

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ» (НИЯУ
МИФИ)»

УДК 539.1

ОТЧЁТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

УПРАВЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЕМ НА SIRM ПРИ
ПОМОЩИ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА ATMEGA328P

Научный руководитель
старший преподаватель
научный сотрудник
НИЦ «Курчатовский институт»

_____ Ф. А. Дубинин

Студент

_____ А. Д. Конотоп

Москва 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
1 Позитронно-эмиссионный томограф для животных	5
1.1 Принципы работы ПЭТ	5
1.2 Сцинтилляционные детекторы	6
1.2.1 Сцинтилляционные материалы	7
1.2.2 Фотоумножители	8
1.3 Плата Petiros 2A	12
1.4 Макет 32-канального ПЭТ	13
1.5 Характеристики макета 32-канального ПЭТ	14
2 Подстройка напряжений на каналах	17
2.1 Подстройка напряжений на базе операционного усилителя	18
2.2 Модификация подстройки напряжений на базе операционного усилителя	19
2.2.1 Цифровое управление. ATmega328P	20
2.2.2 Цифровое управление. Подбор ЦАП	21
2.2.3 Цифровое управление. Программное обеспечение	23
2.2.4 Цифровое управление. Механизм обратной связи	25
2.3 Описание установки	27
2.4 Пути улучшения	31
Список литературы	34

ВВЕДЕНИЕ

Одной из передовых технологий по исследованию функциональных особенностей и структур тканей организма является позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ), хорошо зарекомендовавшая себя в области диагностики злокачественных новообразований. [1]. При проведении ПЭТ-исследования, в организм вводится специальный радиофармпрепарат, содержащий изотопы, распадающиеся с испусканием позитронов, который поглощается раковыми клетками и служит маркером при сканировании. Пролетев небольшое расстояние, родившиеся позитроны аннигилируют с электронами тканей, в результате чего рождаются два γ -кванта, разлетающиеся на угол, близкий к 180° . Излучение регистрируется при помощи кольца из детекторов, расположенных вокруг источника, на основании отклика которых формируется визуальная модель, отражающая местоположение опухоли [2].

В настоящее время рынок ПЭТ в основном представлен зарубежными решениями от крупных производителей медицинского оборудования: Philips, Siemens, General Electric Healthcare и другие. В основе таких установок лежат сборки из неорганического сцинтилляционного кристалла (обычно применяются кристаллы BGO (германат висмута) или LSO (силикат Лютеция)) и фотоэлектронного умножителя (ФЭУ). Также ПЭТ дополняется установкой для МРТ/КТ, что позволяет сопоставить информацию о местоположении злокачественного образования с его положением внутри организма. Подобная интеграция значительно усложняет процесс разработки, что связано с усложнением общей компоновки конструкции, а также с высокой чувствительностью ФЭУ к внешнему электромагнитному полю и влиянию на корректную работу детектора в случае применения МРТ.

В лаборатории детекторов ядерной медицины, организованной на базе лаборатории физики редких процессов института имени Курчатова и кафедры физики элементарных частиц и космологии, ведётся разработка макета позитронно-эмиссионного томографа для животных. По результатам работы в рамках бака-

лавриата представлена система подстройки напряжений вручную на базе дифференциального каскада. В данной работе продолжается развитие данного решения до системы подстройки напряжений на базе цифро-аналогового преобразователя при помощи микроконтроллера ATmega328P.

1 ПОЗИТРОННО-ЭМИССИОННЫЙ ТОМОГРАФ ДЛЯ ЖИВОТНЫХ

1.1 ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ ПЭТ

Позитронно-эмиссионная томография — это метод исследования, который позволяет изучать структуру и функциональные особенности тканей организма. ПЭТ считается эффективным инструментом для диагностики злокачественных новообразований.

В ходе ПЭТ-исследования в организм пациента вводят специальный радиофармпрепарат (РФП). В онкологии чаще всего используется фтордезоксиглюкоза (ФДГ) [3].

ФДГ является аналогом глюкозы, которая играет ключевую роль в обмене веществ, участвуя в качестве источника энергии для клеток организма. Раковые клетки поглощают ФДГ быстрее, чем здоровые, что приводит к увеличению концентрации препарата в опухоли по сравнению с окружающими тканями. Это делает ФДГ эффективным маркером для обнаружения опухолей при сканировании.

В составе ФДГ используется изотоп фтор-18, который характеризуется длительным периодом полураспада (109.8 минуты) и низкой энергией излучения. Это обеспечивает высокое качество изображений с хорошим пространственным разрешением. Кроме того, благодаря длительному периоду полураспада, препарат можно транспортировать из места хранения до места проведения сканирования.

Однако фтор-18 имеет недостаток, который заключается в его способности накапливаться в тканях мозга и почек. Это может привести к ложному обнаружению патологий в этих органах даже при отсутствии заболеваний.[1].

Радиоактивная метка подвергается β^+ -распаду, в результате которого родившиеся позитроны, пролетев небольшое расстояние (в среднем 3-4 мм [4]), ан-

нигилируют с электронами тканей, в результате чего рождаются два γ -кванта, разлетающиеся на угол, близкий к 180° . Отклонение от коллинеарности в среднем составляет около 0.23° , что при 80-см диаметре кольца приводит к потере в разрешении около 1.7 мм [5]. Энергия аннигиляционных γ -квантов составляет 511 кэВ. Частицы регистрируются при помощи расположенных вокруг источника излучения детекторов, на основании отклика которых строится визуализация, отражающая местоположение опухоли в организме, её размеры и форму.

Таким образом, детекторы ПЭТ для человека должны удовлетворять следующему набору характеристик[1]:

- 1) эффективность регистрации отдельного γ -кванта с энергией 511 кэВ – не ниже 80%;
- 2) пространственное разрешение – несколько миллиметров;
- 3) высокое временное разрешение, порядка нескольких наносекунд;
- 4) энергетическое разрешение < 100 кэВ ПППВ при энергии 511 кэВ для отсеивания событий комптон-эффекта;
- 5) возможность работы при нагрузках до $10^5 - 10^6 \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^2$ временного окна.

1.2 СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЕ ДЕТЕКТОРЫ

Одним из элементов большинства установок по изучению частиц являются детекторы. Существует огромный спектр подобных приборов, разработанных под определённые задачи: искровые камеры для изучения треков частиц, счётчик Гейгера для подсчёта количества частиц, масс-спектрографы для изучения состава веществ.

Сцинтилляционные детекторы находят широкое применение для регистрации частиц и, в частности, γ -квантов. Их популярность обусловлена высокой эффективностью и слабой зависимостью от энергии гамма-квантов в различных энергетических диапазонах. Принцип работы таких детекторов основан на преобразовании ионизирующего излучения в видимый свет при помощи сцинтилляционного материала. Световой сигнал улавливается фотоумножителем, преобразует его в электронный и усиливает, регистрируя его.

1.2.1 СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Сцинтилляционные вещества, как было сказано, реагируют на проходящие через них потоки частиц, излучая некоторое количество фотонов пропорциональное энергии пролетающей частицы. Благодаря чему появляется возможность получать энергетические спектры различных источников ионизирующих излучений. Существует большое количество сцинтилляционных материалов: пластиковые сцинтилляторы, характеризующиеся малым временем высвечивания, газовые сцинтилляторы из азота и благородных газов, имеющие ещё более короткое время высвечивания. Особое место занимают неорганические сцинтилляционные кристаллы, для которых характерен высокий световыход и достаточное энергетическое разрешение, что позволяет говорить о энергетических характеристиках исследуемых частиц и, соответственно, разделять их по энергиям. В таблицах 1.1 и 1.2 приведены интересующие нас характеристики некоторых сцинтилляционных материалов.

Таблица 1.1 — Характеристики сцинтилляторов [6] *среднее значение

Сцинтиллятор	плотность $\frac{\Gamma}{\text{см}^2}$	Время высвечивания, нс	Световыход, $\frac{\Phi}{\text{кэВ}}$
Полистирол	1.05	5	0.1
GAGG(Ce)	6.63	87(90%)255(10%)	56*
LYSO(Ce)	7.2	40	32
BGO	7.13	300	10

В качестве сцинтиллятора применяется сцинтилляционный кристалл GAGG(Ce) ($Gd_3Al_2Ga_3O_{12}(Ce)$, **гадолиний-алюминий-галлиевый гранат, активированный ионами церия**), произведённый компанией OST Photonics. Материал обладает привлекательными для гамма-спектрометров характеристиками, что вызывает высокий интерес к его изучению, высокая плотность, так как при увеличении этого параметра кристалла кванты эффективнее теряют энергию в материале в силу зависимости этих величин, позволяя детектировать кванты высоких энергий, высоким зарядовым числом, влияющим на сечение взаимодействия фотоэффекта ($\sigma_{ph} \sim Z_{eff}^5$), сравнительно небольшим временем высвечивания, достаточно высоким световыходом (~ 56000 ф/МэВ, $T = 293K$), что позволяет более точно измерять энергию падающих на него γ -

квантов при подходящих нам значениях энергетического разрешения ($\sim 9\%$), а также отсутствие гигроскопичности и собственного излучения.

Как видно из таблицы 1.2, в сравнении с традиционными сцинтилляторами, такими как NaI(Tl), CsI(Tl), BGO, или более современным его прямым конкурентом в лице LYSO(Ce), выбранный нами кристалл не только не хуже, но и превосходит аналоги по многим параметрам. Кроме того, GAGG(Ce), как более новый среди остальных, является интересным с точки зрения изучения его характеристик. Отдельно хочется отметить, что технология выращивания не является патентной, что позволяет свободно в полной мере производить и закупать данные кристаллы повсеместно, но вносит свои особенности в разброс характеристик (например, сильный разброс величины световыхода от производителя к производителю).

Как итог, GAGG(Ce) можем считать хорошей альтернативой кристаллов LYSO(Ce), чаще всего использующийся в сцинтилляционных детекторах для задач медицинской физики. GAGG представляет исследовательский интерес его применимости совместно с кремниевыми фотоумножителями, принцип действия которых отписывается далее, так как это относительно новый материал. В частности, поскольку GAGG имеет относительно высокую плотность, он может быть привлекательным вариантом для тех применений обнаружения γ -излучения, где эффективность детектирования является критическим фактором, как, например, ПЭТ, объединенная с магнитно-резонансным томографом (ПЭТ/МРТ). Сейчас продолжаются исследования, которые показали, что в связи с активацией его на свету и последующим продолжительным высвечиванием есть необходимость предварительного выдерживания его в темноте для достижения наилучшего разрешения детектора.

