

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

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ
КАФЕДРА №40 «ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ»

УДК 531.3, 539.1.05

На правах рукописи

КОНОТОП АЛЕКСЕЙ ДАВИДОВИЧ

**8-КАНАЛЬНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ С ЗАЗЕМЛЁННЫМ
ЭЛЕКТРОДОМ ДЛЯ КРЕМНИЕВЫХ ФОТОУМНОЖИТЕЛЕЙ**

Направления подготовки:

09.04.04 «Программная инженерия»,

14.04.02 «Ядерная физика и технологии»

Диссертация на соискание степени магистра

Научный руководитель
к.ф.-м.н., доцент

_____ П. Е. Тетерин

Научный консультант

_____ Ф. А. Дубинин

Москва 2026

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРА

8-КАНАЛЬНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ С ЗАЗЕМЛЁННЫМ ЭЛЕКТРОДОМ ДЛЯ КРЕМНИЕВЫХ ФОТОУМНОЖИТЕЛЕЙ

Студент _____ А. Д. Конотоп

Научный руководитель,
к.ф.-м.н., доцент _____ П. Е. Тетерин

Научный консультант _____ Ф. А. Дубинин

Рецензент 1 _____ Д. Г. Конотоп

Рецензент 2,
к.ф.-м.н. _____ К. Ф. Власик

Секретарь ГЭК,
к.ф.-м.н. _____ Е. Ю. Солдатов

Зав. каф. №40,
д.ф.-м.н., проф. _____ М. Д. Скорохватов

Рук. учеб. прог.,
к.ф.-м.н. _____ Е. Ю. Солдатов

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
1 Макет позитронно-эмиссионного томографа (ПЭТ)	8
1.1 Принципы работы ПЭТ	8
1.2 Сцинтилляционные детекторы	9
1.2.1 Сцинтилляционные материалы	9
1.2.2 Фотоумножители	11
1.3 Плата Petiros 2A	15
1.4 Макет 32-канального ПЭТ	16
1.5 Характеристики макета 32-канального ПЭТ	17
1.6 Неоднородность установки	19
2 Система управления напряжением	20
2.1 Восьмиканальная система управления напряжением на кремниевых умножителях с заземлённым электродом	20
2.1.1 Цифровое управление. ATmega328P	22
2.1.2 Цифровое управление. ЦАП	23
2.1.3 Цифровое управление. Механизм обратной связи	25
2.1.4 Цифровое управление. Программное обеспечение	27
2.2 Тестирование системы управления напряжением	30
2.2.1 Калибровка установки	30
2.2.2 Тестирование на каналах макета ПЭТ	32
2.3 Заключение по главе	33
3 Помехоустойчивость системы управления	34
3.1 Подготовка эксперимента	34
3.2 Управление низким потенциалом	35
3.2.1 Описание установки	35

3.2.2	Результаты помехоустойчивости	36
3.3	Управление высоким потенциалом	37
3.3.1	Описание установки	38
3.3.2	Результаты помехоустойчивости	38
3.4	Сравнение и обсуждение результатов	40
4	Прототип модуля измерения тока на каналах системы управления на- пряжением на кремниевых фотоумножителях	42
4.1	Требования к измерителю тока	42
4.2	Прототип измерителя тока	43
4.2.1	Подбор операционных усилителей	44
4.2.2	Подбор биполярного транзистора	45
4.3	Тестирование модуля измерения тока	45
4.4	Заключение по главе	46
	Заключение	47
	Список литературы	48

ВВЕДЕНИЕ

Сцинтиляционные детекторы получили широкое распространение в экспериментах физики высоких энергий [1—4], а также ядерной медицине [5—7] как способ регистрации различных излучений.

Такие детекторы представляют собой сборку из сцинтилятора, излучающего свет в результате ионизации пролетающими через него частицами, а также фотоприёмника, регистрирующего этот световой отклик. В настоящее время в науке и технике широкое распространение получили кремниевые фотоумножители (SiPM) как сенсор для фиксирования слабых оптических вспышек. В отличие от фотоэлектронных умножителей, SiPM оказываются более компактными, высокоэффективными, а также устойчивыми к электромагнитным излучениям. Также кремниевые фотоумножители благодаря своей конструкции работают на более низких напряжениях, что позволяет значительно проще управлять этим параметром при помощи микро- и нанoeлектроники.

SiPM представляют собой матрицу из лавинных фотодиодов, которые работают в гейгеровском режиме. При таком включении диодов каждая ячейка находится при напряжении выше пробойного, в результате чего любое энерговыделение в ячейке приводит к образованию лавинного пробоя и, как следствие, возникновению тока детектора. За счёт наличия общей подложки ток со всех ячеек суммируется, в результате чего отклик детектора оказывается пропорционален числу зафиксированных фотонов. Это позволяет измерять энергию, оставленную частицей.

Ключевым параметром для работы кремниевых фотоумножителей является перенапряжение, влияющее на обширный набор параметров SiPM: коэффициент усиления, эффективность регистрации частиц и прочее [8]. Так, в таблице 1 приведены некоторые параметры, характерные для широко применяемых SiPM onsemi FC30035 [9] и Hamamatsu S14160-3015C [10]. Таким образом, для кремниевого фотоумножителя onsemi изменение напряжения смещения на 27 мВ влечёт изменение усиления на 1%, при этом для заявленного разброса напряжений

пробоя коэффициенты усиления различаются на величину до 20% между двумя любыми фотоприёмниками. В свою очередь для для Hamamatsu разброс усиления составит в эквивалентной ситуации до 36%. В то же время существует и температурная зависимость напряжения пробоя SiPM, что также ведёт и к изменению его характеристик (см таблицу 1 и [11]). Такой разброс напряжений пробоя требует компенсации для обеспечения однородности многоканальных систем.

Таблица 1 — Характеристики кремниевого фотоумножителя onsemi FC30035 [9] и Hamamatsu S14160-3015C [10]

Параметр	onsemi FC30035	Hamamatsu S14160-3015C
Напряжение пробоя V_{br} , В	24.2 ÷ 24.7	38 ± 3
Рабочее напряжение V_{op} , В	$V_{br} + 2.5$	$V_{br} + 4$
PDE, % (при V_{op} и при λ_{pmax})	17	28
Усиление (при V_{op})	3×10^6	3.6×10^5
Температурная зависимость напряжения пробоя V_{br} , $\frac{мВ}{^{\circ}C}$	21.5	34
Температурная зависимость усиления, %	−0.8	−0.1

В свою очередь, сцинтилляционные кристаллы с одинаковым составом также могут давать различный оптический отклик на ионизацию (световыход). Существуют задачи, не требующие качественного подбора кристаллов с одинаковым световыходом, так как возможна компенсация различия в световыходе грамотной подстройкой напряжения питания. Это позволяет унифицировать отклик детекторов и заметно упростить дальнейший анализ данных.

В промышленных многоканальных источниках питания SiPM часто применяется способ установки высокого общего потенциала и индивидуального управления нижним потенциалом каждого канала для выставления требуемого напряжения питания [12]. Такой вариант питания сравнительно прост в реализации, но не позволяет привязать SiPM к общей земле, что в условиях высоких электромагнитных помех накладывает дополнительные требования на электронику переднего края.

Целью работы является разработка многоканальной системы управления напряжением на кремниевых фотоумножителях с индивидуальной настройкой

высокого потенциала и привязкой к общей земле. Такой метод включения детекторов повышает точность измерений за счёт минимизации помех, а также обеспечивает безопасность электронных компонентов схемы.

Для реализации цели поставлены следующие **задачи**:

- 1) Разработать двуканальный прототип установки;
- 2) Провести анализ линейности системы управления;
- 3) Масштабировать прототип на требуемое число каналов;
- 4) Исследовать помехоустойчивость прототипа;
- 5) Разработать прототип системы измерения тока на каналах;
- 6) Протестировать систему изменения тока.

1 МАКЕТ ПОЗИТРОННО-ЭМИССИОННОГО ТОМОГРАФА (ПЭТ)

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) [13].

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.[14].

Радиоактивная метка подвергается β^+ -распаду, в результате которого родившиеся позитроны, пролетев небольшое расстояние (в среднем 3-4 мм [15]), аннигилируют с электронами тканей, в результате чего рождаются два γ -кванта, разлетающиеся на угол, близкий к 180° . Отклонение от коллинеарности в сред-

нем составляет около 0.23° , что при 80-см диаметре кольца приводит к потере в разрешении около 1.7 мм [16]. 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 [14]:

- 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 ПШПВ 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 пропорциональ-

ное 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 [17] *среднее значение

Сцинтиллятор	плотность $\frac{\text{г}}{\text{см}^2}$	Время высвечивания, нс	Световыход, $\frac{\text{ф}}{\text{кэВ}}$
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 ($\sim 56000 \text{ ф/МэВ}$, $T = 293K$), 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 конкурен-

том в лице $\text{LYSO}(\text{Ce})$, выбранный нами кристалл не только не хуже, но и превосходит аналоги по многим параметрам. Кроме того, $\text{GAGG}(\text{Ce})$, 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, $\text{GAGG}(\text{Ce})$ можем считать хорошей альтернативой кристаллов $\text{LYSO}(\text{Ce})$, 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 продолжают 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. [18—21]

	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 волн тах высвечивания (нм)	550	420	480	415	520
Время высвечивания (нс)	1050	40	300	230	87(90%)255(10%)
Световыход (фотоны/кэВ)	54	32	10	38	40-45
Гигроскопичность	ДА	НЕТ	НЕТ	ДА	НЕТ
Собственная радиоактивность	НЕТ	ДА	НЕТ	НЕТ	НЕТ

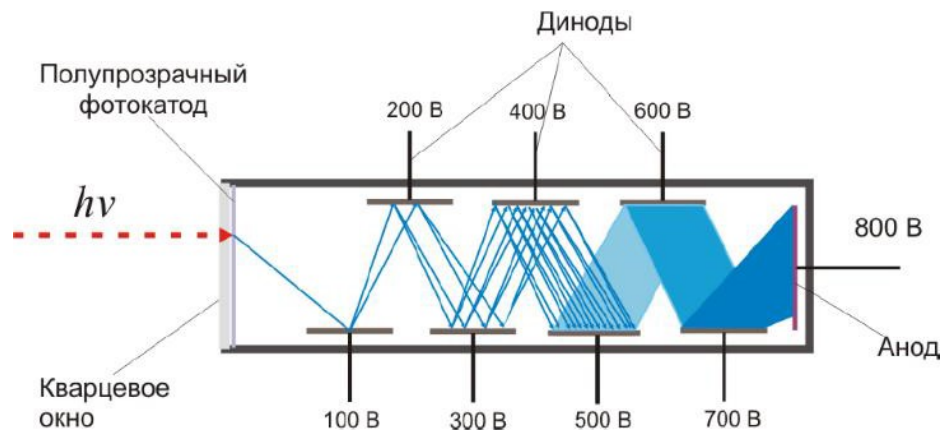


Рисунок 1.1 — Схема ФЭУ

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.

