

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет
Кафедра общей физики

Гущин Владимир Евгеньевич

КУРСОВАЯ РАБОТА

Изучение характеристик зарядо-чувствительного предусилителя

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа № 19310

Научный руководитель:

_____ Г. П. Разуваев

Оценка научного руководителя

«__» _____ 2020 г.

Преподаватель практикума:

_____ А. А. Симонов

Оценка преподавателя практикума

«__» _____ 2020 г.

Куратор практикума:

_____ к.т.н. В. Т. Астрелин

Итоговая оценка

«__» _____ 2020 г.

Новосибирск, 2020 г.

Аннотация

В ИЯФ СО РАН идёт эксперимент КМД-3 на коллайдере ВЭПП-2000. Одной из подсистем детектора КМД-3 является калориметр на основе активированных кристаллов CsI. В работе представлен процесс подготовки запасных предусилителей для калориметра. Для этого был организован стенд измерения отклика ЗЧПУ на калибровочный сигнал и разработана процедура определения основных характеристик предусилителей: линейность отклика, шумы и чувствительность. Для 2 ЗЧПУ проведены подробные измерения характеристик и для 10 — грубые.

Ключевые слова: ЗЧПУ, линейность отклика, чувствительность.

Оглавление

1	Введение	4
2	Теория	5
3	Эксперимент	5
3.1	Описание установки	5
3.2	Обработка данных	6
3.3	Расчёт ошибок и изучение шумов	10
4	Заключение	13
5	Благодарности	14
6	Список литературы	14
A	Принципиальная схема предусилителя	15

1 Введение

Детектор КМД-3 служит для регистрации координат, импульсов и энергий частиц при столкновении пучков в коллайдере ВЭПП-2000. Часть калориметра детектора КМД-3, созданная на основе сцинтилляционных кристаллов CsI, служит для измерения энергий частиц. Диапазон энергий частиц, который измеряется с разрешением лучше 5 %: 10 МэВ–1 ГэВ [1]. Калориметр состоит из восьми октантов (окружающих канал, в котором сталкиваются пучки), которые в сумме содержат 1152 счетчика. Строение счётчика показано на рис. 1. Пролетая через сцинтилляционные кристаллы (1), фотоны порождают световой сигнал кристалла. Это сигнал регистрируется кремниевым PIN фотодиодом(4). Задача ЗЧПУ(6) состоит в интегрировании и преобразовании токового сигнала, поступающего с фотодиода, в импульс напряжения. Далее импульс поступает на плату УФО-32, она усиливает, формирует, оцифровывает сигнал. УФО-32 взаимодействует с ещё несколькими элементами электронного тракта калориметра, которые уже передают данные из оперативной памяти УФО-32 онлайн-компьютеру, где происходит сборка события и его запись в файл. Калибровочную ёмкость используют для калибровки ЗЧПУ, как замену калибровки с использованием фотодиода. Плата

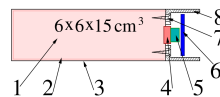


Рис. 1. Схема счётчика: 1 — кристалл; 2 — тефлон; 3 — алюминизированный лавсан; 4 — фотодиод; 5 — резиновая прокладка; 6 — плата предусилителя; 7 — шурупы для крепления кристаллов к основанию; 8 — стальной корпус.

УФО-32 и ЗЧПУ разработаны в ИЯФ.

Цель данной работы состояла в создании условий для подготовки запасных предусилителей. Для этого выполнены следующие задачи: собран и отлажен измерительный стенд, проведена проверка на работоспособность части ЗЧПУ, снятых с детектора КМД-3 из-за отсутствия отклика. (возможно, для существенной части, причина — низкое качество распайки при сборке октантов) Для организации измерительного стенда была использована старая версия платы УФО-32 и напряжение питания, используемое до обнаружения и устранения нелинейности [2]. Актуальность работы высокая в связи с назревающей нехваткой запасных предусилителей. До настоящего времени подготовка запасных ЗЧПУ на основе снятых с калориметра, не проводилась.

2 Теория

Цена деления канала платы УФО-32 в единицах заряда электрона, подведённого к ёмкости на входе ЗЧПУ (кол-во эл. на 1 пФ), иначе называется чувствительностью. Чувствительность также измеряют в единицах входного напряжения или в единицах энергии, поступившей на фотодиод от частицы, пролетевшей через счётчик. Для исследованных предусилителей чувствительность рассчитывалась по графикам зависимости выходного сигнала в каналах АЦП от напряжения, поданного на калибровочную ёмкость. Пересчёт в единицы заряда электрона, подведённого к калибровочному входу ЗЧПУ, производился с учётом знания ёмкости калибровочного конденсатора по формуле: $q = U \cdot C$.