1.2.2 ФОТОУМНОЖИТЕЛИ

Вышедших из сцинтиллятора фотонов достаточно мало чтобы обрабатывать напрямую сигнал с какого-либо фотоприёмника. Для устранения этого недостатка применяются особые фотоприёмники, содержащие в своей конструкции преобразователи попадающих на них фотонов в электроны с последующим умножением числа частиц. Одним из подобных устройств являются фотоэлектронные умножители, представленный на рисунке 1.1.

Таблица 1.2 — Сравнительные характеристики распространенных сцинтилляционных кристаллов. [7—10]

	CsI(Tl)	LYSO(Ce)	BGO	NaI(Tl)	GAGG(Ce)
Плотность (г/см ²)	4,51	7,2	7,13	3,67	6,63
Эффективный Z_{eff} (атомный) номер	54	65	73	50	54,4
Длина вол- ны тах высвечива- ния (нм)	550	420	480	415	520
Время вы- свечивания (нс)	1050	40	300	230	87(90%)255(10%)
Световыход (фото- ны/кэВ)	54	32	10	38	40-45
Гигроско- пичность	ДА	НЕТ	НЕТ	ДА	НЕТ
Собственная радиоактив- ность	НЕТ	ДА	НЕТ	НЕТ	НЕТ

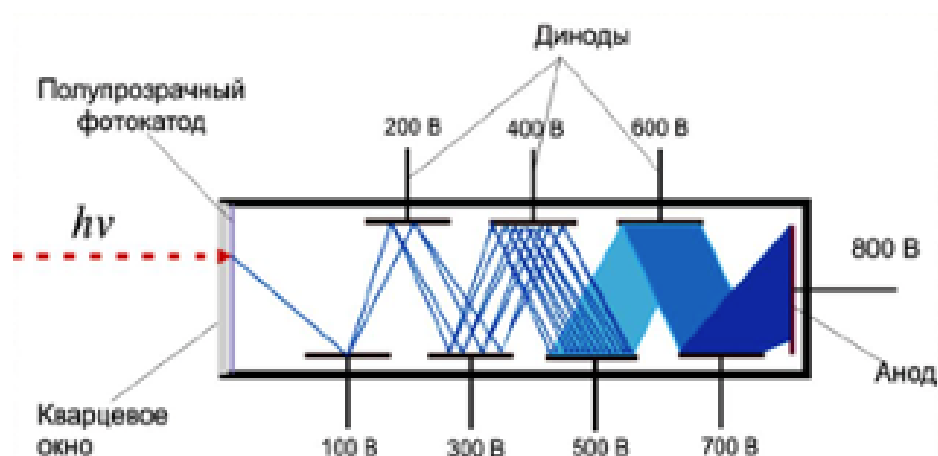


Рисунок 1.1 — Схема ФЭУ

Фотон проходит через кварцевое окно и, попадая на полупрозрачный фотокатод, рождает фотоэлектрон, который в свою очередь падает на динод, выбивая несколько вторичных фотоэлектронов, которые летят к следующему диноду и далее, пока волна фотоэлектронов в сотни тысяч раз большая, чем одна

частица, не достигнет анода. Такие фотоприёмники являются достаточно громоздкими, требуют сложных в изготовлении источников питания, восприимчивы к внешним магнитным полям, что усложняет их использование в паре с МРТ, а также являются достаточно хрупкими, из-за чего требуют в эксплуатации особой осторожности.

Решением в области детектирования слабых излучений являются кремниевые фотоумножители (SiPM), представленные ниже на рисунке 1.2.

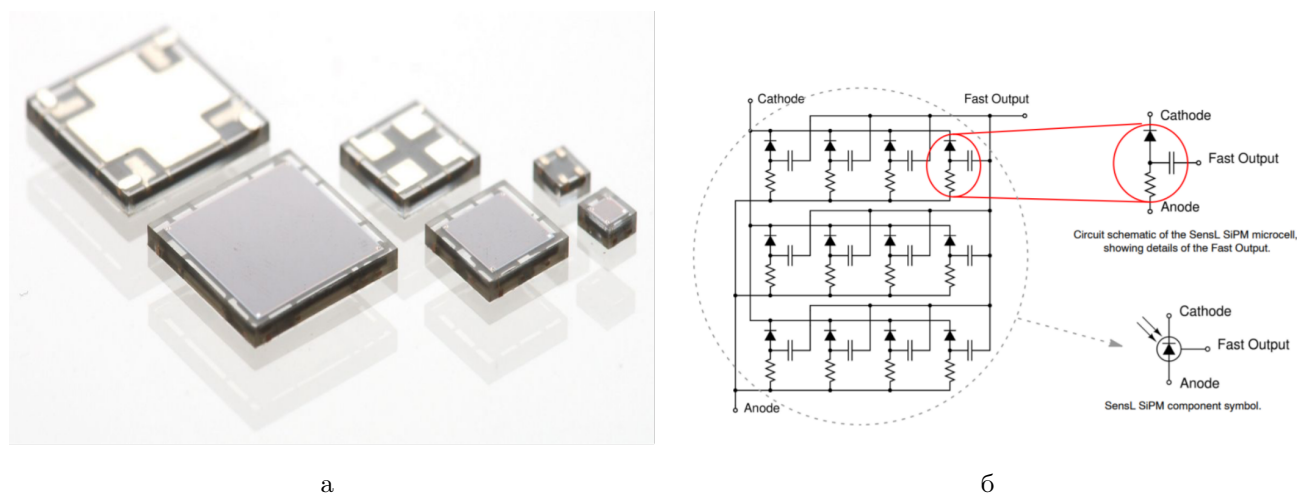


Рисунок 1.2 — Кремниевый фотоумножитель от компании Onsemi (а) и принципиальная схема кремниевого фотоумножителя (б)

Данный фотоприёмник представляет из себя матрицу полупроводниковых лавинных фотодиодов (ЛФД, SPAD), работающих в гейгеровском режиме. Пример принципиальной схемы SiPM представлен на рисунке 2, у разных производителей схемы могут отличаться. В схеме резистивный элемент нужен для пассивного гашения лавины. За счёт своих малых габаритов и высокого коэффициента усиления (порядка 10^6) SiPM не только приходит на замену ФЭУ во многих задачах, но и выходит за пределы применимости этого типа фотоприёмников в области компактности и устойчивости к внешним магнитным полям и используется для детектирования различных слабых сигналов. [11]

В нашей установке применяются кремниевые фотоумножители (SiPM) Onsemi FC30035.

Данные фотоумножители отличаются от своих конкурентов достаточно низким рабочим напряжением питания (30 В), а также высоким значением эффективности регистрации фотонов (PDE) и малым разбросом напряжения пробоя. Эта линейка датчиков обладает высоким коэффициентом усиления [12],

Размер сенсора	Размер ячейки	Параметр	Тип.
3мм	35μ	Напряжение открытия (V_{br} , В)	24.2 - 24.7
		Пик длины волны (λ_p), нм	420
		PDE, %	31($V_{br} + 2.5$)В
		Усиление	3×10^6
		Темновой счёт, кГц	300 - 860

Таблица 1.3 — Характеристики кремниевого умножителя Onsemi FC30035

чувствительных в однофотонном режиме от ультрафиолетового до инфракрасного диапазона при значении длины волны 420 нм.

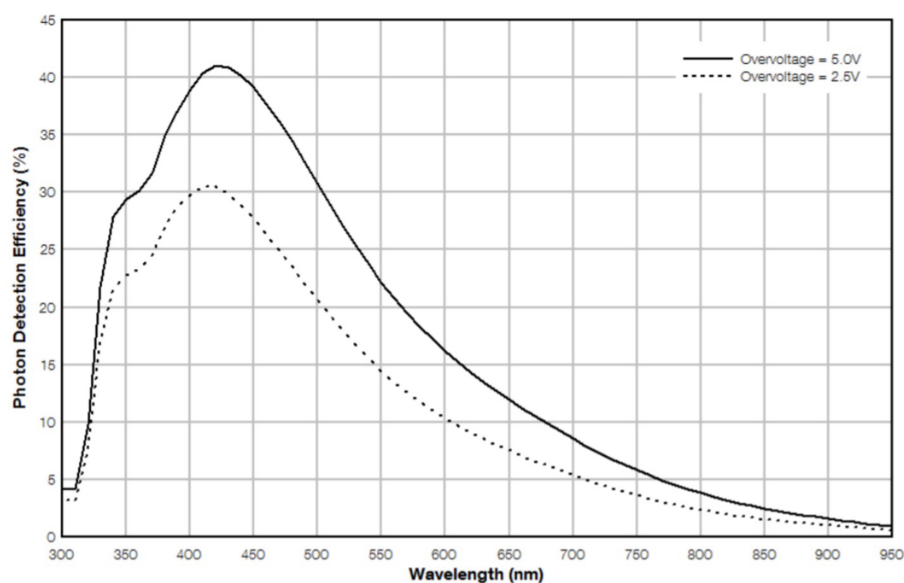


Рисунок 1.3 — Зависимость PDE от длины волны при разных значениях перенапряжения

На рисунке 1.3 представлена зависимость PDE от длины волны регистрируемого излучения для различных значений напряжения смещения. Данный параметр является отражением чувствительности кремниевого фотоумножителя, или отношением числа частиц, зарегистрированных за время измерения к числу частиц, попавших в детектор за тоже время. Определяется как:

$$PDE(\lambda, T, U) = Q_E(\lambda, T) \mathcal{E}_g P_G(\lambda, T, U) \quad (1.1)$$

где $Q_E(\lambda)$ – квантовая эффективность чувствительной площади фотодетектора, λ – длина волны регистрируемого излучения, $\mathcal{E}_g$ – геометрическая эффективность, равная отношению чувствительной площади, к полной площади кремниевого фотоумножителя, $P_G(\lambda, T, U)$ – вероятность того, что образовавшийся фотоэлектрон вызовет пробой, значение которой возрастает с увеличением перенапряжения U , зависящего от температуры T .

Для каждого датчика собрана схема подключения на индивидуальной плате, питание которой осуществляется от единого источника. Для дальнейшей калибровки SiPM были определены рабочие точки, которые представляют собой оптимальное значение напряжения смещения, при котором достигается наилучшее энергетическое разрешение детектора. Этот параметр зависит от коэффициента усиления, растущего при увеличении напряжения, и PDE.

Производитель в технической документации указывает среднее значение напряжения пробоя, однако существует необходимость тестировать каждый отдельно, так как, на практике, у разных SiPM одной серии они могут значительно отличаться.

1.3 ПЛАТА PETIROC 2A

За основу установки взята тестовая плата на базе интегральной схемы специального назначения (*ASIC*) **Petiroc 2A**, разработанная компанией Weegos. Данная интегральная микросхема создавалась специально для считывания данных с SiPM), в том числе измерение времени срабатывания детекторов с последующим анализом и обработкой в соответствующем ПО.