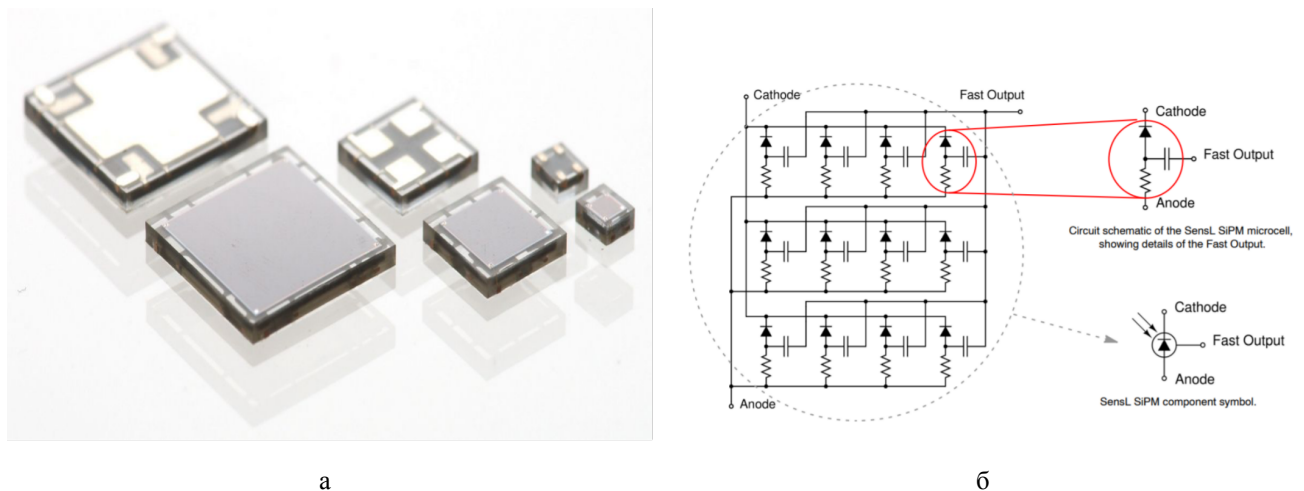


Рисунок 1.2 — Кремниевый фотоумножитель от компании onsemi (а) и принципиальная схема кремниевого фотоумножителя (б)

Данный фотоприёмник представляет из себя матрицу полупроводниковых лавинных фотодиодов (ЛФД, SPAD), работающих в гейгеровском режиме. Пример принципиальной схемы SiPM представлен на рисунке 1.2б, 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. [22]

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 [23], чувствительных в однофотонном режиме от ультрафиолетового до инфракрасного диапазона

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, %	$31(V_{br} + 2.5)V$
		Усиление	3×10^6
		Темновой счёт, кГц	300 - 860

Таблица 1.3 — Характеристики кремниевого умножителя onsemi FC30035

при значении длины волны 420 нм.

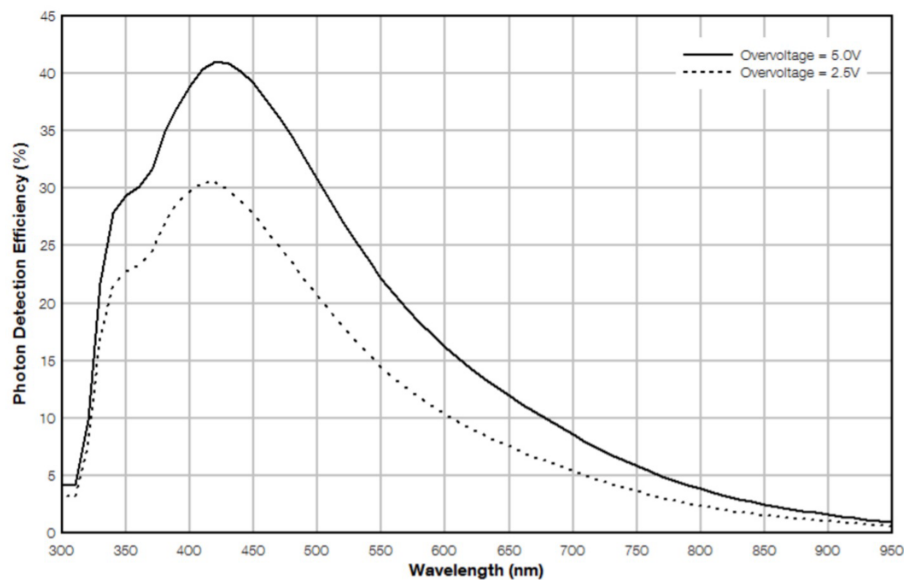


Рисунок 1.3 — Зависимость PDE от длины волны при разных значениях перенапряжения

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 напряжение 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 Weeros. 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: временную и зарядовую ветвь. Первичный отбор производится на основе срабатывания триггера временного канала, также могут быть применены отборы на основе триг-

гера зарядового канала и на основе совпадений.

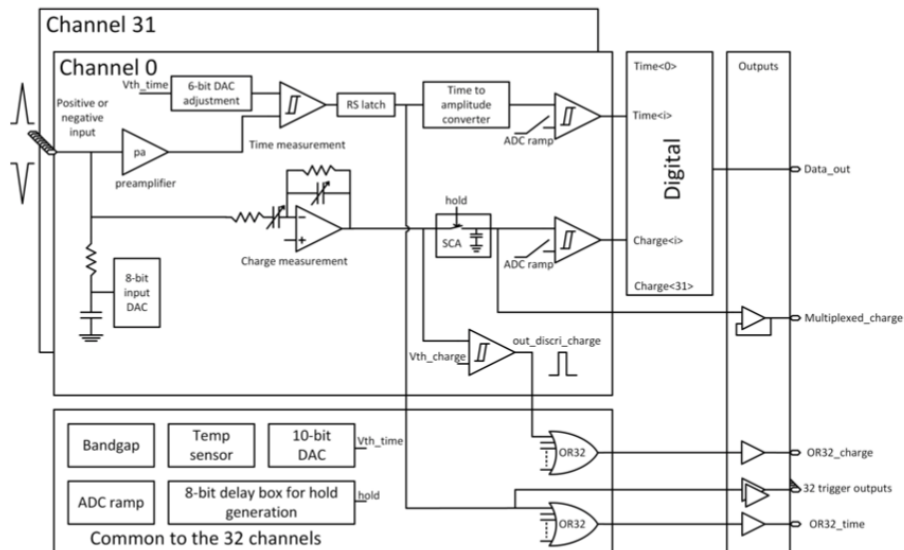


Рисунок 1.4 — Принципиальная схема тестовой платы Petiros 2A

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 осуществля-

ется через шлейф, присоединенный на входные pin-контакты платы. Установка в сборе представлена на рисунке 1.5.

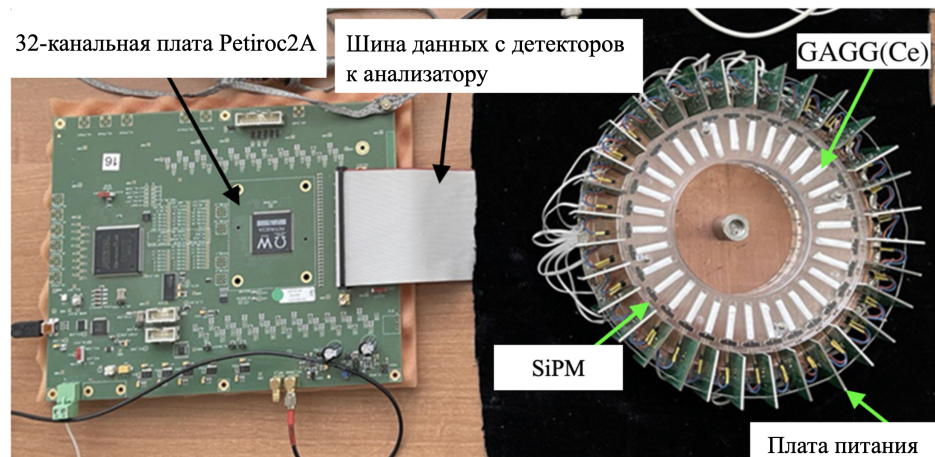


Рисунок 1.5 — Внешний вид макета 32-канального ПЭТ

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 [7], 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 фотомножителей и сцинтилляционных кристаллов

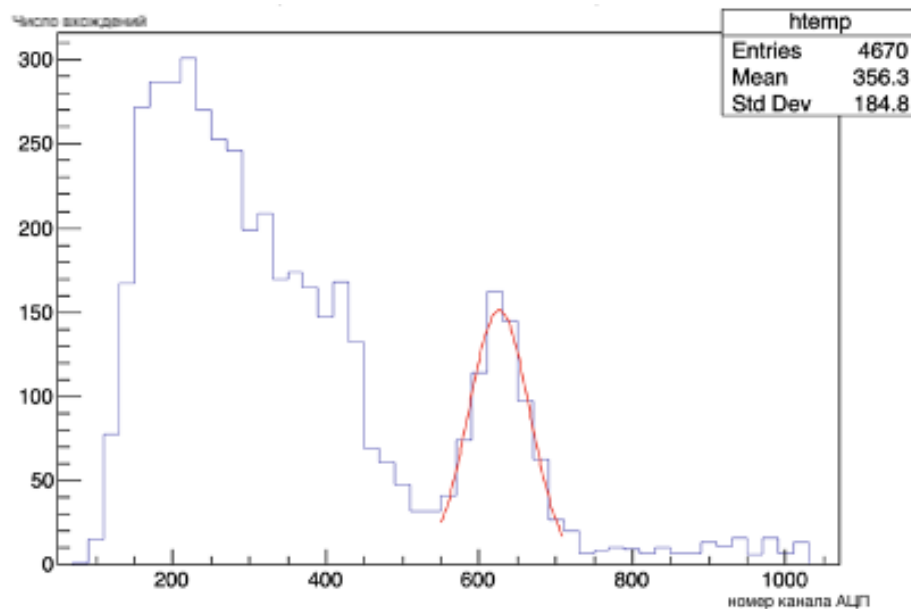


Рисунок 1.7 — Спектр источника ^{44}Ti , полученный на одном канале макета 32-детекторного ПЭТ

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 кон-

ференции AYSS, прошедшей в ОИЯИ в Дубне, информация по докладу изложена в статье [24].

1.6 НЕОДНОРОДНОСТЬ УСТАНОВКИ

Одной из серьёзных проблем макета ПЭТ является серьёзная неоднородность отклика каналов установки (рис. 1.8):

Среднее положение пика = 318ед. АЦП, Разброс = 20%.

Из полученных данных наблюдается значительный разброс положений пика. Данный факт является серьёзной проблемой для нашей установки: подобный разброс характеристик значительно ухудшает работу установки и получение качественного изображения.

В связи с особенностями применяемой электроники необходимо обеспечить наибольшую однородность отклика детекторов. Одним из наиболее простых и подходящих методов является подстройка напряжений на каналах установки, которую можно обеспечить за счёт разрабатываемой системы управления.