В состав платы УФО-32 входят пиковый детектор и восстановитель базовой линии. Пиковый детектор служит для измерения импульса, сформированного усилителем-формирователем (он также является частью УФО-32). Восстановитель базовой линии является частью системы запуска считывания сигнала с ЗЧПУ и служит для разряда разделительного конденсатора, остаточное напряжение на котором привело бы к ошибке измерения амплитуды полезного сигнала.

Во время измерений на калориметре, была обнаружена нелинейность электронного тракта в малосигнальной и высокосигнальной областях [2]. Для слабого сигнала она была связана с тем, что в момент «открытия ворот» возникает дополнительный сдвиг абсолютной базовой линии пикового детектора до уровня на 8 мВ ниже его «собственной» рабочей точки в режиме ожидания. В результате сигнал амплитудой менее 8 мВ, или 300 каналов АЦП, не может повлиять на выходное напряжение пикового детектора. Для больших амплитуд входного сигнала с фотодиода на ЗЧПУ — с неправильным напряжением питания, которое приводило к насыщению транзистора VT5 (см. Приложение А) в выходном каскаде ЗЧПУ.

3 Эксперимент

3.1 Описание установки

Был собран и отлажен измерительный стенд на основе описанного на стр. 17 [1], шаблон схемы (рис. 2) заимствован оттуда же. Сдвиг напряжения 60 В (+HV) не подан, фотодиод не подключен.

Отрицательный сигнал прямоугольной формы длительностью 100 мкс с генератора (1,5 В) ослабляется аттенуатором (20–70 дБ) и передается на плату УФО-32, которая подаёт сигнал на калибровочный вход ЗЧПУ (калибровочная ёмкость — 1 пФ). Сигнал управления поступает на вход УФО-32 (trigger in) также с гене-

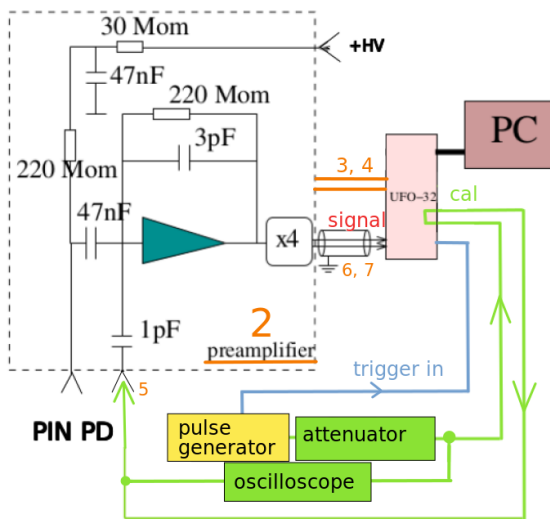


Рис. 2. Схема установки

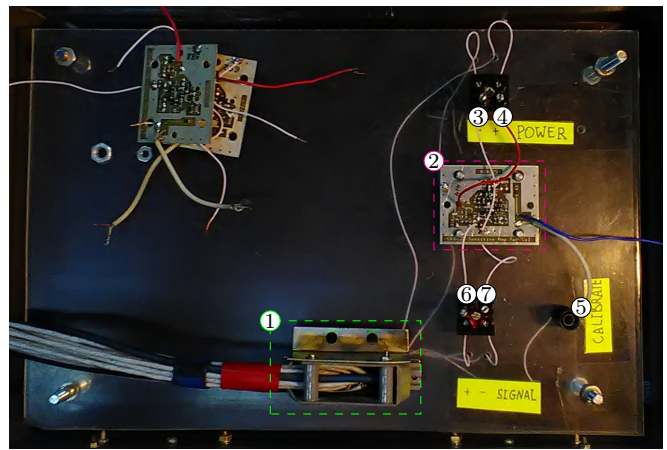


Рис. 3. Внутри ящика: 1 — ДБ-62, 2 — ЗЧПУ, 3 — заземление, 4 — питание ЗЧПУ, 5 — калибровочный сигнал, 6 — “+” сигнал, 7 — “-” сигнал

ратора после предварительного формирования. Осциллограф измеряет напряжение, подаваемое на калибровочный вход УФО-32. Выходной парафазный сигнал с предусилителя, амплитуда которого пропорциональна заряду импульса на входе ЗЧПУ, поступает на вход платы УФО-32, где сигнал усиливается, фильтруется и формируется, оцифровывается и помещается в оперативную память платы. Формировка заключается в однократном дифференцировании и четырёхкратном интегрировании, время формирования 1 мкс.

Оцифрованная амплитуда сигнала считывается из ОЗУ УФО-32 с помощью компьютера, где заполняется гистограмма амплитудного распределения сигнала (характерные распределения представлены в разделе “Обработка данных”).

