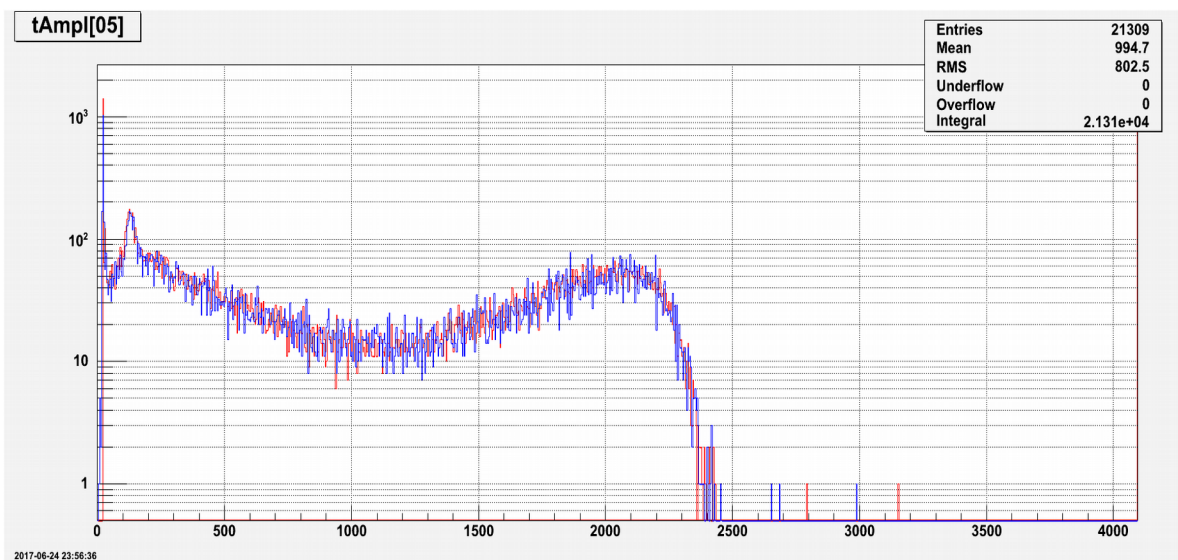


Рис. 52: Амплитудный спектр канала ЭМК на который наведён пучок. Синим: интегрирующие АЦП. Красным: конвейерные АЦП.

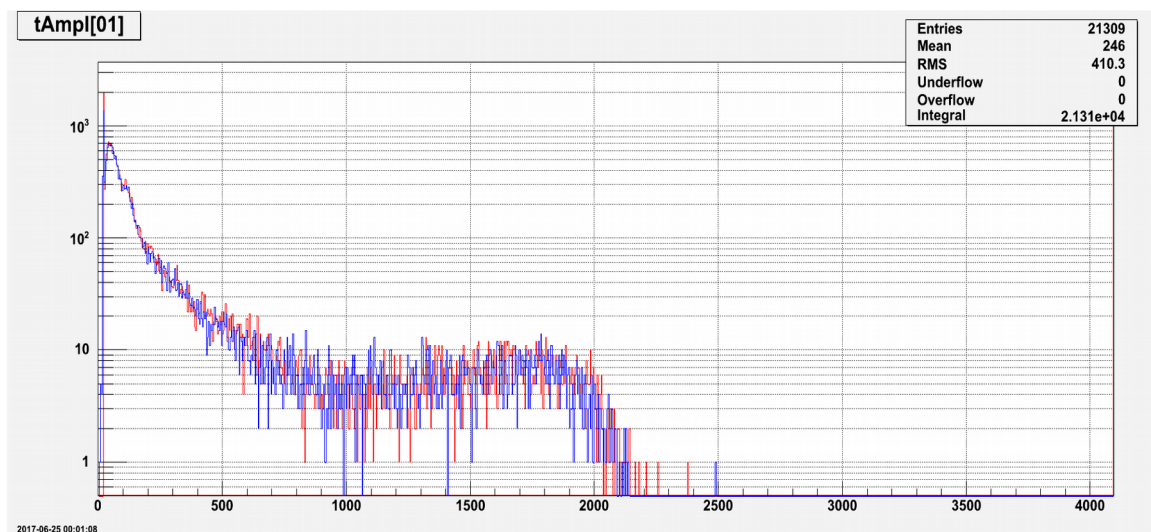


Рис. 53: Амплитудный спектр канала ЭМК, находящегося рядом с каналом на который наведён пучок. Синим: интегрирующие АЦП. Красным: конвейерные АЦП.

На рис. 53 приведены спектры для счётчика соседнего с тем на который наведён пучок.

Вышесказанное грубо показывает совместимость результатов SADC с интегрирующими АЦП.