Чип обладает набором из 32-х биполярных каналов, к которым можно подключить как одиночные SiPM, так и целые матрицы. Основная концепция данной микросхемы – комбинирование двух измерений (времени регистрации сигнала и его амплитуды) независимым образом. Временной триггер срабатывает по переднему фронту сигнала (начало сцинтилляционной вспышки), амплитудное значение достигается, когда большая часть фотонов вспышки собрана на SiPM, а за амплитуду – величина засвета всего сцинтилляционного кристалла.

Сигнал с фотоумножителя поступает на плату и разделяется на два: вре-

менную и зарядовую ветвь. Первичный отбор производится на основе срабатывания триггера временного канала, также могут быть применены отборы на основе триггера зарядового канала и на основе совпадений.

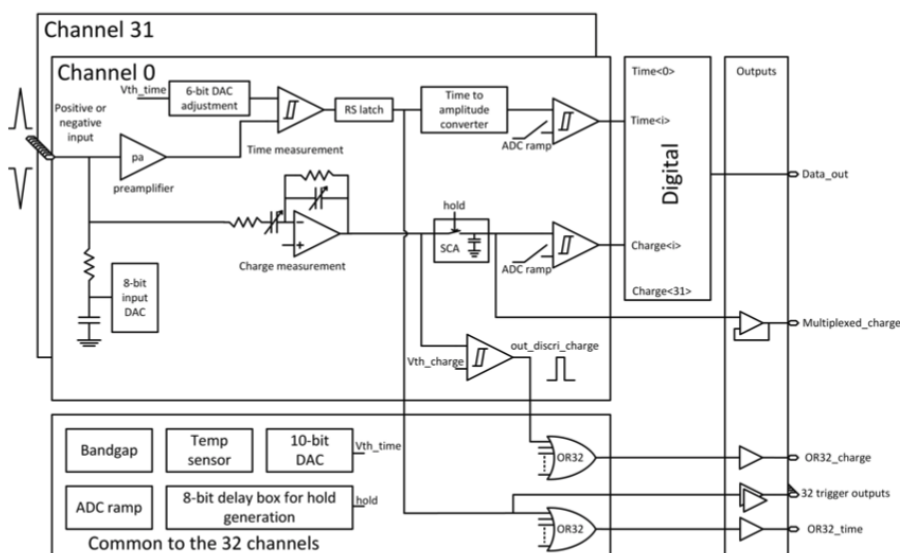


Рисунок 1.4 — Принципиальная схема тестовой платы Petiros 2A

Пришедший сигнал, предварительно усиленный на предусилителе, оцифровывается с помощью аналогово-цифрового преобразователя, а полученные величины передаются в ячейки памяти (по четыре ячейки на событие для каждого канала), которые затем силами как прилагаемого программного обеспечения, так и при помощи стороннего, можно проанализировать и получить необходимые результаты.

1.4 МАКЕТ 32-КАНАЛЬНОГО ПЭТ

Макет 32-канального ПЭТ (позитронно-эмиссионный томограф) представляет собой установку, разработанную лабораторией детекторов ядерной медицины НИЯУ «МИФИ» и НИЦ «Курчатовский институт». Сцинтилляционные детекторы размещаются в специальных канавках, сделанных внутри поликарбонатного кольца, что придаёт установке прочность и избавляет от нежелательных смещений. Внешний радиус кольца составляет 160 мм, внутренний –

90 мм, толщина – 10 мм. Всего размещено 32 детектора, что связано с ограничениями электроники – анализатор не рассчитан на большее число каналов. Сбор сигнала осуществляется через шлейф, присоединенный на входные pin-контакты платы. Установка в сборе представлена на рисунке 1.5.

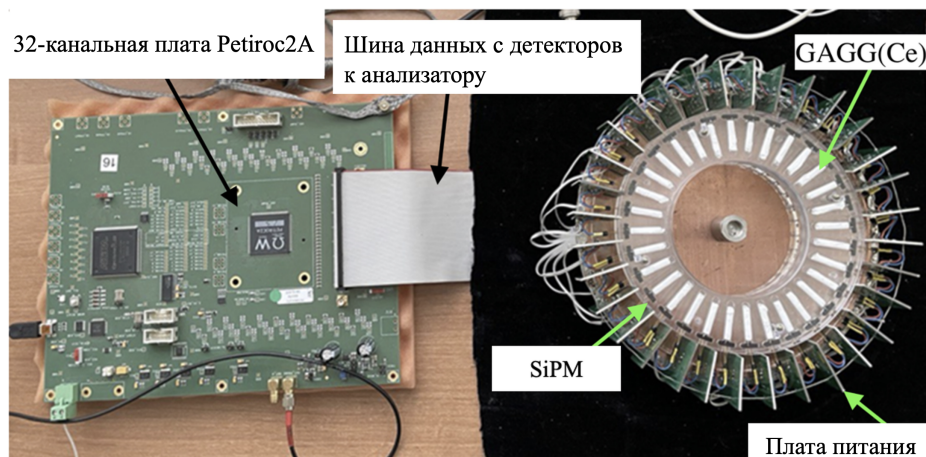


Рисунок 1.5 — Внешний вид макета 32-канального ПЭТ

1.5 ХАРАКТЕРИСТИКИ МАКЕТА 32-КАНАЛЬНОГО ПЭТ

Ранее собранный макет 32-канального ПЭТ проходил проверку на различных источниках, благодаря чему удалось изучить ряд его характеристик. Для данных исследований была подготовлена отдельная установка, представляющая собой чёрный ящик, внутри которого располагается детекторная сборка и необходимая для работы с ней электроника [13], были измерены характеристики откликов каналов, такие как положения пика, а также энергетическое разрешение для различных комбинаций SiPM и сцинтиллятора, дополнительно получены данные по энергетическому разрешению для одиночного детектора. Так, для пика в области 662 кэВ, изображённого на рисунке 1.6, источника ^{137}Cs , составило $\sim 8\%$, что позволяет различать его с приемлемой точностью.



Рисунок 1.6 — Спектр источника ^{137}Cs , полученный на установке для тестирования кремниевых фотоумножителей и сцинтилляционных кристаллов

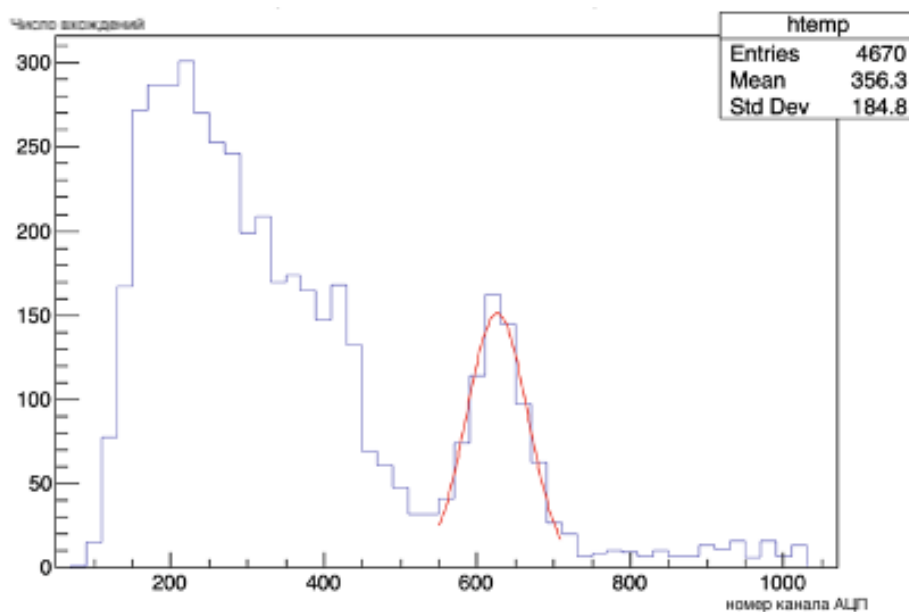


Рисунок 1.7 — Спектр источника ^{44}Ti , полученный на одном канале макета 32-детекторного ПЭТ

В качестве второго источника для изучения характеристик установки был выбран ^{44}Ti за счёт своей моды низкоэнергетического β^+ -распада, что позволяет использовать его в качестве эталона для восстановления изображения с макета 32-канального ПЭТ. Источник размещался в центре установки и для каждой противоположной пары детекторов производился поиск совпадений в заданном временном окне. Для данного изотопа получено энергетическое разрешение 14% для пика 511 кэВ (рисунок 1.7), а временное разрешение составило порядка 1.8 нс. О результатах данных исследований было доложено в рамках

международной конференции AYSS, прошедшей в ОИЯИ в Дубне, информация по докладу изложена в статье [14].

2 ПОДСТРОЙКА НАПРЯЖЕНИЙ НА КАНАЛАХ

В рамках работы, проделанной в прошлом семестре, была предложена модифицированная система подстройки напряжений при помощи схемы на базе операционного усилителя, представленная на рисунке 2.1.

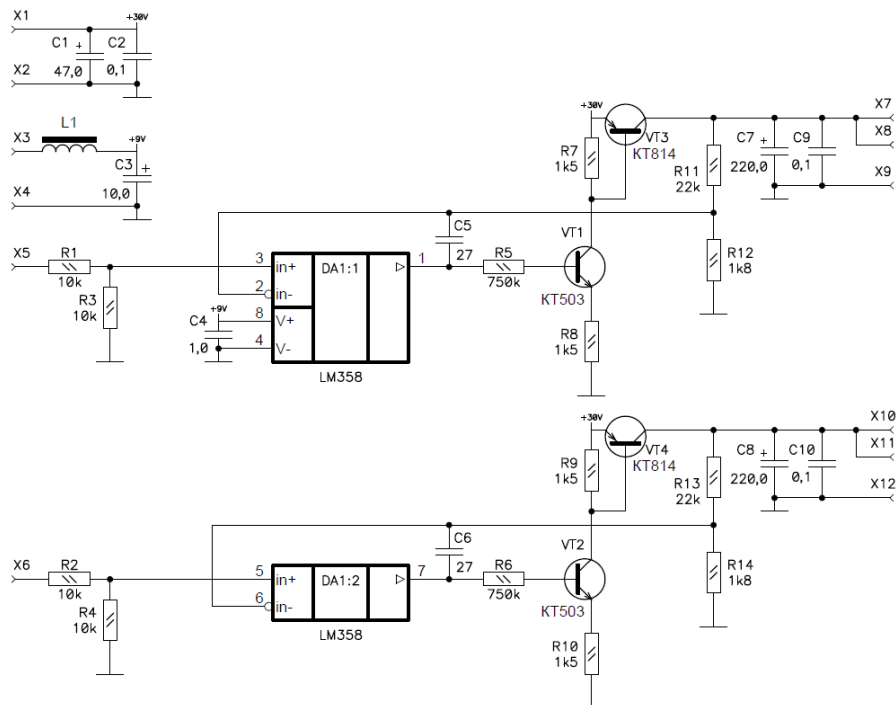


Рисунок 2.1 — Модифицированная схема подстройки напряжения на базе операционного усилителя

Она представляет собой модификацию схемы на базе дифференциального каскада, в которой пара транзисторов заменена на операционный усилитель LM358 от Texas Instruments, что позволяет сократить число дополнительных компонентов, удешевляя производство, а также избавиться от двухполярного питания, при этом значительно упрощая схемотехнику и уходя от дополнительных источников питания.