Предусилитель подключался к остальной схеме с помощью кабеля с разъёмом ДБ-62 (1 на рис. 3). Пластина (рис. 3), изготовленная нами, с необходимыми для подключения элементами была помещена внутри железного ящика (для экранировки). Перед установкой на стенд к каждому ЗЧПУ припаяны недостающие провода. Выпаяны провода, к которым ранее подсоединялся фотодиод, так как иначе они ловят шумы, работая как антенны. Для уменьшения наводок в электронном тракте напряжение питания ЗЧПУ (+10 В), напряжение смещения фотодиодов (+60 В) и калибровочный сигнал подаются на модули через плату УФО-32.

3.2 Обработка данных

После сборки и отладки стенда, было записано примерно 230 гистограмм амплитудного распределения при различном входном напряжении для 14 ЗЧПУ. Было отбраковано около 30 гистограмм. Существенная часть гистограмм была отбра-

кована из-за ошибок при сохранении файлов, они определялись при сравнении данных в таблицах с рукописными записями (почти все такие точки удалены с графиков). Остальные отбракованные точки являются выбросами: существенные шумами (увеличение на порядок), наблюдаемые конкретно для этого измерения на осциллографе (причина может состоять в плохом контакте в схеме при измерениях, вероятно был плохой контакт в местах подключения проводов ЗЧПУ к стенду, либо плохо припаяны провода к ЗЧПУ, либо ловилась единичная внешняя наводка) — такие точки оставлены на графиках.

Характерные амплитудные спектры представлены на рисунках 4 и 5.

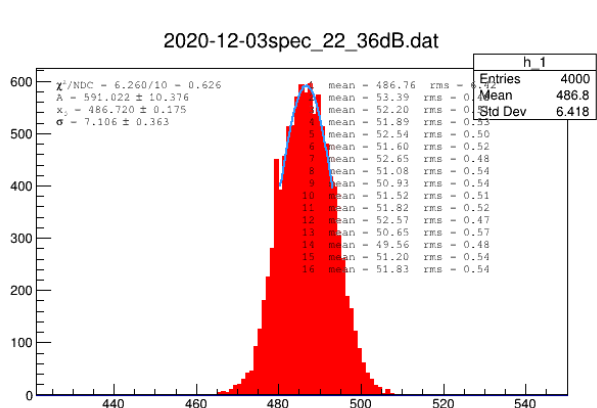


Рис. 4. Характерное амплитудное распределение выходного сигнала (ЗЧПУ №22, $V_{in} = 24$ мВ)

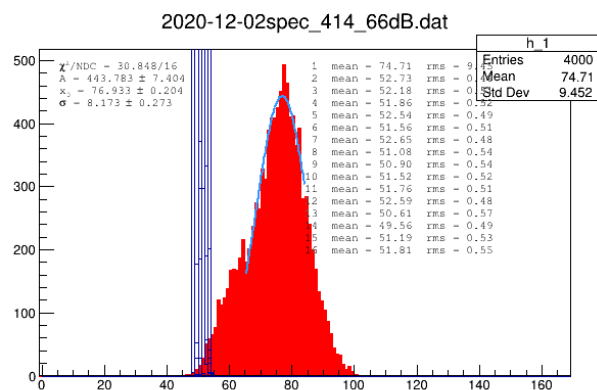


Рис. 5. Характерное амплитудное распределение выходного сигнала при измерениях вблизи пьедестала (ЗЧПУ №414, $V_{in} = 0,75$ мВ)

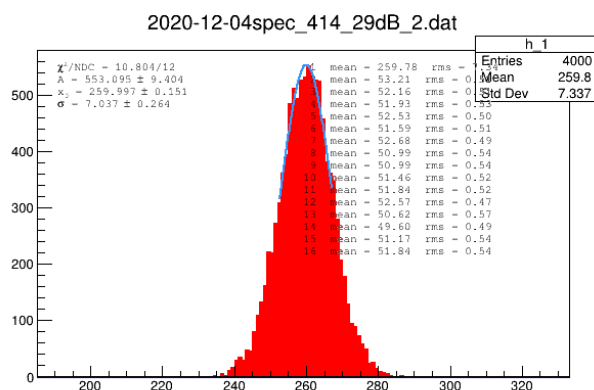


Рис. 6. Характерное амплитудное распределение выходного сигнала при измерениях вблизи точки перегиба (ЗЧПУ №414, $V_{in} = 8$ мВ)

Асимметричность распределения при измерениях вблизи пьедестала (рис. 5) связана с тем, что в ЗЧПУ имеются транзисторы и схема устроена так, что она усиливает лишь положительный сигнал.