В дальнейшем предстоит произвести реконструкцию ливней и изучение характеристик (в том числе разрешения).

5 Заключение.

В этой работе было проделано следующее:

- Измерены характеристики измерительного тракта (формирователь+АЦП) (нелинейность, перекрёстные помехи).
- Разработана процедура восстановления усреднённой формы методом поправки на фазу. Полученная форма согласуется с осциллографическими измерениями.

На этой основе реализован алгоритм восстановления формы без осциллографических измерений. Подобраны параметры для пучковых и вето счётчиков, а так же, для тестовой сборки ЭМК.

- Разработано следующее программное обеспечение: предложен и реализован алгоритм пособытийной обработки хитов; проведена его проверка на численной модели; написан процессор для реконструктора производящий обработку данных с конвейерных АЦП; расширена структура DST для хранения результатов обработки конвейерных АЦП; доработана пользовательская функция пучковой идентификации для совместимости с новыми АЦП.
- Изучены результаты реконструкции, проведено сравнение пучковой идентификации с интегрирующими АЦП. Получено радикальное уменьшение потерь «каонов» и их протечки в другие типы идентификации.

Предстоит сделать:

- Провести измерения дифференциальной нелинейности, а также дополнительные измерения с высокостабильным аттенуатором.
- Обработка данных с Ch28 и его модельная проверка.
- Доработка ПО: увеличение скорости работы, совершенствование алгоритма (минимизация влияния pileup, шумов), доработка процедуры автоматического подбора параметров, её модельная проверка.
- Совершенствование моделирования (учёт дрожания пьедестала, джиттера и др.) Моделирование оцифровки с удвоенной частотой.
- Изучение результатов реконструкции вето-счётчиков.
- ЭМК: проведение реконструкции ливня с новыми АЦП. Сравнение результатов с интегрирующими АЦП.

6 Список литературы.

- [1] «Модуль конвейерного амплитудно-цифрового преобразования.» препринт ИФВЭ А.Ивашин, В.Матвеев, В.Сугоняев, Ю.Хохлов. Готовится к печати.
- [2] «Новый электромагнитный калориметр модернизированной установки ВЕС», НИЦ «Курчатовский институт» ИФВЭ, ПТЭ А. В. Ивашин, В. В. Календарев, И. А. Качаев [и др.]. DOI: [10.7868/S0032816216040212](https://doi.org/10.7868/S0032816216040212) УДК: 539.1.074, 2015
- [3] «Моделирование активной мишени для установки ВЕС», выпускная квалификационная работа на степень бакалавра, МФТИ, М.Михасенко.
- [4] «Analog Integrated Circuit Design», D. Johns & K. Martin, John Wiley & Sons Inc., 1997.
- [5] UOBYQA: Powell, M. J. D. (2002). "UOBYQA: unconstrained optimization by quadratic approximation". Mathematical Programming, Series B (Springer)92: 555–582.
- [6] Igor Kachaev, PWA tools and methods developed by VES group, Athos 2013.
<http://indico.universe-cluster.de/indico/contributionDisplay.py?contribId=15&sessionId=6&confId=2857>
- [7] «OFF: фреймворк для обработки данных в эксперименте ВЕС», ИФВЭ, А.Ивашин.
<http://pcbech.ihep.su/~ivashin/off.pdf>
- [8] «Предложение по формату DST для эксперимента ВЕС», ИФВЭ А.Ивашин.
<http://pcbech.ihep.su/~ivashin/dst-1.9.pdf>
- [9] Д.Мейер «Теория реляционных баз данных», изд. "Мир", 1987
- [10] «Приём данных от модулей ADC-32ATC в ССД ВЕС», частное сообщение, А. Ивашин. 2016г. <http://pcbech.ihep.su/elog/Equipment/63>
- [11] «Примаковское рождение системы $\pi^+\pi^-\pi^0$ в реакции $\pi^- p \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0 p$ при $m(3\pi) < 0.72$ ГэВ в эксперименте ВЕС», выпускная квалификационная работа на степень магистра, МФТИ, А.Шумаков, 2017.

Приложение.