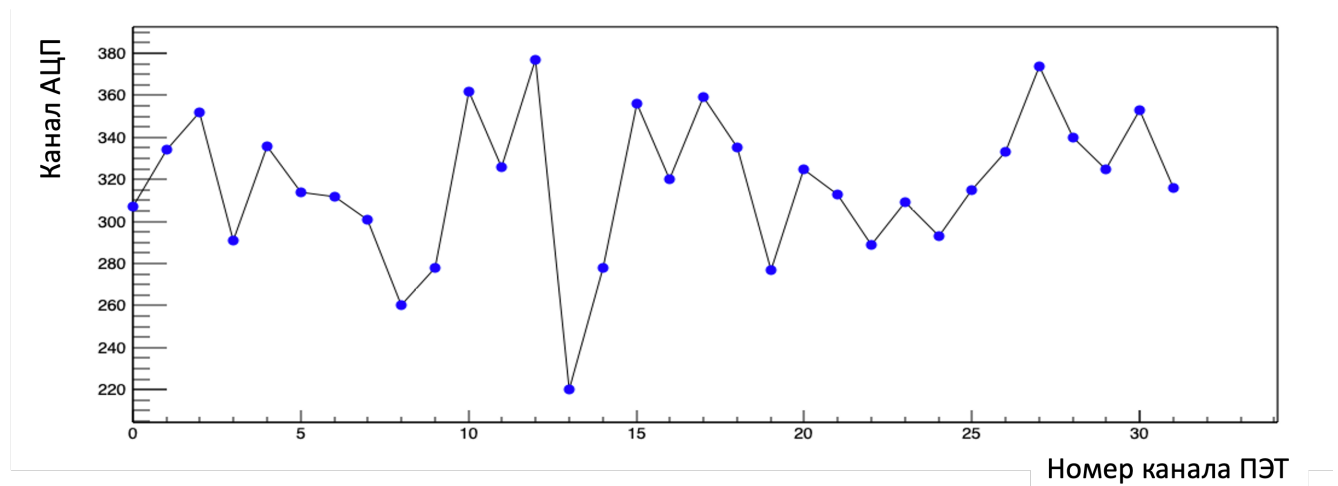


Рисунок 1.8 — Зависимость положения фотопика от канала установки

2 СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЕМ

В рамках работы, проводимой с третьего курса бакалавриата, была разработана многоканальная система управления напряжением на кремниевых фотополупроводниках. После масштабного макетирования, изготовления серии прототипов и поиска оптимального решения, отвечающего поставленной цели была предложена следующая версия системы управления напряжением.

2.1 ВОСЬМИКАНАЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЕМ НА КРЕМНИЕВЫХ УМНОЖИТЕЛЯХ С ЗАЗЕМЛЁННЫМ ЭЛЕКТРОДОМ

Система представляет собой восьмиканальный модуль, который при помощи цифрового управления осуществляет подстройку выходного напряжения. Уровень выходного устанавливается в диапазоне от 0 до 30 В с наименьшим шагом в 7 мВ индивидуально на каждом канале, а также измерением выходного напряжения с точностью 30 мВ, при этом максимально допустимое значение тока по сумме восьми каналов составляет 150 мА. Как было подчёркнуто ранее, наличие заземлённого электрода позволяет добавить дополнительные фильтрующие каскады, которые значительно повышают помехоустойчивость системы. На рисунке 2.1 представлена общая функциональная схема системы управления напряжением.

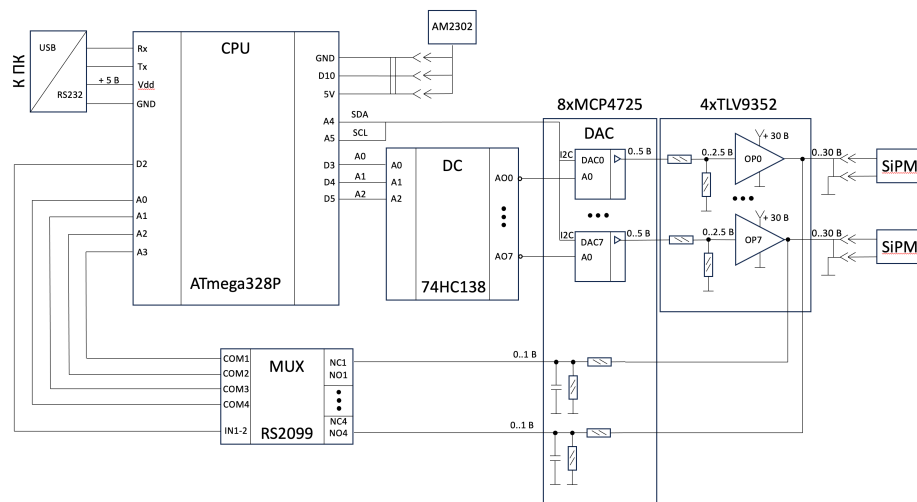


Рисунок 2.1 — Функциональная схема восьмиканальной системы управления напряжением на кремниевых фотоумножителях

На рисунке 2.2 представлена восьмиканального модуля подстройки напряжения. Плата содержит полноценные восемь каналов, выходное напряжение снимается со стандартизированного разъёма DB-25, что упрощает подключение электроники детекторов к плате.

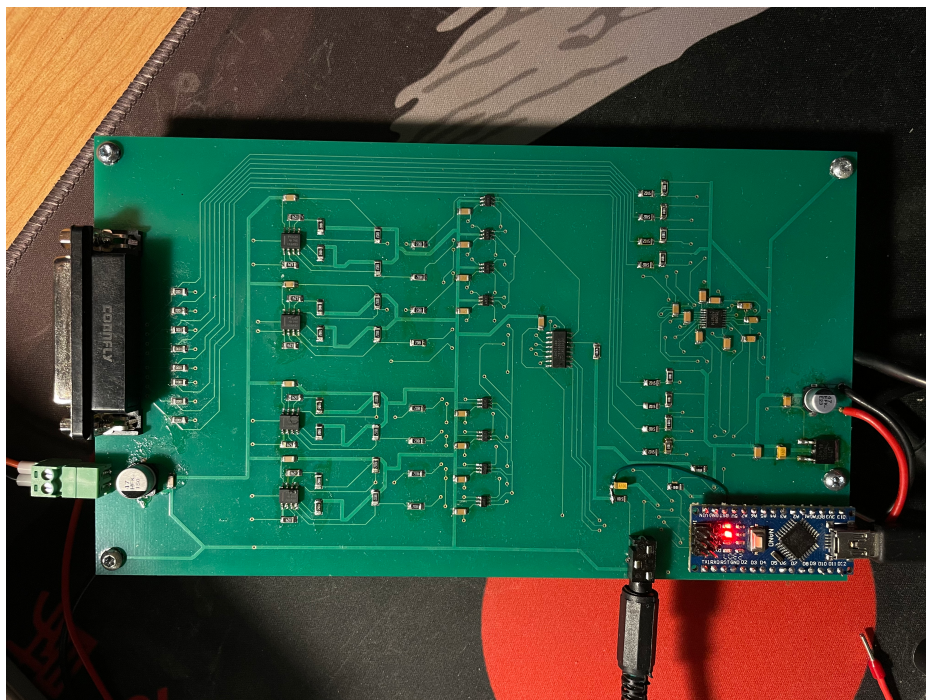


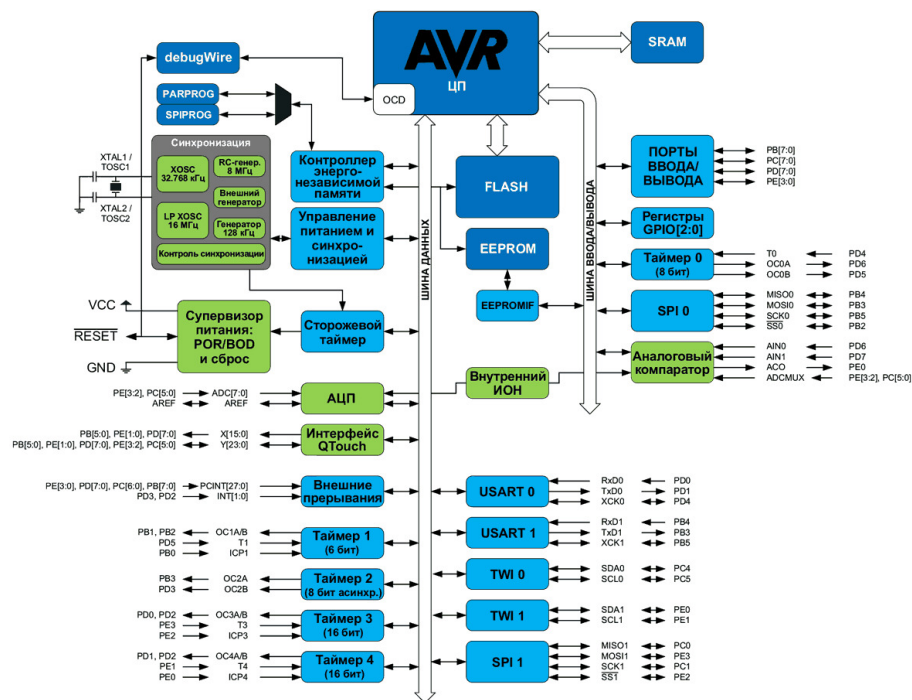
Рисунок 2.2 — Восьмиканальный модуль подстройки напряжения

Рассмотрим основные модули восьмиканальной системы управления напряжением.

2.1.1 ЦИФРОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ. АТМЕГА328Р

В качестве микроконтроллера, осуществляющего управление электроникой, аналогично выбрана микросхема АТmega328Р, функциональная схема которой представлена на рисунке 2.3.

Это достаточно распространённый 8-битный RISC-процессор на базе AVR архитектуры (Advanced Virtual RISC), работающий на частоте 16 МГц за счёт внешнего резонатора. Данный микроконтроллер поддерживает различные протоколы для взаимодействия с внешними устройствами, такие как I2C (TWI) и RS-232, что позволяет 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 «грязной» точностью до 15мВ) без использования внешних устройств.



Основным конкурентом ATmega являются 32-битные микроконтроллеры STM32 на базе архитектуры ARM (Advanced RISC Machine). Данное семейство микроконтроллеров работает на более быстрых частотах, обладает широким спектром интерфейсов (в т.ч. I2C, USART) и за счёт более высокой разрядности (32-битная шина) содержат 12-битный АЦП. Несмотря на то, что по всем параметрам контроллеры серии STM превосходят конкурента в лице ATmega, текущих мощностей используемого в настоящий момент микроконтроллера полностью хватает для выполнения поставленных задач. Переход на более мощный процессор имеет смысл рассматривать исключительно ради увеличения точности измерения из-за более высокой разрядности АЦП, однако выбранный нами в настоящий момент ЦАП позволяет минимизировать различия в точности измерения.

2.1.2 ЦИФРОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ. ЦАП

В качестве устройства, устанавливающего выходное напряжение на операционном усилителе был выбран ЦАП MCP4725. 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, поднимая точность до единиц милливольт. Принципиальная схема включения ЦАПов для двух каналов представлена на рисунке 2.4.