Положение пика на каждой гистограмме определяется величиной выходного сигнала ЗЧПУ, а его ширина и высота — шумами в измерительном тракте и количеством измерений соответственно (чаще всего гистограмма строилась на основе 10000 измерений). Спектр хорошо описывается гауссовой функцией при аппроксимации в диапазоне $\pm\sigma$ для всех измерений, за исключением нескольких. Но оптимальный диапазон в котором стоит приближать амплитудный спектр гауссовой функцией ещё предстоит определить. Из-за исходно неправильно взятой аппроксимации в диапазоне $\pm 5\sigma$, которая плохо описывает пик амплитудного спектра, и проблем с наличием большого числа данных, которые надо было исправлять, согласуя с записями в экспериментальном журнале.

Но были отсмотрены все амплитудные спектры и замечено, что значения пика и rms, определённые без приближения гауссовой функцией, и с приближением (в диапазоне $\pm\sigma$) отличаются не более чем на 0,5% (0,005 на нижних графиках рисунков с двумя графиками) в при ослаблении сигнала менее 60 dB ($V_{in} > 1,5$ мВ); величина пика > 103 кан АЦП). А при ослаблении сигнала более 60 dB могут отличаться зачастую на 4%, но не более 7%. Собственно это приведёт лишь к тому, что 4 нижние левые точки на нижнем графике на рис 9, поднявшись на вверх, лягут на общую линию тренда. Для остальных точек существенных изменений не произойдёт.

Среднеквадратичное отклонение (RMS) гауссовой функции или иначе - ширина пика (рис. 4, 6, 5), характеризует уровень шумов (рис. 12 и 15).

Чувствительность рассчитывалась для каждого ЗЧПУ следующим образом: проводилось построение зависимости пика в кан АЦП A от входного напряжения V_{in} и из угла наклона приближающей функции p_1 определялась чувствительность в единицах мВ/кан, переводилась в единицы эл. на канал и ф. эл. на канал считая ёмкость фотодиода равной 80 пФ (средняя по фотодиодам, стоящим на калориметре). Пьедестал определяется p_0 .

Вид приближающей функции: $V_{in} = p_1 \cdot A + p_0$ или для графиков: $A = (V_{in} - p_0) / p_1$

На графике (нижний на рис. 9) видно что линейность наблюдается в диапазоне 300–3000 кан. В диапазоне от пьедестала (50 кан) до 200 зависимость похожа на линейную, далее идёт перегиб и линейная часть кривой, в 3000 кан происходит перегиб и нелинейность.

Точка с координатами (440 кан, $-0,12$) является выбросом — единичное измерение с шумом 2b, при этом измерения до этого и после были без шума для 414

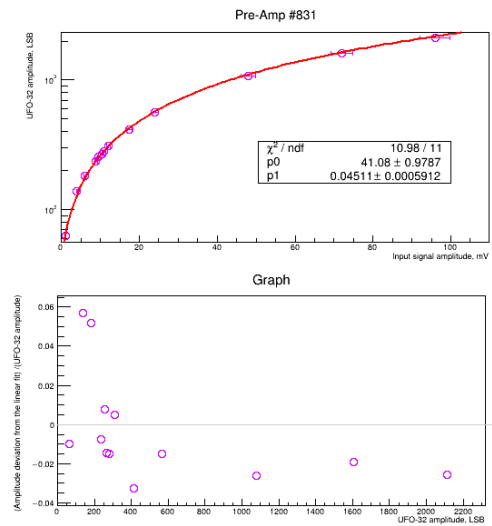
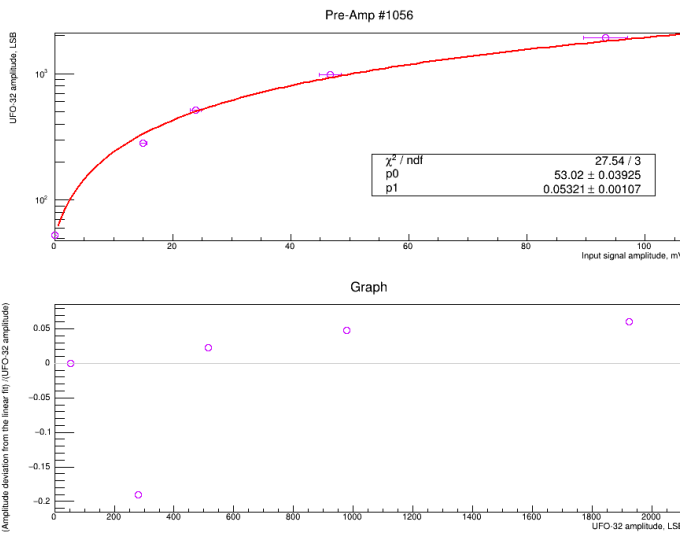


Рис. 7. Характерный график отклика ЗЧПУ на входное напряжение при грубых измерениях (верхний) и относительная ошибка в кан АЦП линейного приближения от приближающей прямой (ЗЧПУ №1056)