Однако электронная база такого решения всё ещё занимает много места в связи с применением крупных устаревших компонентов, большинство из ко-

торых в данных исполнениях уже не производятся. В данном семестре было решено пересмотреть текущую электронную базу в пользу более современного, компактного и дешевого решения, а также внести соответствующие правки в используемое программное обеспечение как для железа, так и для прикладной части.

2.1 ПОДСТРОЙКА НАПРЯЖЕНИЙ НА БАЗЕ ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ

В прошлом семестре мы уже испытывали альтернативную конструкцию платы для подстройки напряжений, исключая большинство электронных компонентов (рис. 2.2).

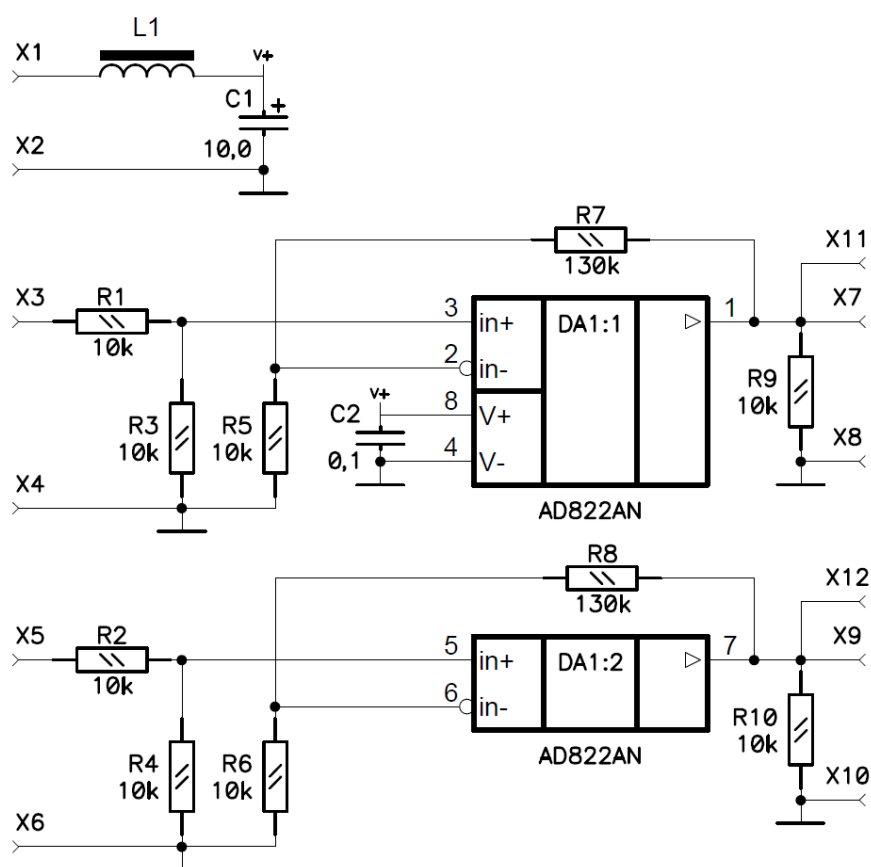


Рисунок 2.2 — Принципиальная схема для подстройки напряжений на базе операционного усилителя

такая схема предполагает полный отказ от части электронных компонентов (например, управляющих транзисторов) за счёт осуществления всего процесса подстройки при помощи операционного усилителя. На питание подаётся

напряжение с источника напряжения, выходным значением которого и планируется управлять. На неинвертирующий вход операционного усилителя подаётся управляющее напряжение в диапазоне 0..5В. На инвертирующий вход заведена обратная связь, обеспечивающая коэффициент усиления $k = \frac{R_7}{R_5} + 1 = 14$. Подбор такого значения коэффициента усиления обеспечивает подстройку напряжения «с запасом», что исключает возможные краевые эффекты при работе с электроникой. Задача состоит в обеспечении регулирования выходным напряжением в требуемом диапазоне 0..30В.

В настоящий момент лаборатория для работы располагает источником питания с максимальным выходным напряжением, равным 31.5В, что достаточно близко подходит к рабочему диапазону работы. В случае операционного усилителя напряжение на выходе будет не совпадать с напряжением питания, отличаясь на несколько вольт. Такие потери будут критичны для нашего рабочего диапазона, в связи с чем необходимо применять для такой конфигурации отдельный класс операционных усилителей "Rail-to-Rail" имеющих малую разницу между напряжением питания и максимальным выходным напряжением (на уровне нескольких десятков милливольт).

В результате испытаний данного решения мы не добились ожидаемого результата: подобранный нами операционный усилитель оказался очень неудачным. AD822 не способен корректно работать в режиме однополярного питания, а также при достижении максимального выходного напряжения входит в возбуждения, внося в цепь питания нежелательные колебания с частотой $f \sim 1\text{кГц}$.

2.2 МОДИФИКАЦИЯ ПОДСТРОЙКИ НАПРЯЖЕНИЙ НА БАЗЕ ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ

Не смотря на неудачу, решение на базе одного операционного усилителя остаётся наиболее целесообразным для нашей задачи. Посоветовавшись с коллегами, была найдена альтернатива выбранному решению также от компании Texas Instruments, операционный усилитель "Rail-to-Rail" с диапазоном напряжений питания 4.5..40В, а также малым температурным дрейфом ($\pm 1.5\mu\text{В}/^\circ\text{C}$). Микросхема распространяется в планарном виде, что приводит нас к переводу

на планар и большинство других компонентов. Подобный переход способствует резкому уменьшению площади, занимаемой электроникой, а также значительному уплотнению монтажа. В связи с данными результатами для тестирования выбранной электроники было принято решение спроектировать и изготовить единую тестовую плату, расположив на ней все модули вместе. Помимо вышеописанных модификаций мы продолжаем поддержку цифрового управления и его дальнейшего масштабирования.

В результате разработки был создан универсальный блок подстройки напряжений, масштабируемый на 8 каналов (рис. 2.3).

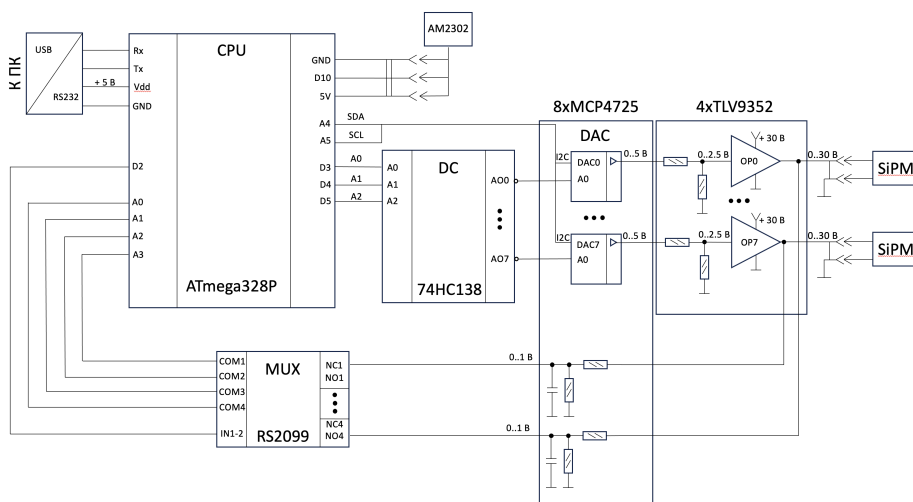


Рисунок 2.3 — Схема универсального блока подстройки напряжений на 8 каналов

2.2.1 ЦИФРОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ. АТМЕГА328Р

В качестве микроконтроллера, осуществляющего управление электроникой была выбрана микросхема ATmega328P 2.4.

Это достаточно распространённый 8-битный RISC-процессор, работающий на частоте 16 МГц. Данный микроконтроллер поддерживает различные интерфейсы для общения с внешними устройствами, такие как I2C (TWI) и RS-232, что позволяет нам выбрать необходимые электронные компоненты из достаточно обширного списка кандидатов, используя при этом возможности самого процессора для управления. В то же время наличие встроенного 10-разрядного аналого-цифрового преобразователя (АЦП) позволяет поддерживать необходимое для системы управления измерение напряжений (с точностью до 15мВ) без использования внешних устройств.



Рисунок 2.4 — Микроконтроллер ATmega328P

В то же время данный микроконтроллер оснащён поддержкой внешних прерываний, что позволяет реализовывать на нём более удачные и эффективные решения для получения, обработки и передачи данных. Для нашей задачи играют очень важную роль в алгоритме регулирования напряжения на каналах, обеспечивая непрерывный процесс измерения напряжения при помощи АЦП и записи данных для коррекции кода цифро-аналогового преобразователя (ЦАП).

2.2.2 ЦИФРОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ. ПОДБОР ЦАП

Как было описано ранее, выбранный для управления микроконтроллер поддерживает на низком уровне обширное число интерфейсов для коммуникации с внешними устройствами, в связи с чем выбор подходящей электроники оказывается разнообразным как в вопросах производительности, так и цены.

В результате некоторых изысканий в прошлом семестре в качестве такого устройства был подобран ЦАП МСР4725. Данная микросхема поддерживает подключение к микроконтроллеру по интерфейсу I2C, что позволяет легко масштабировать модуль на большее число каналов (до восьми штук на микроконтроллер), сохраняя при этом большинство входов микроконтроллера свободными для прочих задач. ЦАП обладает разрядностью 12 бит, что позволяет выставлять напряжение на канале с точностью до 7 мВ. Подобная разрядность при грамотном алгоритме подстройки напряжений позволяет компенсировать

меньшую точность АЦП, опуская точность подстройки для приемлемых значений. Принципиальная схема включения ЦАПов для двух каналов представлена на рисунке 2.5.