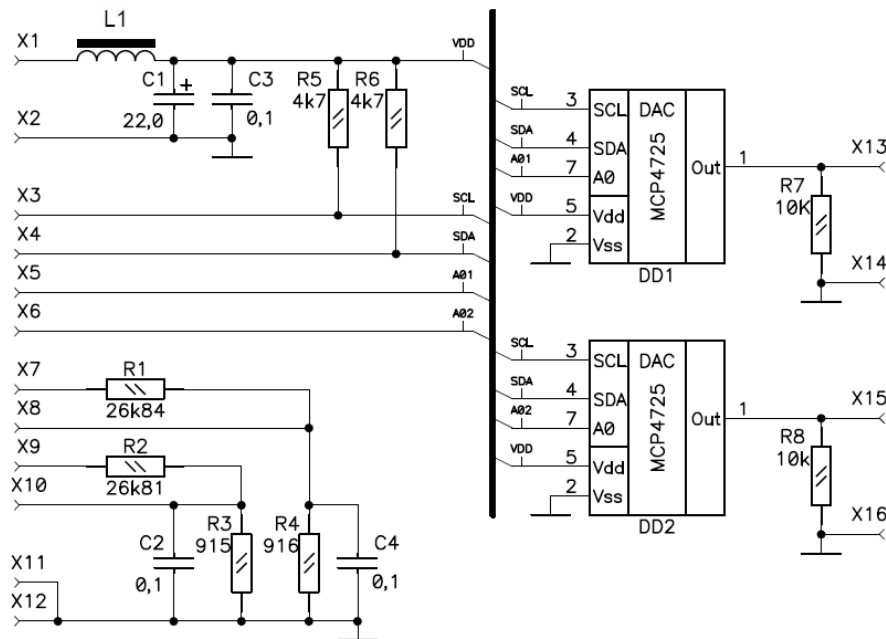


Рисунок 2.4 — Схема включения ЦАП MCP4725

Заметим, что идеология включения каналов сохраняет попарную компоновку, что связано напрямую с конфигурацией операционного усилителя (два на одном кристалле с общим питанием). 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 выбора требуемого ЦАП (по умолчанию адрес задан как 0) применяется инверсный дешифратор (DC), благодаря которому выбираемый канал откликается на нужный адрес. Для обеспечения масштабирования из-за малого числа аналоговых входов на микроконтроллере, выходы, с которых снимается напряжение, подключены к чипу через мультиплексор RS2099. Выбор соответствующих для измерения групп каналов осуществляется через управление входом INT1-2, при этом часть выходов подключена к нормально закрытым, а часть к нормально открытым входам микросхемы (см. рис. 2.1).

При поведении измерений под контролем температуры система показала высокую стабильность: в восьмичасовом эксперименте напряжение на выходе системы оказывалось полностью стабильным. Однако даже при грамотном подбо-

ре 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.

2.1.3 ЦИФРОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ. МЕХАНИЗМ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

Как было замечено ранее, конечные значения напряжений для одного и того же кода ЦАП могут значительно отличаться от канала к каналу, что не позволяет ограничиваться выставлением одинакового значения кода. 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 2.5.

Микроконтроллер получает ожидаемый на выходе код АЦП. При помощи встроенного АЦП производится измерение текущего напряжения на канале, после чего полученный код АЦП сравнивается с ожидаемым. В случае различия кодов, на регулятор подаётся соответствующее управляющее воздействие Δ , которое добавляет или отнимает соответствующую величину к текущему коду ЦАП. Различия в точности ЦАП и АЦП компенсируются усреднением по выборке из восьми измерений. Время измерения на одном канале составляет не более 10 мкс. Далее процесс продолжается, пока код АЦП не перешагнёт ожидаемое значение. После чего управляющее воздействие уменьшается вдвое, инвертируется и процесс повторяется (рис. 2.6).

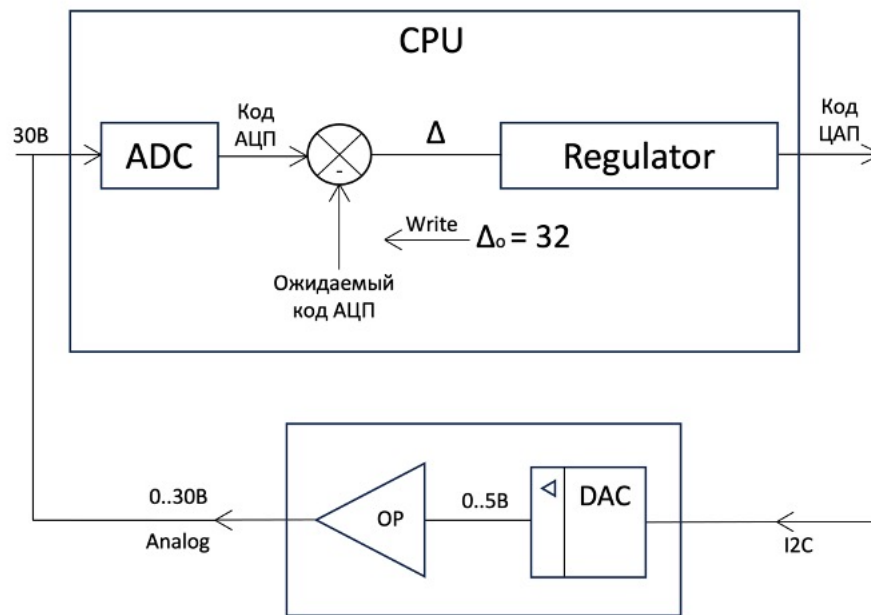


Рисунок 2.5 — Механизм цифровой подстройки напряжений на канале при помощи микроконтроллера.

Отметим, что микроконтроллер занимается только сравнением и выставлением соответствующего кода ЦАП, калибровка и преобразования находится на стороне ПО. Это позволяет убрать сложные процессы пересчёта из прошивки микроконтроллера, что разгружает электронику как в области производительности, так и в области памяти.

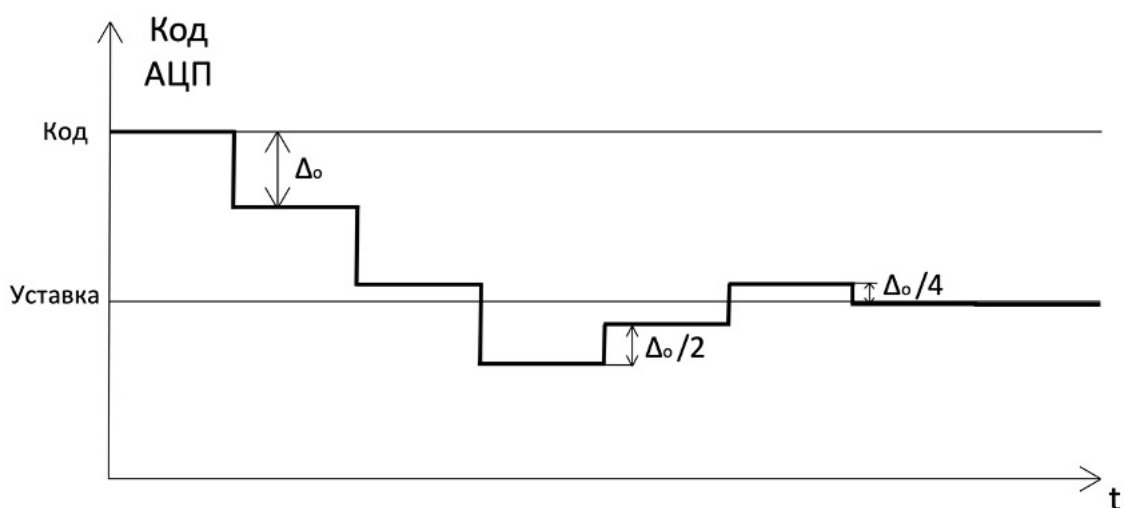


Рисунок 2.6 — Зависимость выходного напряжения схемы от времени, за Δ_0 управляющее воздействие в 32 единицы, деление на два осуществляется путём битового сдвига на 1

2.1.4 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 2.7.

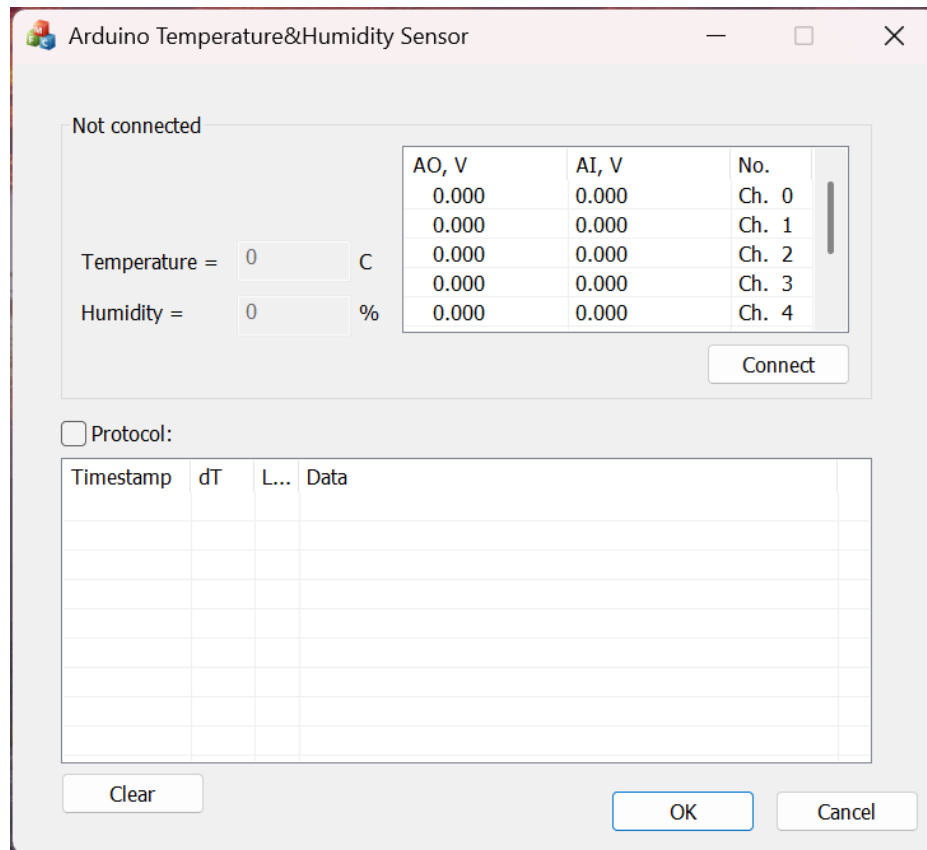


Рисунок 2.7 — Интерфейс программного обеспечения. Основное диалоговое окно без подключения к электронике

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 2.8), 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.