Рис. 8. График подробных измерений для 831 предусилителя

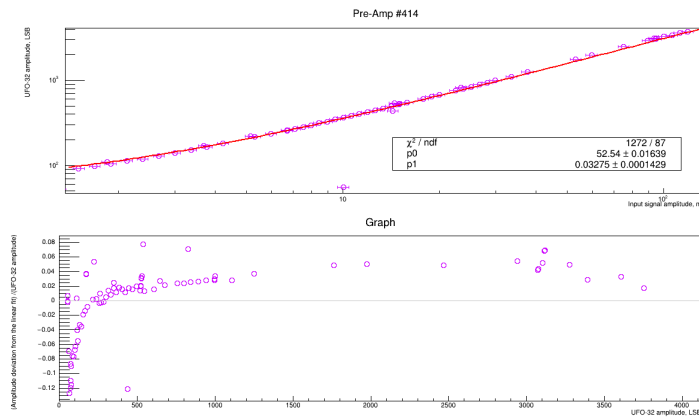


Рис. 9. График подробных измерений для 414 предусилителя

в тот день. Две точки, ближайшие к нулю — это измерения пьедестала, то есть когда входной сигнал не подавался. Пять точек над общим трендом — выбросы, связанные с неправильным сохранением файлов.

Про скопления множества точек, имеющих разную вертикальную координату при близких значениях горизонтальной (в диапазоне от 200 до 500 кан и ещё 3 точки в 1000 кан, 5 точек в 3100 кан), написано в параграфе 3.3 под номером 2b. На этих же измерениях наблюдался шум 2с (не виден на данном графике, но виден по разбросу RMS на рис. 15).

Рассчитанная в данной работе чувствительность в единицах $\mu\text{В} \cdot \text{кан}$ для разных ЗЧПУ лежит в диапазоне 31–53 (точность определения чувствительности для каждого ЗЧПУ (№356, №1056, №1188, №1197, №1200) — ± 1 , то есть $\pm 2\%$)

для грубых измерений. При этом для ЗЧПУ №414 — $32,8 \pm 0,2$ ($\pm 0,7\%$), для 831 — $45,1 \pm 0,6$ ($\pm 1,3\%$). Погрешность рассчитана программой (подробнее про погрешности — в следующем параграфе).

Воспользовавшись формулой из теории получим оценку цены деления платы УФО-32 в эл. на канал (подведённых к калибровочному входу ЗЧПУ): 190 — 330 для грубых измерений, и 210 для 414 ЗЧПУ, 280 для 831 ЗЧПУ.

Обработка данных проведена с помощью библиотеки ROOT [3] для языка программирования Python2. Оценки статистической погрешности определения параметров пика в амплитудных спектрах и погрешности определения чувствительности в единицах мВ/кан вычислены с помощью алгоритма библиотеки ROOT.

3.3 Расчёт ошибок и изучение шумов

Модели приборов (и их погрешности из спецификации):

Осциллограф АКТАКОМ АОС-5304 (погрешность измерения напряжения 3%), генератор импульсов GW Instek AFG-72125 (3% погрешность амплитуды выходного сигнала), аттенюатор Saen V859 [4] (1%). Волновое сопротивление проводов 50 Ом. Выходное сопротивление источника 50 Ом, входное осциллографа 1 МОм, аттенюатора 50 Ом.

Соответственно величина входного сигнала, поступающего на калибровочную ёмкость ЗЧПУ, имела погрешность не менее 4%.

Оценка той же погрешности с помощью разницы показаний осциллографа (V_{osc}) и величины входного сигнала (V_{att}), рассчитанной с помощью знаний выходного напряжения источника и коэффициента ослабления аттенюатора, также 4% в среднем. На рис. 10, представлено распределение отношения модуля разницы двух перечисленных величин к среднему этих величин.

Погрешность по оси кан АЦП оценена наибольшим относительным отклонением по повторным измерениям для 414 (то самое скопление множества точек, описанное в конце параграфа 3.2) в 1,5%.

Статистическая погрешность (связанная с количеством набираемых измерений для построения каждой из гистограмм амплитудного распределения) существенного вклада в ошибку определения пика не вносила, так как составила для большинства измерений менее 0,2% от величины положения пика амплитудного распределения в каналах АЦП (рис. 11). Статистическая погрешность определения RMS была не более 2%.