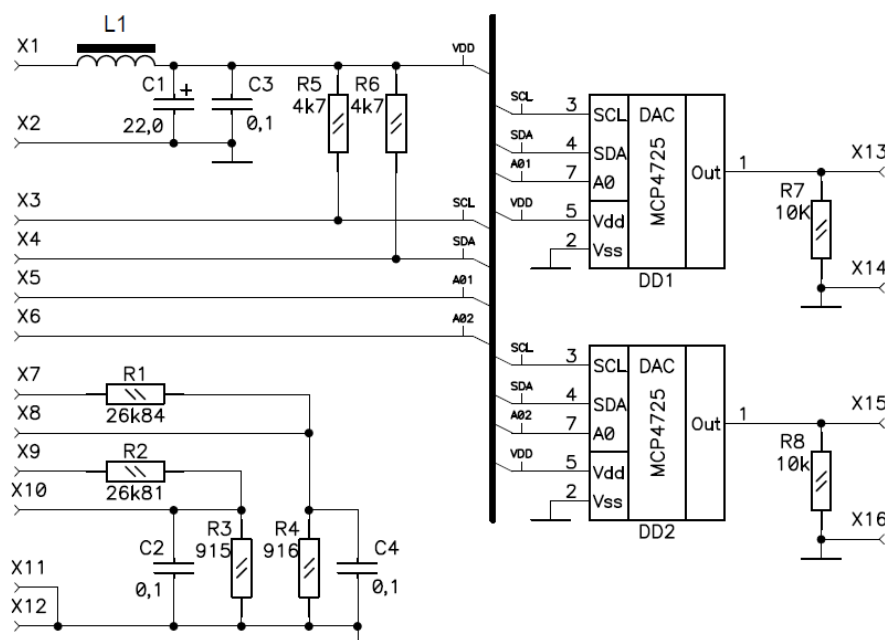


Рисунок 2.5 — Схема включения ЦАП MCP4725

Как было описано выше, микроконтроллер ATmega328P оснащён встроенным 10-битным АЦП для проведения оцифровки сигнала с опорным напряжением 1.1В, что не позволяет подавать на вход микроконтроллера полное напряжение на канале. Для решения этого вопроса на плате добавлены соответствующие резистивные делители R_1 и R_4 , а также R_2 и R_3 . Благодаря качественному подбору резисторов коэффициент передачи по постоянному току составил значение $K = \frac{R_3}{R_2 + R_3} \approx 0.033$, что в максимуме даст нам напряжение $U_{max} = 30 \times K = 0.99\text{В}$. Для обеспечения масштабирования из-за малого числа аналоговых входов на микроконтроллере выходы, с которых снимается напряжение, подключены к чипу через мультиплексор RS2099 (см. рис. 2.3).

При поведении измерений под контролем температуры система показала высокую стабильность: в четырёхчасовом эксперименте напряжение на выходе системы оказывалось полностью стабильным. Однако даже при грамотном подборе электронных компонентов итоговые значения напряжений для одного и того же кода ЦАП могут значительно отличаться, вплоть до 100мВ. Наличие данного фактора требует введения в алгоритм подстройки некоего механизма управления, чтобы ликвидировать такие отклонения.

2.2.3 ЦИФРОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Для взаимодействия с электроникой блока подстройки напряжений было разработано программное обеспечение (ПО) для персональных компьютеров (ПК), работающих на операционной системе Windows, интерфейс приведён на рисунке 2.6.

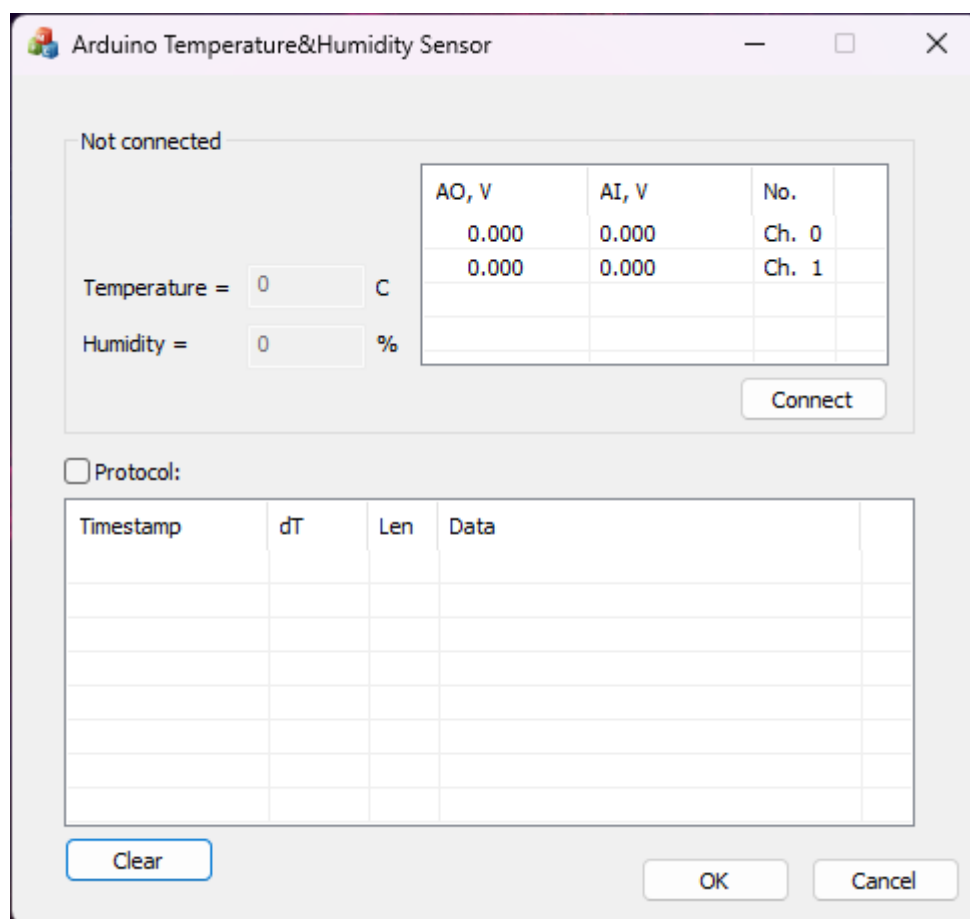


Рисунок 2.6 — Интерфейс программного обеспечения. Основное диалоговое окно без подключения к электронике

ПО представляет собой диалоговое окно, разработанное при помощи фреймворка Microsoft Foundation Classes (MFC), представленного корпорацией Майкрософт совместно с выходом Windows 95/NT4 (и до сих пор поддерживаемого), что заметно упрощает разработку оконных приложений и по сей день. По умолчанию персональный компьютер не подключен к блоку подстройки, взаимодействия с устройством осуществляется после нажатия кнопки Connect. После успешного подключения к блоку подстройки экран диалогового окна видоизменяется (рисунок 2.7), в таблице Protocol появляется доступ к информации о

передаче данных (опционально, можно активировать, поставив галочку в соответствующем поле), также отображается информация о текущем состоянии каналов в таблице сверху и данные о температуре и влажности в соответствующих строках. Под информацией о микроклимате также присутствует системная информация о датчике влажности.

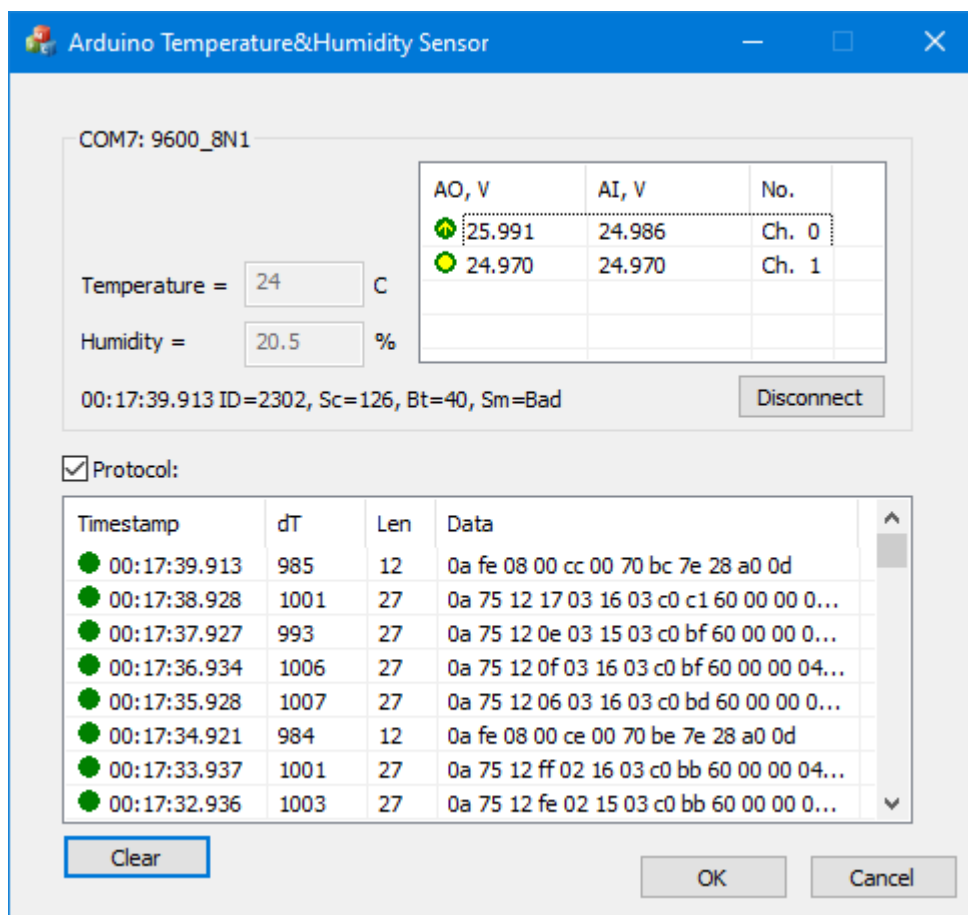


Рисунок 2.7 — Интерфейс программного обеспечения. Основное диалоговое окно после подключения к электронике

Выбор канала, над которым требуется произвести манипуляции подстройки, осуществляется из списка при помощи двойного нажатия по нему, после чего перед пользователем возникает диалоговое окно (рис. 2.8).