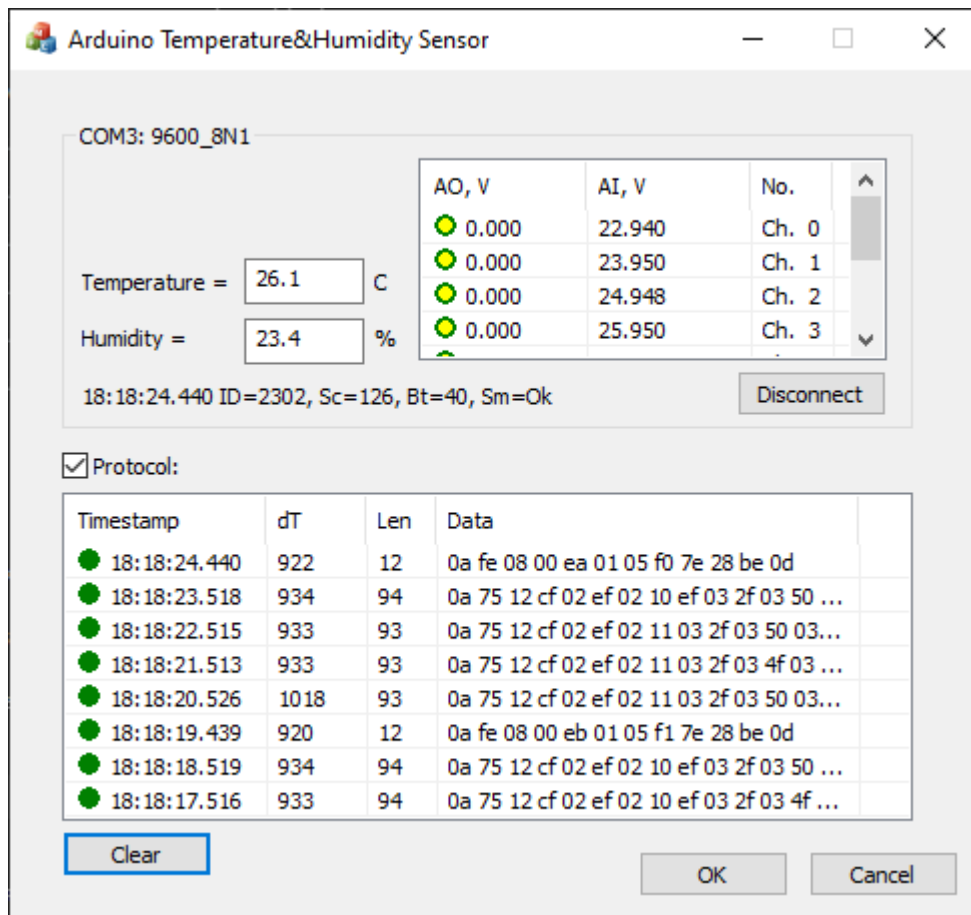


Рисунок 2.8 — Интерфейс программного обеспечения. Основное диалоговое окно после подключения к электронике

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. 2.9).

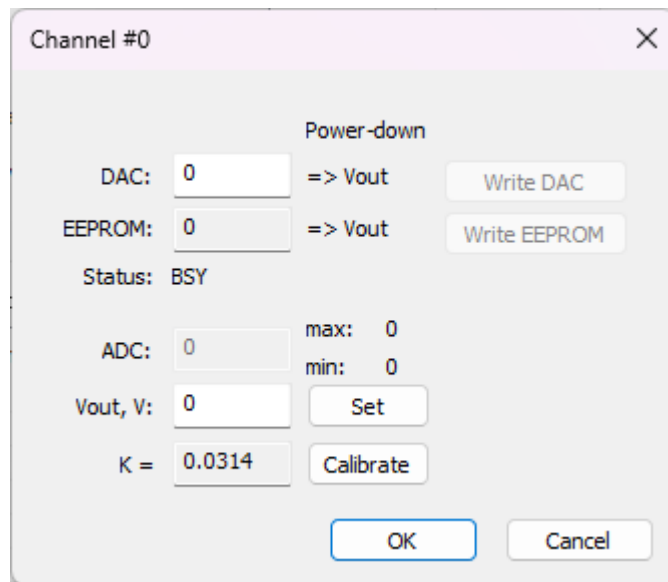


Рисунок 2.9 — Интерфейс программного обеспечения. Основное диалоговое окно управления каналом после подключения к электронике

Для осуществления работы механизма 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 и передаётся через USB интерфейс на микроконтроллер по протоколу USART.

ПО 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 подстройки 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 (взято с большим запасом), а также в том случае, если разница кодов АЦП между соседними измерениями не превышает 4 единицы.

2.2 ТЕСТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЕМ

Тестирование схемы подстройки производилось при помощи установки, применяемой ранее во время подготовки тестового образца. 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.

2.2.1 КАЛИБРОВКА УСТАНОВКИ

Для корректной калибровки каналов важно исследовать поведение АЦП, чтобы алгоритм системы управления выставлял ожидаемое выходное напряжение. При помощи источника питания +30В была получена зависимость напряжения на канале модуля (U_{out}) от кода АЦП. . Максимальное отклонение от прямой составило 30 мВ и обусловлено особенностями работы АЦП последовательного приближения. Коэффициенты аппроксимирующей прямой вводятся в программу в качестве калибровочных для данного канала. Измерения и расчёты проведены для всех восьми каналах установки (рисунки 2.10 и 2.11).

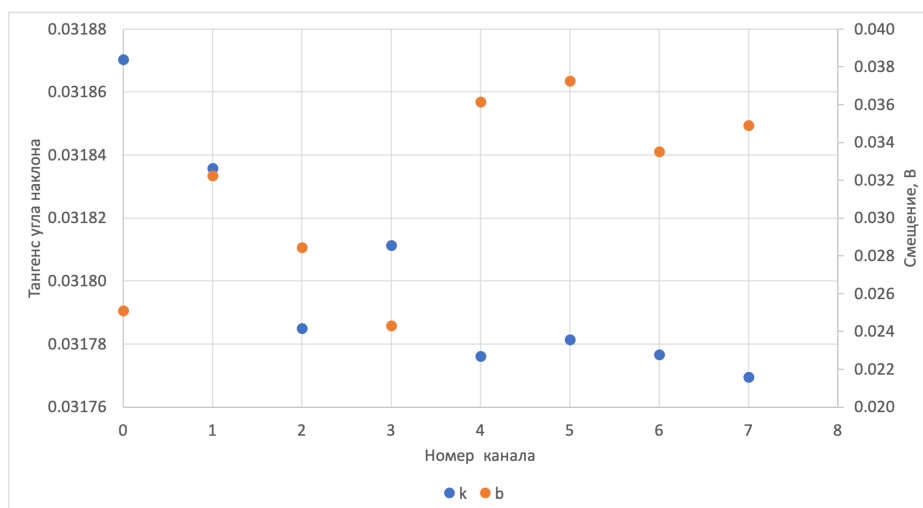
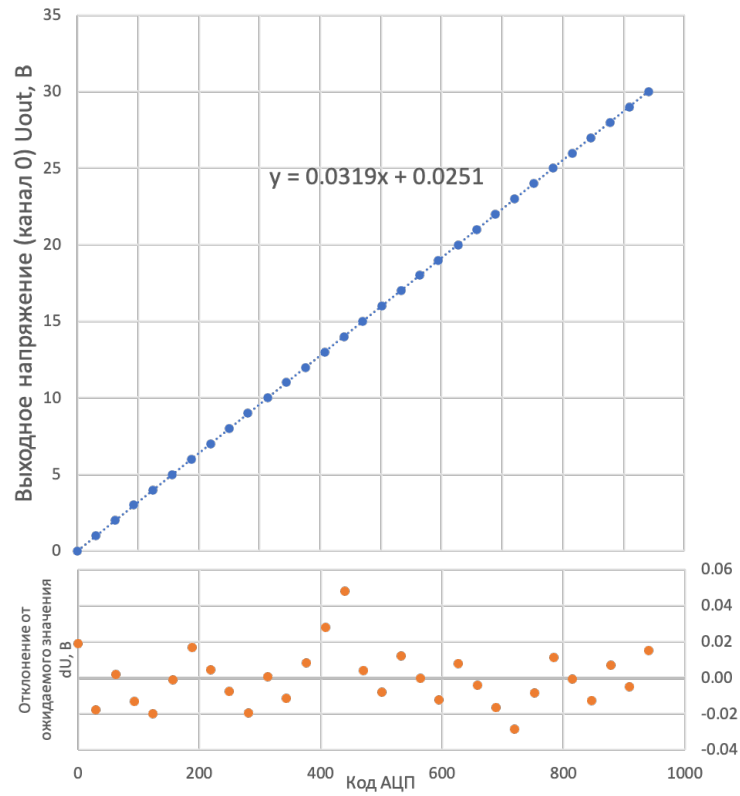
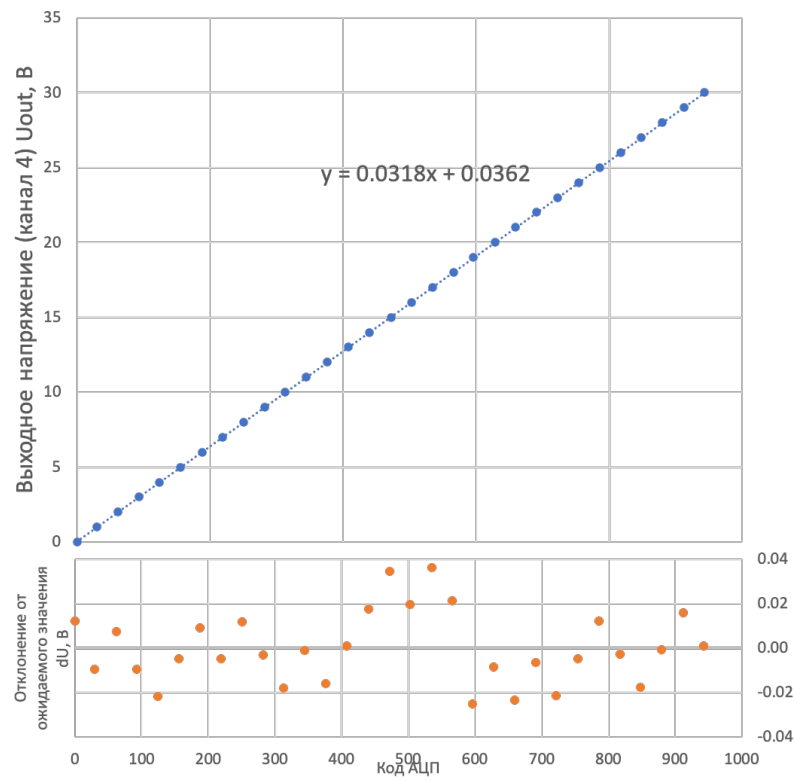


Рисунок 2.10 — Зависимость тангенсов угла наклона и смещений линейной аппроксимации каналов от их номера



а



б

Рисунок 2.11 — Зависимость напряжения на канале (U_{out}) и отклонения выходного напряжения от ожидаемого значения, полученное из линейной аппроксимации при помощи МНК, в зависимости от кода АЦП для каналов 0 (а) 4 (б)

Из рисунка 2.10 видно, что тангенсы угла наклона (на графике отмечены синими точками) имеют достаточно близкие значения (наибольшее отклонение величины не превышает 0.3%), что говорит об относительно линейной характеристике каналов. В то же время, наблюдается значительный разброс коэффициентов смещения калибровочной прямой (наибольшее отклонение величины составляет 53%). Подобный разброс связан в первую очередь с неоднородностью напряжения смещения операционных усилителей, которое в том числе и позволяет убрать такая калибровка.

Линейность калибровочных прямых оказывается очень высокой, отклонение от ожидаемого значения составляет в среднем 20 мВ, что соответствует не более одному каналу АЦП (см. рис. 2.11). Заметим, что зависимость отклонения выходного напряжения от ожидаемого значения от кода АЦП в отличие от тестовых образцов (рис. 2.12) носит характер затухающего синуса. Для всех каналов наблюдается наличие явного пика при значении кода АЦП, равному 500 (1/2 кодов АЦП), для распределения отклонения выходного напряжения от ожидаемого значения. Такой феномен связан с принципом работы АЦП последовательного приближения.