10.07V			11.03V			12.07V			<A1>-<A2>	<A2>-<A3>	<A1>-<A3>
	77.001237	0.861995		74.184115	0.89		71.151697	0.882388	2.817122	3.032418	5.84954
	103.121651	0.903866		100.132477	0.901668		97.288076	0.875222	2.989174	2.844401	5.833575
	91.783666	0.864458		88.904939	0.869525		86.018898	0.851686	2.878727	2.886041	5.764768
	99.105458	0.864558		96.154327	0.886679		93.085843	0.869448	2.951131	3.068484	6.019615
	121.102868	0.879252		118.19699	0.874642		115.367246	0.867032	2.905878	2.829744	5.735622
	77.119296	0.863951		74.223465	0.865488		71.141899	0.897248	2.895831	3.081566	5.977397
	70.969676	0.883931		68.066653	0.871311		65.058786	0.940104	2.903023	3.007867	5.91089
<Ped>	121.056174	0.865725	<Ped>	118.270132	0.863305	<Ped>	115.408348	0.866823	2.786042	2.861784	5.647826
	102.07796	0.86192		99.198336	0.851558		96.360057	0.852307	2.879624	2.838279	5.717903
	100.700583	0.858075		97.794484	0.858904		94.956199	0.824717	2.906099	2.838285	5.744384
	77.838368	0.865552		74.89455	0.851933		72.109958	0.848567	2.943818	2.784592	5.72841
	105.435671	0.875433		102.419143	0.876545		99.551521	0.848778	3.016528	2.867622	5.88415
	103.167462	0.853854		100.249318	0.847206		97.330816	0.853338	2.918144	2.918502	5.836646
	90.438497	0.84553		87.495461	0.837247		84.5723	0.842918	2.943036	2.923161	5.866197
	104.656774	0.863202		101.651997	0.86021		98.718597	0.865591	3.004777	2.9334	5.938177
	119.660778	1.245063		116.766214	1.205529		113.830922	1.237815	2.894564	2.935292	5.829856
Mean:	101.389272	0.864508		98.49641	0.8675065		95.658128	0.866207	2.9059885	2.9022715	5.8351105
								dV = 1V	dV = 1V	dV = 2V	

Прил. 1 Зависимость пьедестала от напряжения питания платы АЦП.

	0	1	2	3	4	5	6	7
a	-0.971433	-1.42052	-1.85465	-1.55195	24.4698	-1.4257	-1.01997	-1.24785
b	6.2228	6.27175	6.28092	6.22173	6.17509	5.4892	6.22772	6.26948
I_FSR	0.0019678	0.00195049	0.00203429	0.00198777	0.0115267	0.00176925	0.00192469	0.00202689
I_LSB	8.06011	7.98922	8.33247	8.14191	47.2135	7.24687	7.88351	8.30213

	8	9	10	11	12	13	14	15
a	-1.76621	-1.74675	-0.857	-0.9578	-1.4738	-1.00516	-1.56816	
b	6.27628	6.21678	6.2178	6.28583	6.22872	6.21122	6.19993	
I_FSR	0.00198926	0.00196781	0.0020061	0.00194943	0.00193659	0.00197998	0.00190968	
I_LSB	8.14801	8.06013	8.21699	7.98488	7.93229	8.11	7.82207	

	16	17	18	19	20	21	22	23
a	-1.33727	-1.43193	-1.49762	25.6413	25.3121	25.3843	24.6215	-1.31304
b	6.20933	6.24747	6.19699	6.23301	6.18438	6.17159	6.27813	6.2244
I_FSR	0.00191375	0.00197591	0.0019591	0.00316457	0.0478706	0.0458389	0.00327594	0.00196684
I_LSB	7.83872	8.09331	8.02446	12.9621	196.078	187.756	13.4183	8.05619

	24	25	26	27	28	29	30	31
a	-1.20191	-1.31113	-1.67406	25.291	-1.39933	-1.51612	-1.40982	-1.10342
b	6.21153	6.24457	6.18915	6.18797	6.20387	6.17195	6.18787	6.24199
I_FSR	0.00196412	0.00661856	0.0019725	0.0203354	0.00195485	0.00194087	0.00194553	0.00190326
I_LSB	8.04503	27.1096	8.07935	83.2937	8.00708	7.94982	7.9689	7.79577

Прил. 2: a- смещение прямой; b- коэффициент наклона; I_FSR, I_LSB- нелинейности.

	Ped_default	α	B	β	C ₁	C ₂
0	304.288818	0.864571	0.163603	0.394478	0.12243	-8.121382
1	300.644401	0.907124	0.176237	0.434949	0.159261	-4.26651
2	270.659347	0.886333	0.164191	0.41168	0.137697	-6.912353
3	274.283456	0.867727	0.146418	0.364891	0.292315	-2.332869
4	280.51713	0.965471	0.19685	0.55356	0.292272	-1.404384
5	290.447374	0.844729	0.131112	0.35647	0.200585	-5.363386
6	291.367954	0.928892	0.169469	0.417478	0.16218	-3.614343
7	301.11127	0.954961	0.203945	0.465401	0.232902	-2.469517
8	287.0518	0.95022	0.171009	0.43931	0.23012	-2.8294
9	290.038751	0.942509	0.149331	0.414367	0.238136	-2.222368

Прил. 3: Параметры функций описывающих форму сигнал с veto-счётчиков.