Точность калибровочной ёмкости оценена в 20%, так как справочной инфор-

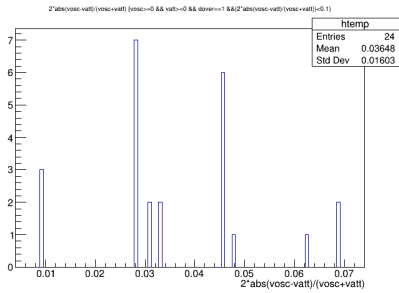


Рис. 10. Оценка относительной погрешности для величины пика

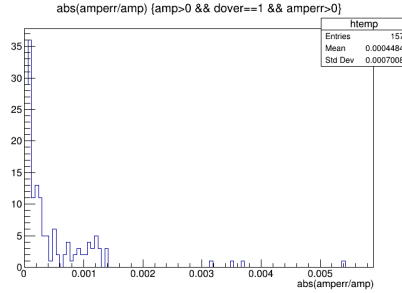


Рис. 11. Статистическая погрешность величины пика, вычисленная ROOT

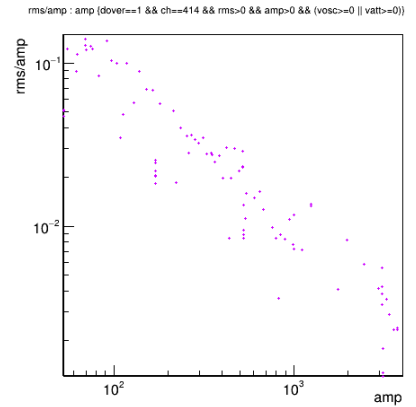


Рис. 12. Относительная величина шумов для 414 ЗЧПУ (оценка через rms)

мации не имелось. Уникальные измерения чувствительности для каждого ЗЧПУ проводились перед их установкой на калориметр, но данных про них (чтобы сравнить с полученными и, возможно, использовать уже измеренную ёмкость ЗЧПУ для определения точного значения чувствительности в единицах эл. на канал) к сожалению, не имелось. Это можно отнести к предстоящей работе. Поэтому значения цены деления кан. УФО-32 в единицах эл. на кан. — лишь оценки.

Во время эксперимента на осциллографе и в амплитудном распределении наблюдались следующие шумы (на рис. 15 представлено распределение отношения среднеквадратического отклонения к величины пика):

1. устранённые или однозначно несущественные:

- (a) Существенный сдвиг пика (порядка от -1% до $+6\%$ в зависимости от того как они скручены и куда направлены) и увеличение его ширины (примерно в два раза) из-за проводов, не подключённых к фотодиоду, но и не выпаянных. Шум связан с тем, что эти провода ловят высокочастотный шум и передают на ёмкость без уменьшения мощности (как для провода сдвига напряжения (не выпаян), который ведёт непосредственно к большим сопротивлениям);
- (b) (рис. 14) (наблюдались у ЗЧПУ №356 и на нескольких измерениях у ЗЧПУ №414 до выпайки проводов, с рис. 9) они удалены) вероятно связанные с накоплением остаточного заряда на калибровочной ёмкости (т. к. при заземлении собственным телом этот шум уходит). Он не оказывает влияния на результаты, так как запись происходит за время

порядка микросекунды с момента “падения” ступеньки, а длительность прямоугольного импульса составляет 100 мкс.

- (с) (рис. 13) Эти шумы наблюдались в момент записи данных платой УФО-32. Они, вероятно, погрешности не вносили и являются результатом работы платы и ЗЧПУ (например, может быть связано с зарядкой-разрядкой конденсаторов).

2. Не устранённые и требующие изучения:

- (а) Увеличение шумов наблюдаемых на осциллографе на порядок (с 2 до 20 мВ) — вероятно связано с плохим контактом между ЗЧПУ и стендом (иногда получалось устранить шумы) или неработоспособностью ЗЧПУ. Они наблюдались всё время (и во время измерений, и в перерывах). Для некоторых отдельных ЗЧПУ шум наблюдался по всему сигналу (то есть сломанные ЗЧПУ с слишком большими шумами: ЗЧПУ №22, №120, №589).

Для других (ЗЧПУ №356, №324, №692) наблюдался такой же шум как 1б, только уже и находящийся в “яме” (соответственно вносящий погрешность в измерения), либо говорящий, что какой-то конденсатор не разряжается в ЗЧПУ, может, из-за нарушения заземления где-то в схеме (работоспособность таких ЗЧПУ требует дальнейших измерений и осмысления причины такого шума).

- (b) (рис. 9) может быть связана с пылью, осевшей на ЗЧПУ, и изменением температуры радиотехнических элементов стенда. Обнаружена при проведении измерений в разные дни.

Вносят относительную погрешность примерно в 1,5 %.

- (с) (рис. 15 и 12) Разная ширина пика при одинаковом входном сигнале в разные дни.

Могла отличаться в 4 раза и может быть связана с пылью, осевшей на ЗЧПУ (визуально не заметной).

Как показали опыты (проведены лишь в один день), шумы, которые гасила экранировка (железный ящик, в который помещался ЗЧПУ) вносили существенный вклад (порядка 15 %) в ширину амплитудного распределения, но незначительно (0,2 %) изменяли величину пика.

Про шумы для ЗЧПУ №414 и про величину погрешности определения чувствительности написано на в параграфе 3.1.