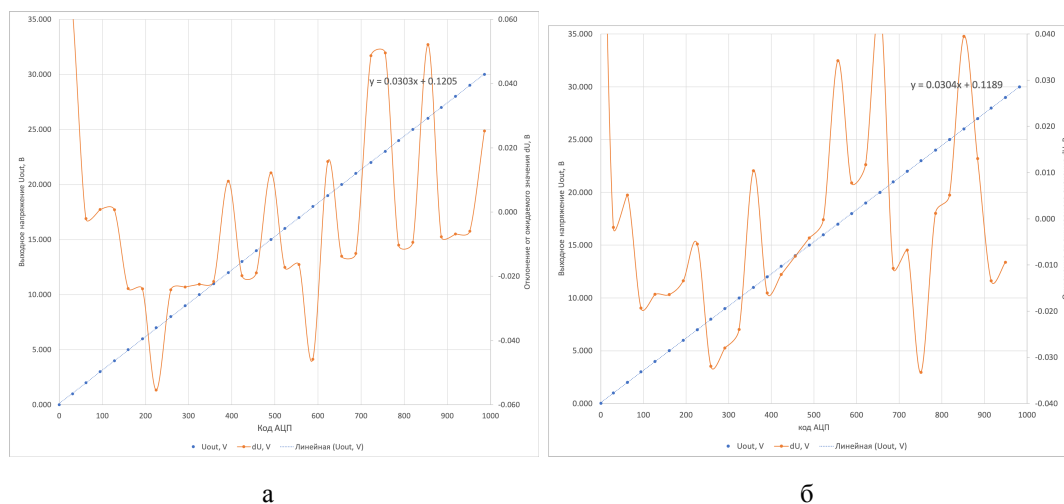


Рисунок 2.12 — Зависимость напряжения на канале (U_{out}) и отклонения от ожидаемого значения, полученное из линейной аппроксимации при помощи МНК, в зависимости от кода АЦП для канала 1 (а) и 2 (б)

2.2.2 ТЕСТИРОВАНИЕ НА КАНАЛАХ МАКЕТА ПЭТ

Чтобы убедиться в применимости представленного решения на практике в качестве тестирования к установке были подключены два различных сцинтилля-

ционных детектора на базе SiPM onsemi FC30035. При одинаковом напряжении питания +27 В были получены амплитудные спектры Cs-137, для которых разброс положений пика оказался на уровне 20% (см. таблицу 2.1).

Заметим, что после подстройки напряжения для одного из детекторов энергетическое разрешение не ухудшилось (отклонение не более 1%), что также подтверждает отсутствие негативного влияния системы управления напряжением на работоспособность детекторов (в частности на их разрешающую способность).

Таблица 2.1 — Положение пика и энергетическое разрешение для различных сцинтилляционных детекторов на базе SiPM onsemi FC30035 до и после подстройки напряжений

Детектор	Напряжение питания, В	Положение пика, ADCu	Энергетическое разрешение, %
1	27.0	180	10
2	27.0	138	12
2 (после подстройки)	27.4	178	11

2.3 ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО ГЛАВЕ

Таким образом была разработана восьмиканальная система управления напряжением с заземлённым электродом для кремниевых фотоумножителей. Для корректной работы алгоритма регулятора была проведена калибровка, проведён анализ полученных коэффициентов. Показано, что отклонение выходного напряжения от ожидаемого значения составляет в среднем 20 мВ (не более одного кода АЦП). Возможные пики в отклонении от ожидаемого значения соответствуют особенности работы используемого АЦП.

Полученная калибровка позволяет перейти к большему числу испытаний, в частности исследованию помехоустойчивости системы управления напряжением.

3 ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Как было упомянуто выше, существует два основных подхода для управления напряжением на кремниевых фотоумножителях: управление низким потенциалом при фиксированном высоком потенциале, а также управление высоким потенциалом при наличии общей земли. Так как предложенная нами система управления напряжением способна функционировать для обеих идеологий питания кремниевых фотоумножителей, было принято решение исследовать, как включение модуля влияет на помехоустойчивость установки в целом.

3.1 ПОДГОТОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Чтобы исследовать помехоустойчивость системы управления напряжением в зависимости от её способа включения было принято решение обратиться к соответствующему стандарту на такие измерения. Согласно документу ГОСТ CISPR 16-2-4—2017 [25], измерение помехоустойчивости осуществляется по схеме, представленной на рисунке 3.1.

При проведении испытаний на открытой площадке (неэкранированная комната, без облицовки поглощающими материалами) на испытуемое оборудование (ИО) подаётся полезный сигнал, который в нашем случае представляет собой свет со светодиода в синем (близким к ультрафиолетовому) диапазоне. Помимо полезного также подаётся мешающий сигнал в диапазоне от 0.15 до 150 МГц, который формирует однородное электромагнитное поле в области испытаний. В качестве помехи использовался паразитный сигнал на частоте 96 МГц. В качестве метрики оценки качества функционирования ИО было принято решение оценить амплитудное разрешение кремниевого фотоумножителя, получив на нём однофотонный спектр.

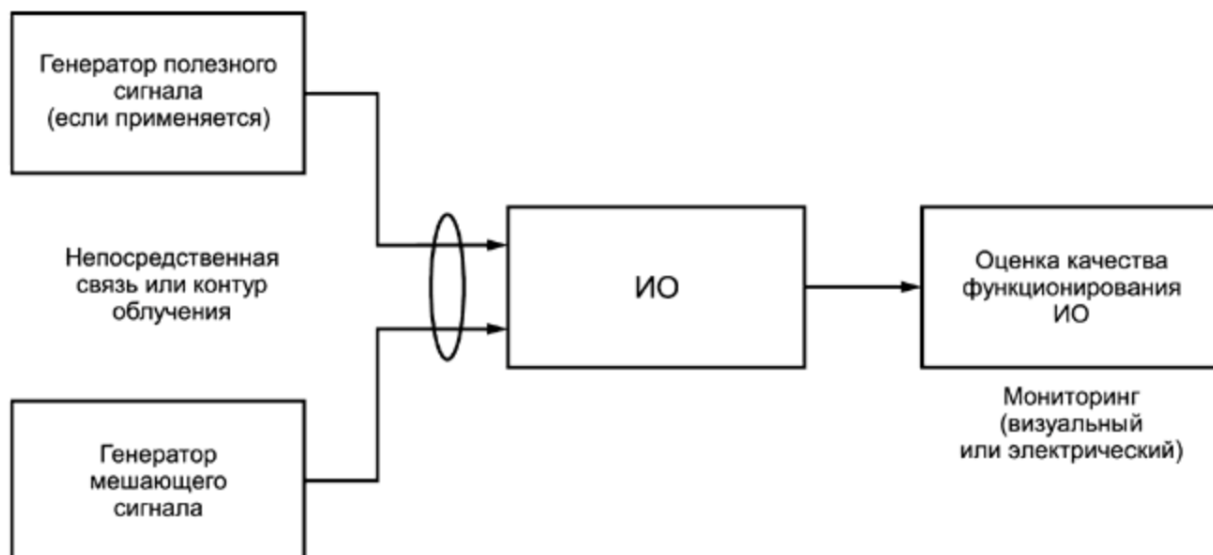


Рисунок 3.1 — Основная концепция измерения помехоустойчивости согласно ГОСТ CISPR 16-2-4—2017 [25]

3.2 УПРАВЛЕНИЕ НИЗКИМ ПОТЕНЦИАЛОМ

Наиболее распространённым методом управления напряжением на SiPM является метод подстройки низкого потенциала при фиксированном высоком. При таком способе включения система управления оперирует более низкими напряжениями, благодаря чему появляется дополнительная возможность упрощения внедрения цифрового управления в целом, так как оно не будет требовать изощрённых методов для работы с высокими (относительно, например, TTL-логики) напряжениями.

3.2.1 ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Для измерения помехоустойчивости была собрана установка, представленная на рисунке 3.2. В чёрном ящике размещается кремниевый фотоумножитель onsemi $1 \times 1 \text{ мм}^2$, который облучается светодиодом подключённым к генератору Tektronix. SiPM запитывается через плату питания от импульсного источника +30В в качестве высокого потенциала, а также через систему управления напряжением на низкий потенциал. Результирующее напряжение на детекторе составило +27 В, соответствующее оптимальному рабочему для данной серии. Сигнал

с кремниевого фотоумножителя подаётся на осциллограф LeCroy, который также служит и для оцифровки сигнала и позволяет получать амплитудный спектр. В качестве помехи использовался внешний паразитный амплитудно-модулируемый сигнал частотой 96 МГц.

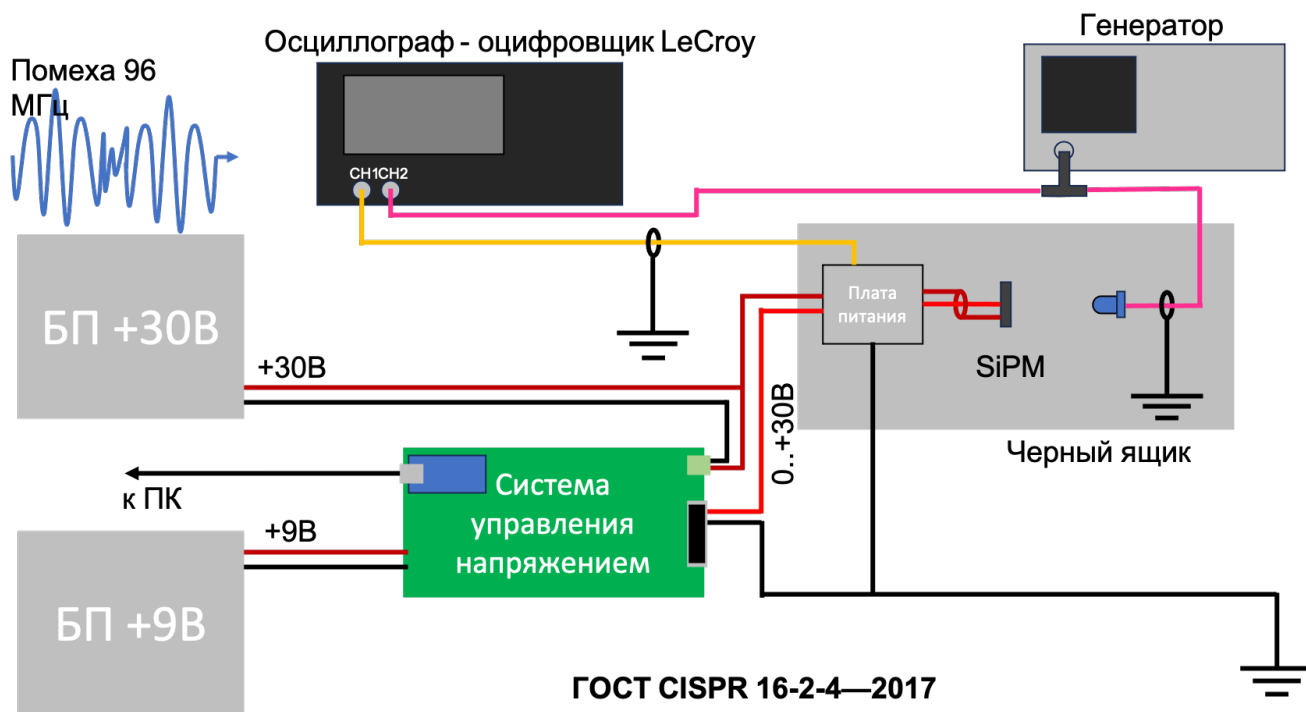


Рисунок 3.2 — Схема установки для измерения помехоустойчивости системы управления напряжением при подключении к нижнему потенциалу

3.2.2 РЕЗУЛЬТАТЫ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ

Получение однофотонного спектра с полной полосой пропускания осциллографа и в отсутствии шумоподавления для изучаемой конфигурации оказалось невозможным из-за величины помехи в сравнении с амплитудой сигнала. При ограничении полосы пропускания в 20 МГц и величине шумоподавления +3 дБ был получен спектр, представленный на рисунке 3.3.