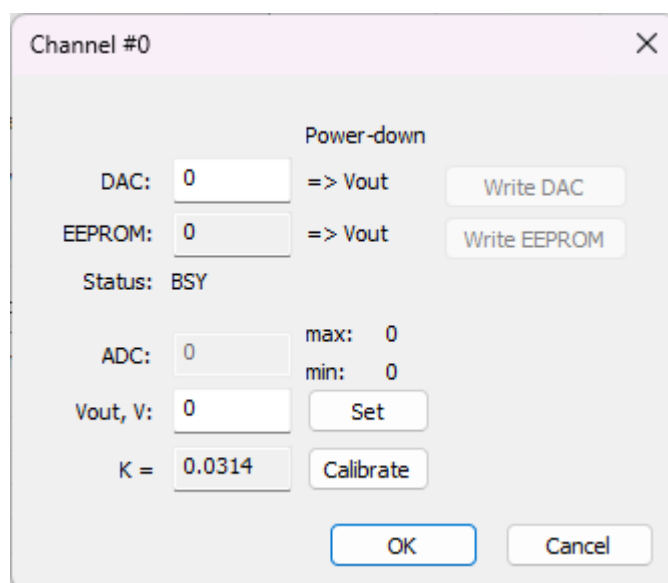


Рисунок 2.8 — Интерфейс программного обеспечения. Основное диалоговое окно после подключения к электронике

Программное обеспечение поддерживает выставление желаемого напряжения, преобразующегося в необходимый код АЦП посредством предварительной калибровки, а также выставление необходимого кода цифро-аналогового преобразователя. Заметим, что при выставлении кода ЦАП механизм регулирования не поддерживается, и скорость подстройки зависит только от физических характеристик электроники (скорости канала связи в случае увеличения, и времени разрядки RC-цепочки в противном случае). При этом регулирование кода ЦАП производится не чаще, чем раз в 1 секунду, что связано с необходимостью завершения всех переходных процессов, а также в том случае, если разница кодов АЦП между соседними измерениями не превышает 4 единицы.

2.2.4 ЦИФРОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ. МЕХАНИЗМ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

Как было замечено ранее, итоговые значения напряжений для одного и того же кода ЦАП могут значительно отличаться, что может значительно усложнить корректную подстройку напряжений на каналах. Чтобы нивелировать данную проблему было принято решение интегрировать в разработанное ПО механизм обратной связи, осуществляющий автоматическую и точную подстройку напряжений на канале, алгоритм управления представлен на рисунке 2.9.

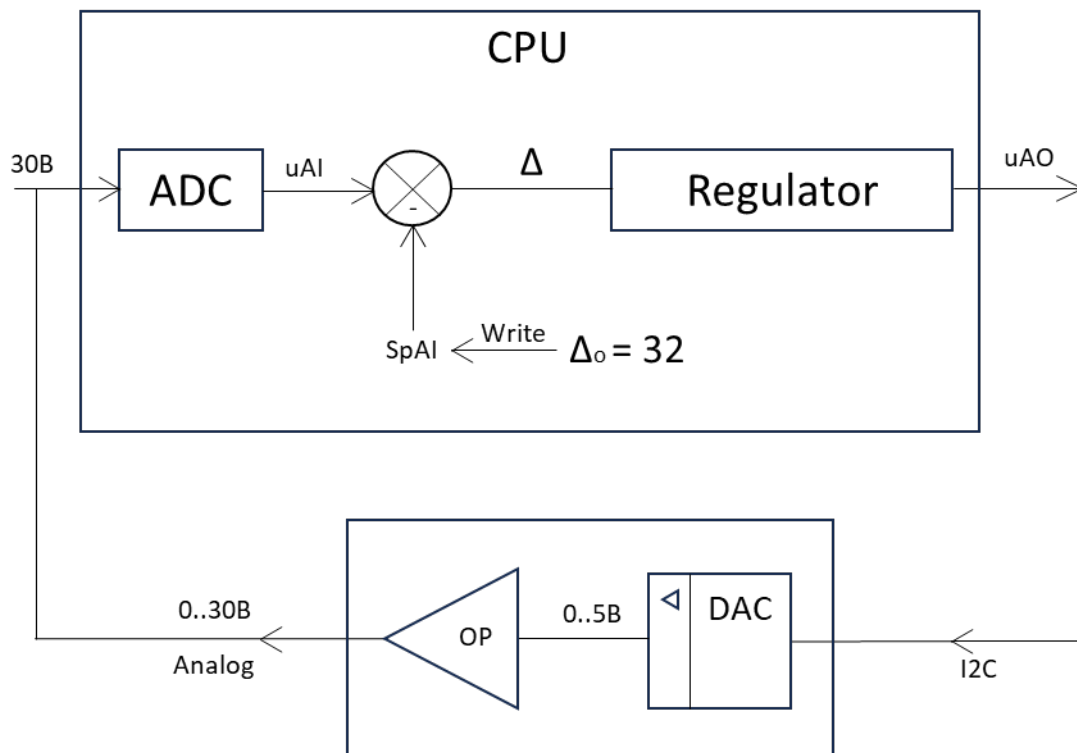


Рисунок 2.9 — Схема включения ЦАП MCP4725

Для осуществления данного предложения в программное обеспечение был включён механизм обратной связи, обеспечивающий гарантированную точную подстройку. Пользователь, используя ПО, устанавливает требуемое напряжение на канале в поле V_{out} . С учётом коэффициентов, получаемых в ходе предварительной калибровки, ожидаемое напряжение преобразовывается в ожидаемый код АЦП $SpAI$ и передаётся через USB/RS232 интерфейс на микроконтроллер. При помощи встроенного АЦП производится измерение текущего напряжения на канале uAI , после чего полученный код сравнивается с ожидаемым. В случае отклонения, на регулятор подаётся соответствующее управляющее воздействие Δ , которое добавляет (или отнимает) соответствующую величину к текущему коду ЦАП и отправляет по I2C новое его значение uAO . ЦАП, в свою очередь, выставляет соответствующее коду напряжение в диапазоне 0..5В, подаваемое на вход операционного усилителя, что вызывает выставление нового значения напряжения на канале. Далее процесс продолжается, пока код АЦП не перешагнёт уставку $SpAI$. После чего управляющее воздействие уменьшается вдвое, инвертируется и процесс повторяется. Зависимость кода АЦП от времени представлена на рисунке 2.10.

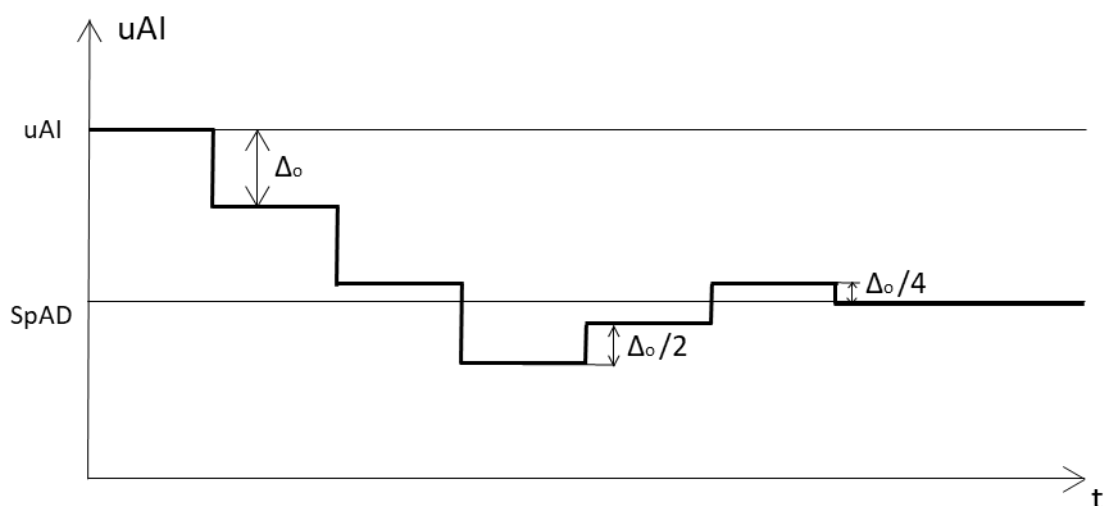


Рисунок 2.10 — Зависимость выходного напряжения схемы от времени, за Δ_0 управляющее воздействие в 32 единицы, деление на два осуществляется путём битового сдвига на 1

Заметим, что микроконтроллер занимается только выставлением соответствующего кода ЦАП, вся калибровка соответствующих преобразований находится на стороне ПО, исполняющегося на ПК.

2.3 ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Тестирование схемы подстройки производилось при помощи установки, применяемой ранее во время подготовки дипломной работы. На рисунке 2.11 представлена блок-схема установки. В подготовленный чёрный ящик помещается исследуемая сборка из сцинтиллятора и кремниевого фотоумножителя. Питание осуществляется внешним лабораторным источником питания, а в качестве источника сигнала может быть использован как изотоп, так и светодиод. Сигнал с SiPM передаётся в электронный тракт на основе аппаратуры CAEN из учебного набора (оцифровщик, усилитель и анализатор импульсов) [15]. Данное оборудование создано специально для работы с различными кремниевыми фотоумножителями и является удобным и компактным решением. Так, сигнал с SiPM передаётся на усилитель, а затем разветвляется и направляется на дискриминатор, формирующий временные ворота, и анализатор импульсов, который также получает данные с дискриминатора. Установка позволяет собирать как дифференциальные, так и интегральные спектры, а с прямым подключением к ЭВМ отображать их в реальном времени в прилагаемом ПО. Контроль

температуры осуществляется при помощи термодатчика AM2302.