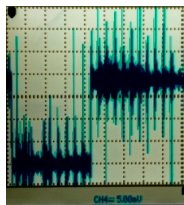


Рис. 13. Шумы 2а

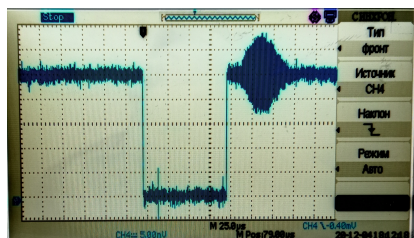


Рис. 14. Шумы 1б

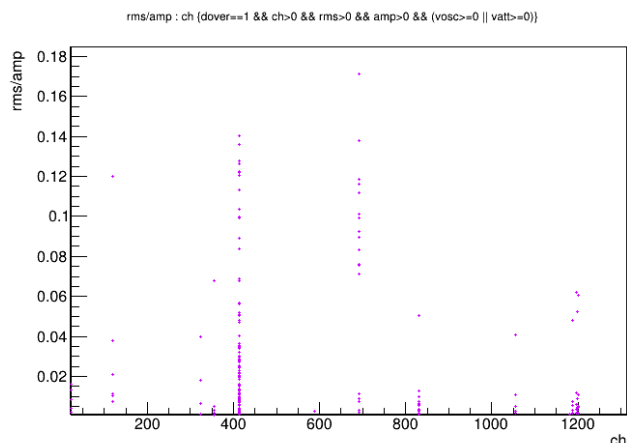


Рис. 15. Относительные шумы (по вертикали) для разных ЗЧПУ (по горизонтали номер)

В итоге: 1 ЗЧПУ (№414) можно считать однозначно рабочим. Для остальных требуется дополнительные измерения и анализ:

1 ЗЧПУ (№831) — требуется разобраться с тем, почему нет тренда на нижнем графике рис. 8, но при этом отклонения от линейности у него приемлемые и ниже 6 %;

5 ЗЧПУ (№356, №1056, №1188, №1197, №1200) требуют проверки не является ли одна из точек выбросом (точка около 300 кан) и если это выбросы, то эти предусилители имеют приемлемое отклонение от линейности меньше 5 %, если это не выбросы, то ЗЧПУ неработоспособны из-за высокой погрешности. Хотя для всех, кроме 356, никаких шумов на осциллографе не наблюдалось;

2 ЗЧПУ (№324, №1199) имеют неприемлемые отклонения от линейности не менее 10 %, но необходима проверка измерений на наличие выбросов; 4 ЗЧПУ (№22, №120, №589, №692) требуют проверки всех измерений на наличие выбросов. Хотя среди всех ЗЧПУ относительные шумы (rms/кан АЦП) недопустимые лишь для 692, вероятно он сломан (для 414 шумы более 10 % — вблизи пика, рис. 12, почему так — написано в параграфе 3.2). При этом для всех, кроме 1199, наблюдались повышенные шумы на осциллографе. У 1199 не наблюдалось никаких шумов.

4 Заключение

В результате проделанной работы подготовлен измерительный стенд для проверки работоспособности и определения основных характеристик ЗЧПУ. Исследованы 12 ЗЧПУ, из которых лишь 1 оказался однозначно работоспособным. Измерены

характеристики в диапазоне напряжений до 140 мВ (соответствует полному диапазону измеряемых калориметром энергий). Они равны: чувствительность 210 для ЗЧПУ№414, 280 для ЗЧПУ№831, в диапазоне 190-330 для 5 ЗЧПУ (№356, №1056, №1188, №1197, №1200). Числа согласуются с величиной, приведённой в работе [1] — 240 эл./канал.

Величина шумов для данного стенда в среднем 2 % (6,7 кан); линейность отклика в диапазоне входного сигнала от 10 до 100 мВ ; нелинейность в диапазонах до 10 мВ и выше 100 мВ . Данные согласуются с представленными в работах [1] и [2].

В дальнейшем планируется: переход на аттенюатор с цифровым управлением, для ускорения процесса набора данных и уменьшения количества отбракованных измерений; создание процедуры измерения калибровочной ёмкости ЗЧПУ; проверка большого количества снятых с установки ЗЧПУ; модификация процедуры подготовки предусилителей и изучение причин выхода из строя, например, с помощью проверки напряжений в определённых точках (см. Приложение А), что не было сделано в данной работе.

5 Благодарности

Приношу слова благодарности Сикачу Богдану Игоревичу за подготовку программы для расшифровки бинарных файлов. Выражаю свою признательность Винникову Дмитрию Сергеевичу за помощь в понимании схемы предусилителя и причин шумов.