Из расчёта получено, что для такого способа управления питанием SiPM амплитудное разрешение составило $A_{\text{res}} = 37.6 \pm 2.4\%$.

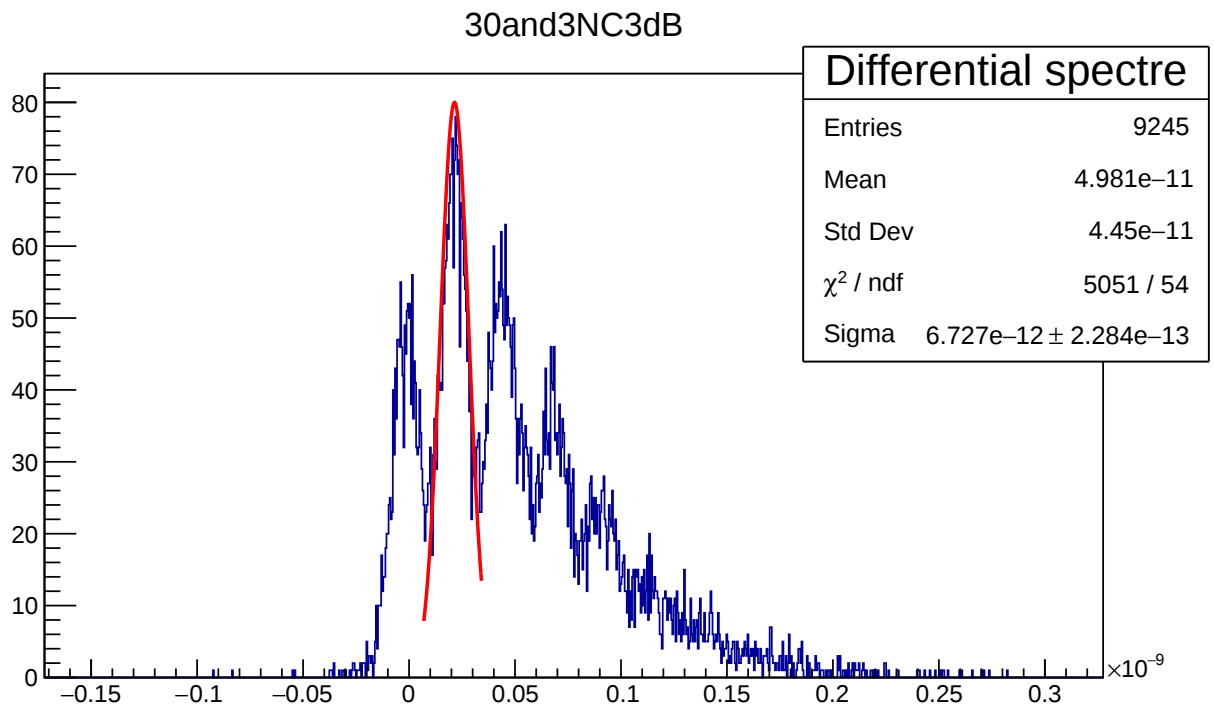


Рисунок 3.3 — Однофотонный спектр с кремниевого фотоумножителя onsemi $1 \times 1 \text{ мм}^2$, при управлении низким потенциалом с полосой пропускания осциллографа 20 МГц и шумоподавлением +3 дБ.

3.3 УПРАВЛЕНИЕ ВЫСОКИМ ПОТЕНЦИАЛОМ

В отличие от метода управления низким потенциалом, управление высоким потенциалом заметно меньше распространено в качестве способа подстройки напряжений на кремниевых фотоумножителях. В связи с тем, что такой способ требует работоспособности в полном диапазоне напряжений $0 \div 30 \text{ В}$, требования к электронной базе оказываются значительно выше и требуют более серьёзных техник для осуществления управления.

В то же время управление высоким потенциалом предполагает наличие заземлённого электрода. Это позволяет применять различные фильтрующие каскады, избавляясь от различных помех, приходящих по питанию. Применяемые в системе управления операционные усилители в таком включении также полноценно служат дифференциальным фильтром, то также позволяет ликвидировать нежелательные сигналы.

3.3.1 ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Для измерения помехоустойчивости такой установке собрана установка, аналогичная предыдущей, представленная на рисунке 3.4. В чёрном ящике размещается кремниевый фотоумножитель onsemi $1 \times 1 \text{ мм}^2$, который облучается светодиодом подключённым к генератору Tektronix. Однако в данном случае система управления напряжением работает в своём полном диапазоне $0 \div 30 \text{ В}$, а второй электрод кремниевго фотоумножителя оказывается заземлён. Результирующее напряжение на SiPM составило $+27 \text{ В}$, соответствующее оптимальному рабочему для данной серии. Сигнал с кремниевго фотоумножителя также подаётся на осциллограф LeCroy, который оцифровывает сигнал и позволяет получать амплитудный спектр. В качестве помехи использовался внешний паразитный амплитудно-модулируемый сигнал частотой 96 МГц .

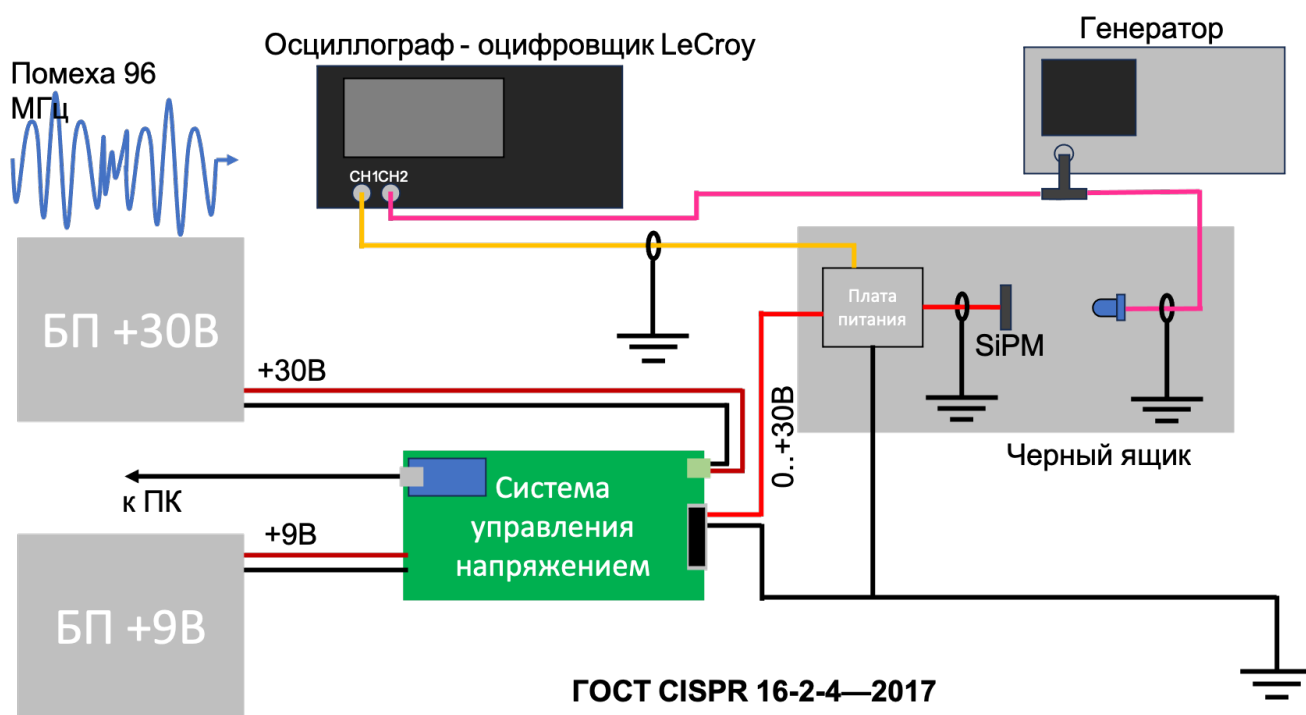


Рисунок 3.4 — Схема установки для измерения помехоустойчивости системы управления напряжением при подключении к высокому потенциалу.

3.3.2 РЕЗУЛЬТАТЫ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ

В отличие от предыдущего случая, для полной полосы пропускания осциллографа в отсутствие шумоподавления был получен однофотонный спектр, представленный на рисунке 3.5. Из полученных данных было рассчитано амплитудное

разрешение кремниевого фотоумножителя при применении системы управления напряжением для подстройки высокого потенциала, которое составило $A_{\text{res}} = 34.3 \pm 0.9\%$.

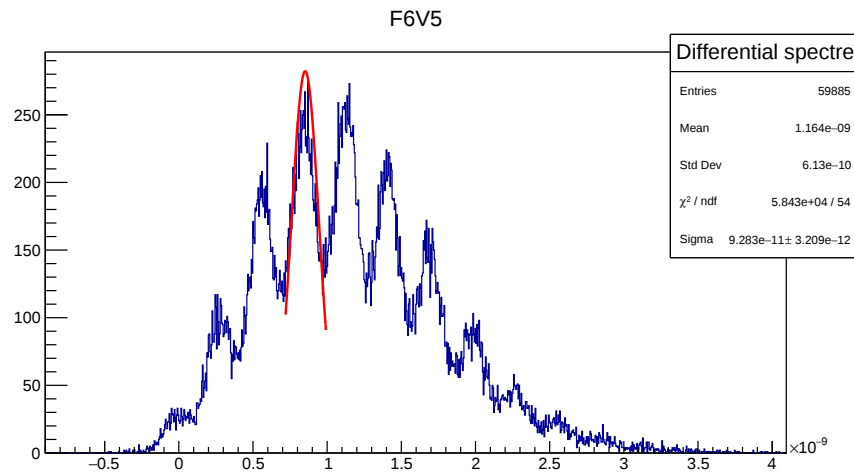


Рисунок 3.5 — Однофотонный спектр с кремниевого фотоумножителя onsemi $1 \times 1 \text{ мм}^2$, при управлении высоким потенциалом с полной полосой пропускания осциллографа и без шумоподавления

В то же время для более корректного сравнения при ограничении полосы пропускания до 20 МГц и с шумоподавлением +3 дБ был получен однофотонный спектр для системы управления, подключенной к высокому потенциалу, представленный на рисунке 3.6. В условиях, аналогичных для измерения помехоустойчивости системы управления напряжением, подключенной к низкому потенциалу, из полученных данных было рассчитано амплитудное разрешение кремниевого фотоумножителя, которое составило $A_{\text{res}} = 12.7 \pm 0.4\%$.