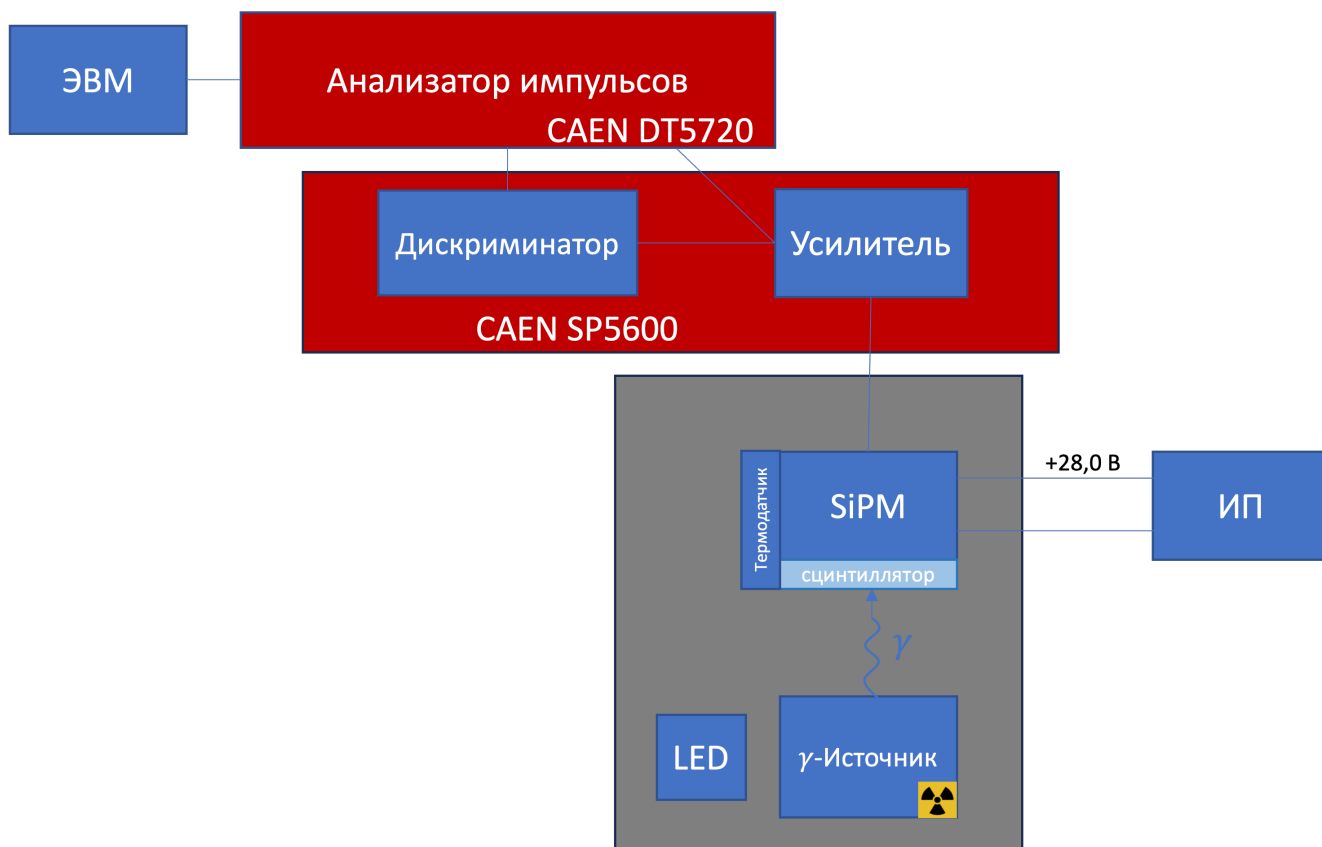


Рисунок 2.11 — Принципиальная схема установки

Теперь между источником питания и SiPM располагается наш универсальный блок подстройки, с помощью которого и будут выставляться напряжения. Схема включения блока подстройки по питанию приведена на рисунке 2.12.

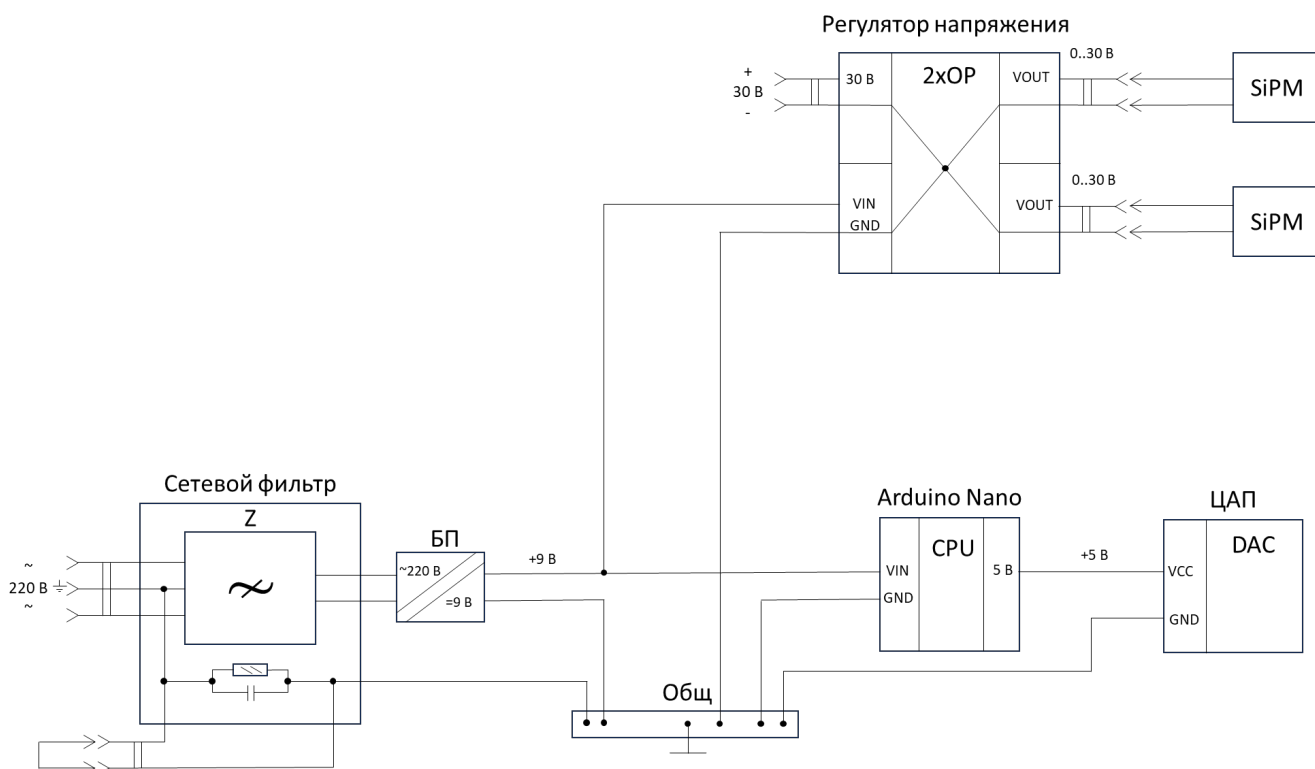
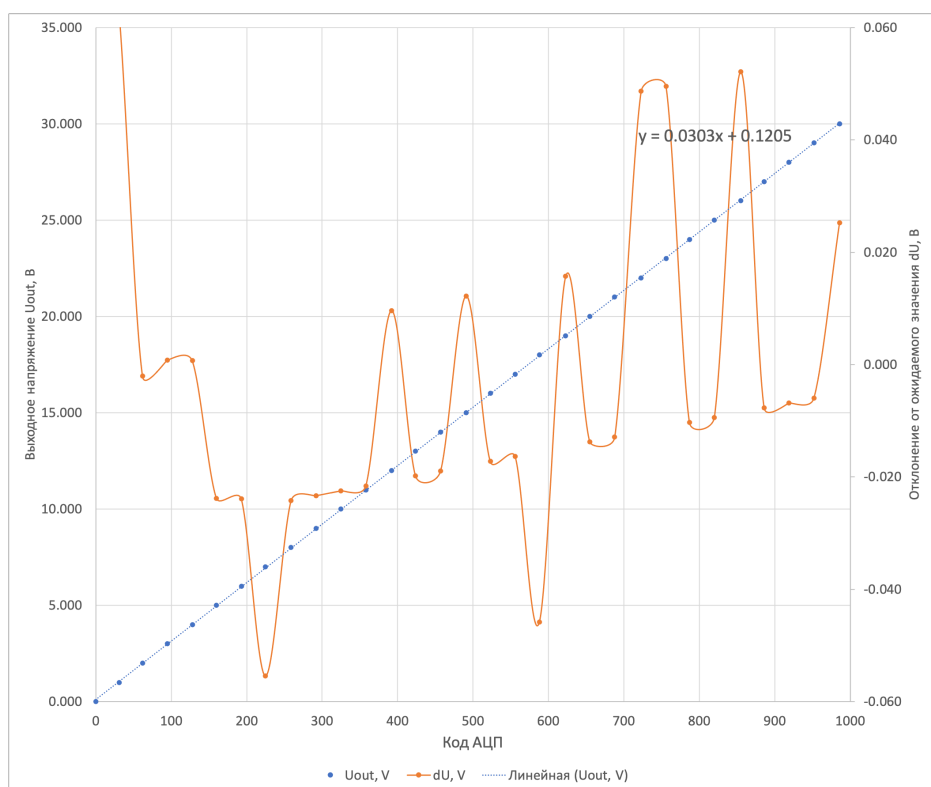


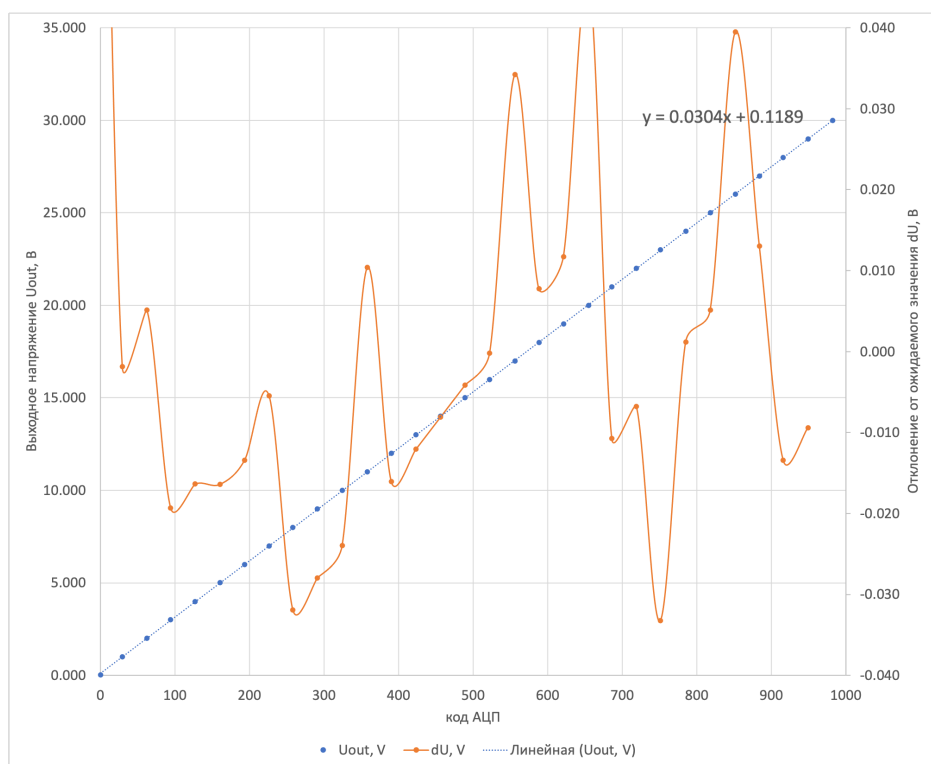
Рисунок 2.12 — Принципиальная схема установки

Плата Arduino, на которой распаян микроконтроллер ATmega328P запитывается от собственного источника питания +9В, оснащённого сетевым фильтром для подавления вредоносных помех и наводок в цепи питания. Все земли объединены в один общий земляной контур.