6 Список литературы

Список литературы

- [1] В. М. Аульченко, А. Е. Бондарь, Л. В. Днепровский и др. “Электромагнитный калориметр на основе сцинтилляционных кристаллов CsI для детектора КМД-3”. в: *Препринт ИЯФ* (2008) (цит. на с. 4, 5, 14).
- [2] А. Л. Ерофеев. “Проблемы измерительного тракта CsI-калориметра и модернизация плат УФО-32”. в: *Меморандум КМД-3* (2015) (цит. на с. 4, 5, 14).
- [3] Rene Brun, Fons Rademakers, Philippe Canal и др. *root-project/root: v6.18/02*. вер. v6-18-02. авг. 2019. DOI: 10.5281/zenodo.3895860. URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3895860> (цит. на с. 10).
- [4] *CAEN V859 Dual attenuator*. <https://www.caen.it/products/v859/>. Был доступен: 2020-12-23 (цит. на с. 10).

Приложение

Приложение А Принципиальная схема предусилителя

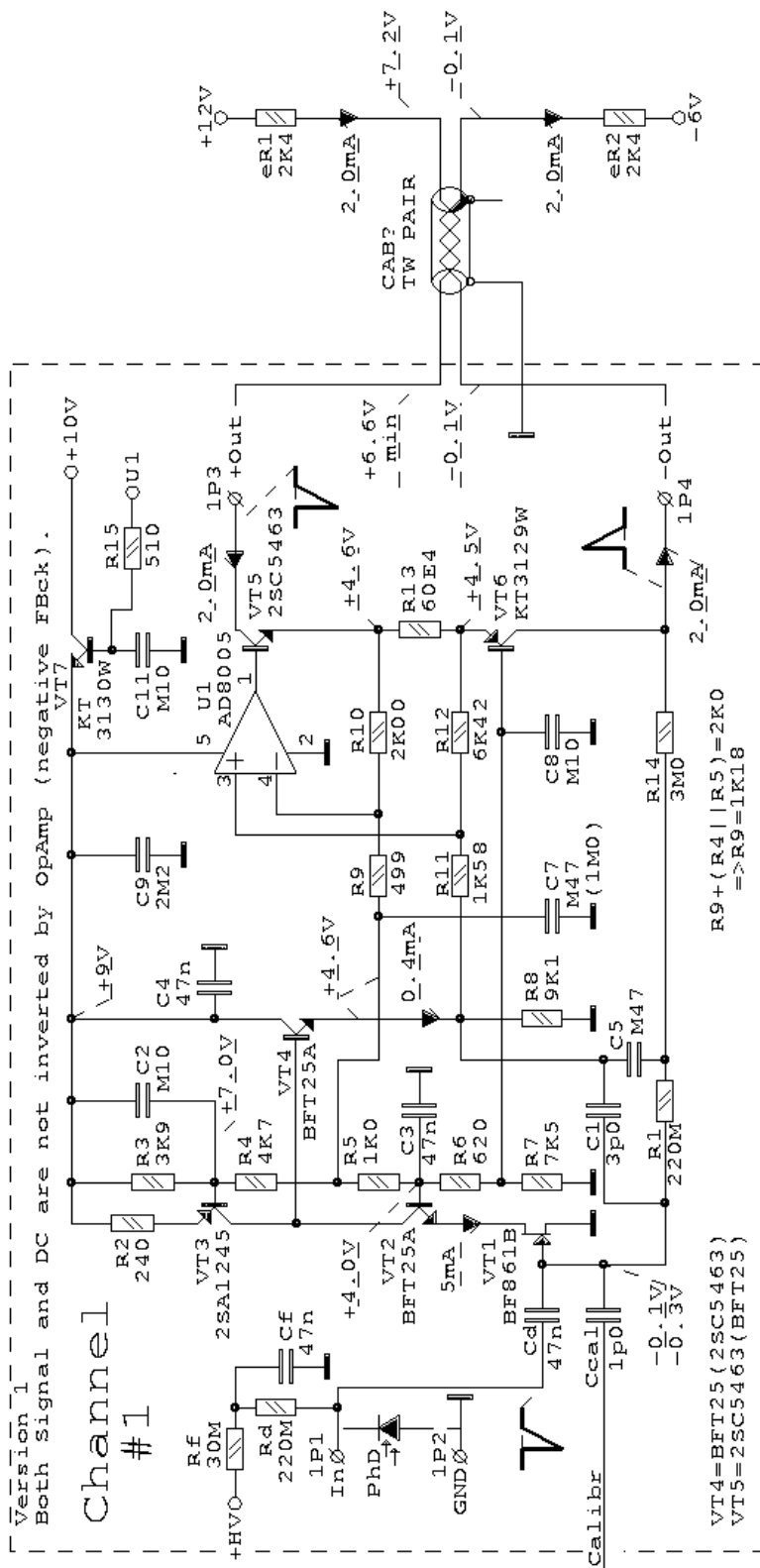


Рис. 16. Принципиальная схема предусилителя