Как и в случае с предыдущими итерациями работы для выставления корректных коэффициентов пересчёта для каждого из каналов установки была проведена калибровка. При помощи источника питания +30В была получена зависимость напряжения на канале (U_{out}) от кода АЦП, а также отклонение от ожидаемого значения, полученное из линейной аппроксимации при помощи МНК. При помощи линейной аппроксимации МНК из экспериментальных данных были получены коэффициенты пересчёта, используемые в дальнейшем для алгоритма подстройки напряжений.



а



б

Рисунок 2.13 — Зависимость напряжения на канале (U_{out}) и отклонения от ожидаемого значения, полученное из линейной аппроксимации при помощи МНК, в зависимости от кода АЦП для канала 1 (а) и 2 (б)

Заметим, что зависимость отклонения от ожидаемого значения в зависи-

мости от кода АЦП не носит случайный характер. Это связано с различием разрядности АЦП и ЦАП: разрядность последнего больше в 4 раза, в связи с чем при выставлении нового кода ЦАП начинает накапливаться ошибка, которая резко сбрасывается при переходе четырёх разрядов. При этом заметно, что в такой конфигурации также сохраняется линейность установки, что и ожидалось от универсального блока.

На рисунке 2.14 представлена фотография тестовой платы, подготовленной для масштабирования. Несколько резистивных делителей служат для проверки работоспособности дешифратора и мультиплексора.

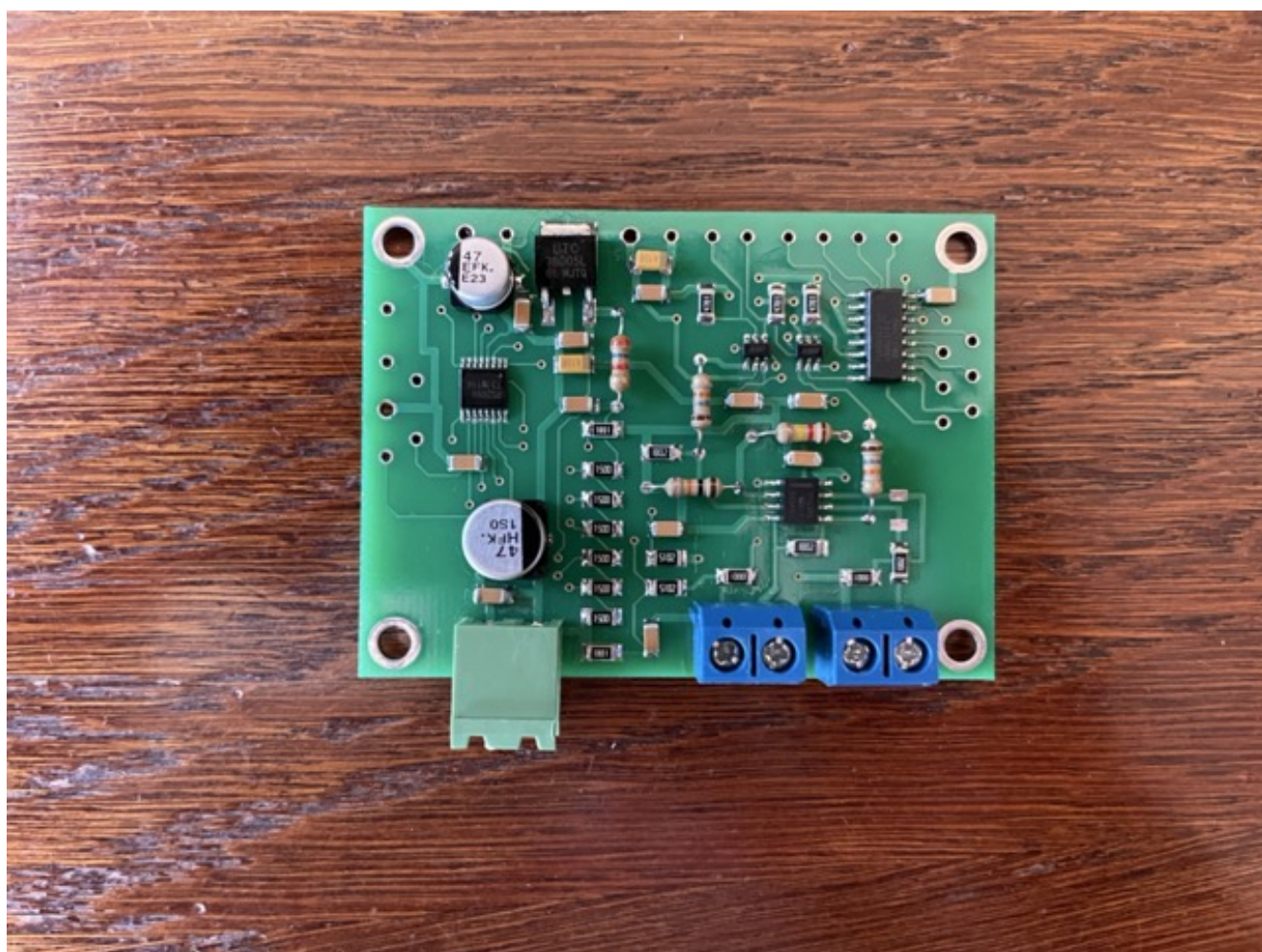


Рисунок 2.14 — Принципиальная схема установки

2.4 ПУТИ УЛУЧШЕНИЯ

На данный момент текущая версия тестовой платы кажется нам наиболее подходящим кандидатом для дальнейшего масштабирования на остальные

каналы. Актуальным вопросом остаётся способ масштабирования: в качестве основных предполагается либо организация USB-концентратора для соединения всех блоков в единую систему для подключения к компьютеру или применить ещё один микроконтроллер связи, объединяющий под собой все модули и осуществляющий обмен данными с ПК.

Также разведение полноценного блока на 8 каналов планируется производить с запасом на будущее, установив универсальный разъём, на который будут выведены необходимые контакты для подключения модуля измерения тока, потребляемого блоком из восьми детекторов (по сути микроамперметра).

Также после общения с некоторыми людьми, работающими с подобными системами, были предложены некоторые усовершенствования для программного обеспечения, которые сделают опыт взаимодействия пользователя с ПО более комфортным. В частности, предложены методы сохранения конфигурации напряжений на каналах, способы их создания, сохранения и загрузки, а также некоторое упрощение интерфейса. Для большей универсальности ПО следует уходить от текущего оконного фреймворка в пользу более широко распространённых, в частности поддерживающих ОС Linux (например Qt).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная работа посвящена продолжению разработки метода подстройки напряжения на базе микроконтроллера ATmega328P.

Доработана схема подстройки напряжения на SiPM на базе операционного усилителя с использованием более современных и компактных компонентов. За счёт изменения типоразмера комплектующих удалось разместить сразу несколько модулей на одной плате, что положительно сказывается на помехоустойчивости, теплообмене и компактности финального исполнения устройства.

Для доработанной схемы подстройки напряжения представлена модификация цифрового управления на базе микроконтроллера ATmega328P и 12-разрядного ЦАП. Доработано приложение для микроконтроллера и ПК для текущего модифицированного оборудования и проверки его работоспособности на тестовой плате. Проведена соответствующая калибровка измерительных каналов для корректной работы программного обеспечения. Показано, что предложенное решение не зависит от электроники подстройки, так как вся логика выставления кодов находится только на стороне программного обеспечения. Схема имеет возможность к масштабированию и возможной модификации в виде добавления нового модуля для измерения потребляемого блоком детекторов тока, что поможет фиксировать выход из строя SiPM или их засветки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зыков Е. М., Поздняков А. В., Костеников Н. А.* Рациональное использование ПЭТ и ПЭТ-КТ в онкологии // Практическая онкология. — 2014. — Т. 15, № 1. — С. 31.
2. *Deans S. R.* The Radon transform and some of its applications. — Courier Corporation, 2007.
3. *Рудас М. С., Насникова И. Ю., Матякин Г. Г.* Позитронно-эмиссионная томография в клинической практике // М.: Центральная клиническая больница УДП РФ. — 2007.
4. Позитронная эмиссионная томография в онкогинекологии / Д. Рыжкова [и др.] // Сибирский онкологический журнал. — 2013. — 2 (56). — С. 77—83.
5. *Беляев В., Климанов В.* Физика ядерной медицины: учеб. пособие // М.: НИЯУ МИФИ. — 2012.
6. *Корнеев А. И.* Универсальная модель световыхода пластмассовых и жидких органических сцинтилляторов для электронов и тяжёлых заряженных частиц // Факультет экспериментальной и теоретической физики НИЯУ МИФИ. — 2007. — С. 40.
7. *Crystals S.-G.* Physical properties of common inorganic scintillators // Saint-Gobain Crystals. — 2007.
8. The digital silicon photomultiplier — Principle of operation and intrinsic detector performance / Т. Frach [и др.] // 2009 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record (NSS/MIC). — 2009. — С. 1959—1965.
9. *Jeong M., Hammig M.* Development of hand-held coded-aperture gamma ray imaging system based on GAGG(Ce) scintillator coupled with SiPM array // Nuclear Engineering and Technology. — 2020. — Т. 52, № 11. — С. 2572—2580. — ISSN 1738-5733.

10. Comparison between Pixelated Scintillators: CsI(Tl), LaCl₃(Ce) and LYSO(Ce) when coupled to a Silicon Photomultipliers Array / M. Jeong [и др.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2018. — Т. 893. — С. 75—83. — ISSN 0168-9002.
11. *Акимов Ю. К.* Фотонные методы регистрации излучений. — Дубна : ОИ-ЯИ, 2014. — С. 323.
12. *Sensors C.-S. S.* Silicon Photomultipliers (SiPM), Low-Noise, Blue-Sensitive // On Semiconductor. — 2020.
13. *Konotop A., Boyko N.* INSTALLATION FOR TESTING SILICON PHOTOMULTIPLIER AND SCINTILLATION CRYSTALS // Vestnik natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta «MIFI». — 2023. — Т. 12(3). — С. 143—152.
14. PET prototype based on scintillation detectors GAGG-SiPM coupled to 32-channel Petiroc2A chip / F. Dubinin [и др.] // JINR AYSS international conference 2023. — 2023. — С. 1—5.
15. *CAEN.* SP5600AN Educational Kit - Premium Version Guide. — Italy : CAEN Educational, 2016. — С. 81.