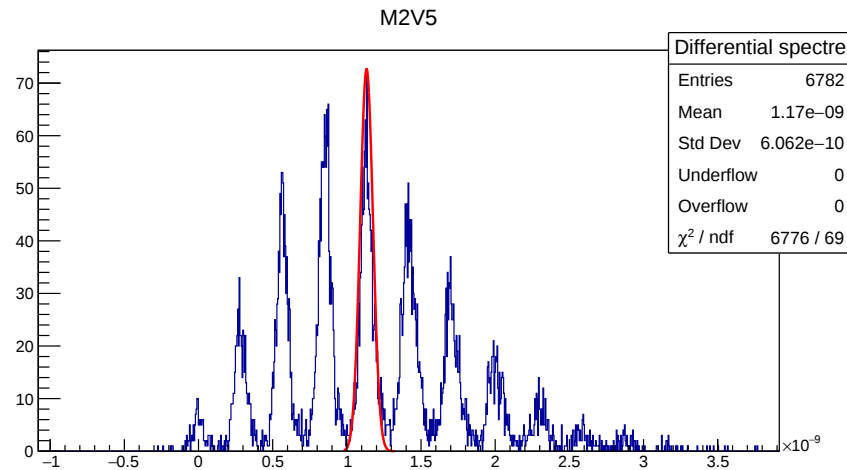


Рисунок 3.6 — Однофотонный спектр с кремниевого фотоумножителя onsemi $1 \times 1 \text{ мм}^2$, при управлении высоким потенциалом с полосой пропускания осциллографа 20 МГц и шумоподавлением +3 дБ.

3.4 СРАВНЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Рассмотрим полученные результаты амплитудного разрешения для кремниевого фотоумножителя onsemi $1 \times 1 \text{ мм}^2$, представленные в таблице 3.1.

Таблица 3.1 — Результаты измерения амплитудного разрешения кремниевого фотоумножителя onsemi $1 \times 1 \text{ мм}^2$ для двух методов управления напряжением

Параметр	Подстройка низкого потенциала		Подстройка высокого потенциала	
	Нет	Да	Нет	Да
Шумоподавление	Нет	Да	Нет	Да
Амплитудное разрешение, %	-	37.6	34.3	12.7
Ошибка, %	-	2.4	0.9	0.4

Из полученных в результате измерений и расчёта данных заметим, что даже при наличии фильтрации входных данных мощностями осциллографа-оцифровщика амплитудное разрешение кремниевого фотоумножителя при управлении низким потенциалом оказывается хуже, чем таковое для управления высоким потенциалом без фильтрации по абсолютной величине на 3%. В свою очередь в эквивалентных условиях при наличии шумоподавления +3 дБ и ограничении полосы пропускания осциллографа до 20 МГц амплитудное разрешение при наличии

общей земли по абсолютному значению оказывается лучше на 25%, что в относительных величинах на 50% меньше относительно случая управления низким потенциалом.

Таким образом, мы показали, что наличие общей земли позволяет наиболее эффективно справляться с подавлением помех, что значительно понижает требования к электронике переднего края детектирующих систем. Результаты измерения помехоустойчивости системы управления напряжением позволяют внедрять и тестировать модуль измерения тока на каналах.

4 ПРОТОТИП МОДУЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТОКА НА КАНАЛАХ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЕМ НА КРЕМНИЕВЫХ ФОТОУМНОЖИТЕЛЯХ

Важным элементом безопасности и оценки работоспособности детекторов в системах управления напряжением является наблюдение за потребляемым током на каналах. Мониторинг данного параметра позволяет судить о работоспособности детекторов в многоканальной сборке и служит маркером для необходимости ремонта или замены детектора. Также слежение за током позволяет обнаруживать возможную паразитную засветку детекторов.

В качестве решения был разработан прототип модуля измерения потребляемого тока на канале системы управления напряжением по высокому потенциалу. Рассмотрим систему более детально.

4.1 ТРЕБОВАНИЯ К ИЗМЕРИТЕЛЮ ТОКА

В рабочем режиме потребление тока на кремниевых фотоумножителях находится на уровне до нескольких десятков микроампер, из-за чего большинство стандартных методов измерения тока оказывается непригодными. Так, например, удобный для проведения цифровых измерений метод шунтирования оказывается неподходящим для таких малых токов из-за высокой температурной зависимости, что ведёт также к нелинейностям измерительной шкалы, непосредственного влияния на работу системы управления напряжением, а также отсутствия гальванической развязки, что не позволит производить качественные измерения и мониторинг. Использование обычного микроамперметра в качестве решения также не представляется возможным в связи с необходимостью отслеживать потребляемый ток на каждом канале системы. В то же время текущее значение тока необ-

ходимо также передавать в приложение для предотвращения возможных проблем с детекторами.

Таким образом, для измерения тока требуется разработать схему, преобразующую его в разность потенциалов на базе шунта с низким температурным дрейфом. Для выравнивания напряжений до необходимого для измерения уровня необходимо усиление при помощи каскада на базе операционных усилителей и биполярного транзистора. Измерение результирующего напряжения для возможности передачи данных на ПО возможно при помощи встроенного в ATmega328P АЦП.

4.2 ПРОТОТИП ИЗМЕРИТЕЛЯ ТОКА

Для решения поставленной задачи с учётом представленных требований был разработан прототип модуля измерения потребляемого тока, представленный на рисунке 4.1.

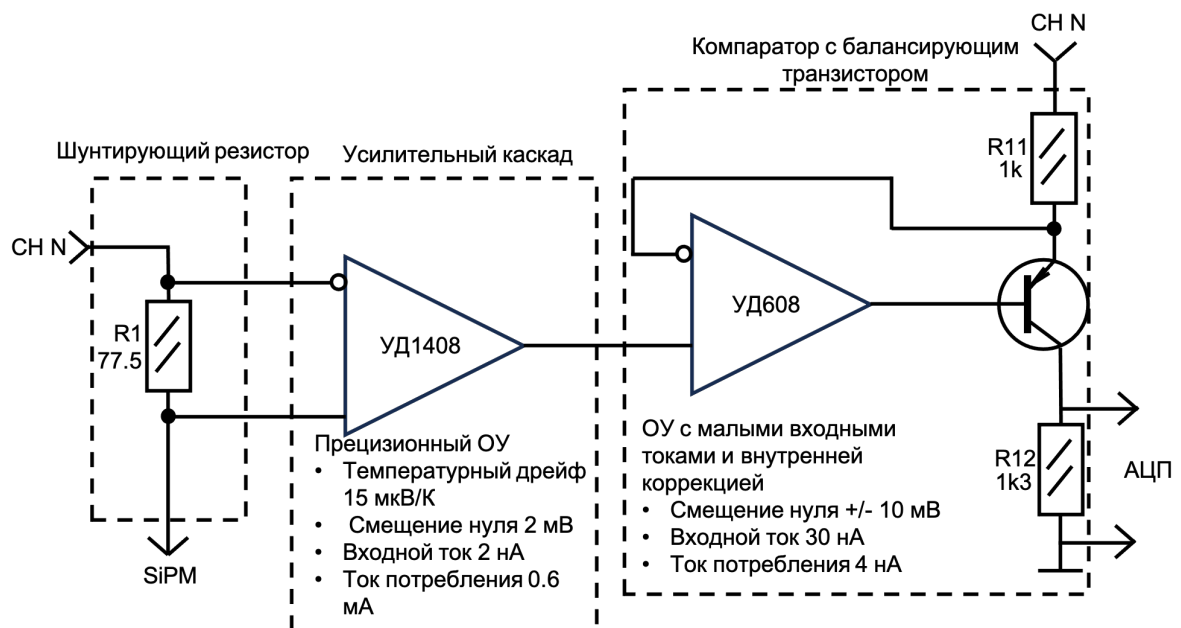


Рисунок 4.1 — Функциональная схема прототипа модуля измерения потребляемого тока на канале системы управления

На вход CH N модуля подаётся напряжение с одного из каналов системы управления. Напряжение питания уходит на SiPM через шунтирующее сопротивление R_1 , роль которого преобразовать ток в измеряемое падение напряжения. Полученная дифференциальная составляющая подаётся на усилительный каскад,

усиление на котором численно составляет $K = 13.5$. Полученное усиленное напряжение подаётся на компараторный каскад, где сравнивается с падением напряжения на резисторе R_{11} , в результате чего за счёт транзистора происходит балансировка, и ток эмиттера i_e (и как следствие ток коллектора i_c) оказываются также пропорциональны потребляемому току на канале, т.е. операционный усилитель с транзистором в каскаде образуют управляемый источник тока. Ток коллектора протекает через сопротивление R_{12} и падение напряжения на нём линейно зависит от потребляемого на канале тока и находится в диапазоне $0 \div 1$ В, что соответствует току SiPM 0-1 мА. Такую разность потенциалов можно измерять вольтметром или при помощи АЦП, встроенного в микроконтроллер. Рассмотрим модули установки более подробно.

4.2.1 ПОДБОР ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

Важным критерием при подборе операционных усилителей для модуля измерения тока является минимизация искажений измеряемой величины. Поэтому необходимо подобрать компоненты с малыми входными токами, низким температурным дрейфом и напряжением смещения. Комбинация этих требований позволяет получить наилучшую точность измерений и, в конечном счёте, обеспечить надёжную защиту кремниевых фотоумножителей.

В качестве усиливающего каскада в прототипе применён прецезионный операционный усилитель КР140УД1408. За счёт малого входного тока 2 нА, низкой потребляемой мощности (ток потребления составляет 0.6 мА), а также высокой температурной стабильности $15 \mu\text{В}/^\circ\text{C}$ искажения измеряемой величины минимизируются как со стороны внешних, так и внутренних факторов. Для защиты операционного усилителя от возможного короткого замыкания на выходе собран резистивный делитель $R_5 : R_6$.

Для компараторного каскада по соответствующей логике был подобран операционный усилитель КР140УД608, обеспечивающий малые входные токи (до 30 нА), малый ток потребления и напряжение смещения.

В свою очередь заметим, что для финального решения предполагается использование применяемых в системе управления напряжением операционных усилителей, так как их характеристики не хуже и даже превосходят применённые в макетировании.

4.2.2 ПОДБОР БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

В качестве биполярного транзистора требовалось подобрать компонент с высоким коэффициентом усиления, чтобы ток коллектора i_c был наиболее близок к току эмиттера i_e . В то же время было важно сохранить высокую температурную стабильность модуля. Для макетирования был подобран биполярный pnp-транзистор с коэффициентом усиления $h_{21e} = 167$, поэтому оказывается справедливым равенство токов $i_e = i_c$:

$$i_e = i_c + i_b = h_{21e} \cdot i_b + i_b = (h_{21e} + 1) \cdot i_b$$

$$h_{21e} = 167 \gg 1 \Rightarrow i_e \approx h_{21e} \cdot i_b = i_c$$

Таким образом, измерение преобразованного в напряжение на шунтирующем сопротивлении R_{12} тока коллектора оказывается справедливым и пропорциональным потребляемому каналом току.

4.3 ТЕСТИРОВАНИЕ МОДУЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТОКА

Чтобы протестировать работоспособность модуля измерения тока с интервалом в один час получены зависимости падения напряжения на шунте от протекающего через него тока при повышении и понижении потребляемого на канале тока, а также соответствующие отклонения от ожидаемого значения, представленные на рисунке 4.2.

Для полученных из линейной аппроксимации коэффициентов отклонение ожидаемого напряжения от истинного составило в среднем не более 2 мВ, что позволяет говорить о точности измерения тока на уровне 0.5 мкА.

Таким образом, для текущая конфигурация прототипа показывает линейную зависимость и даёт возможность внедрения цифрового измерения потребляемого на канале тока с точностью 0.5 мкА. В области низких токов обнаруживается явное ухудшение точности измерений, что связано с особенностями работы каскада при низких входных токах.

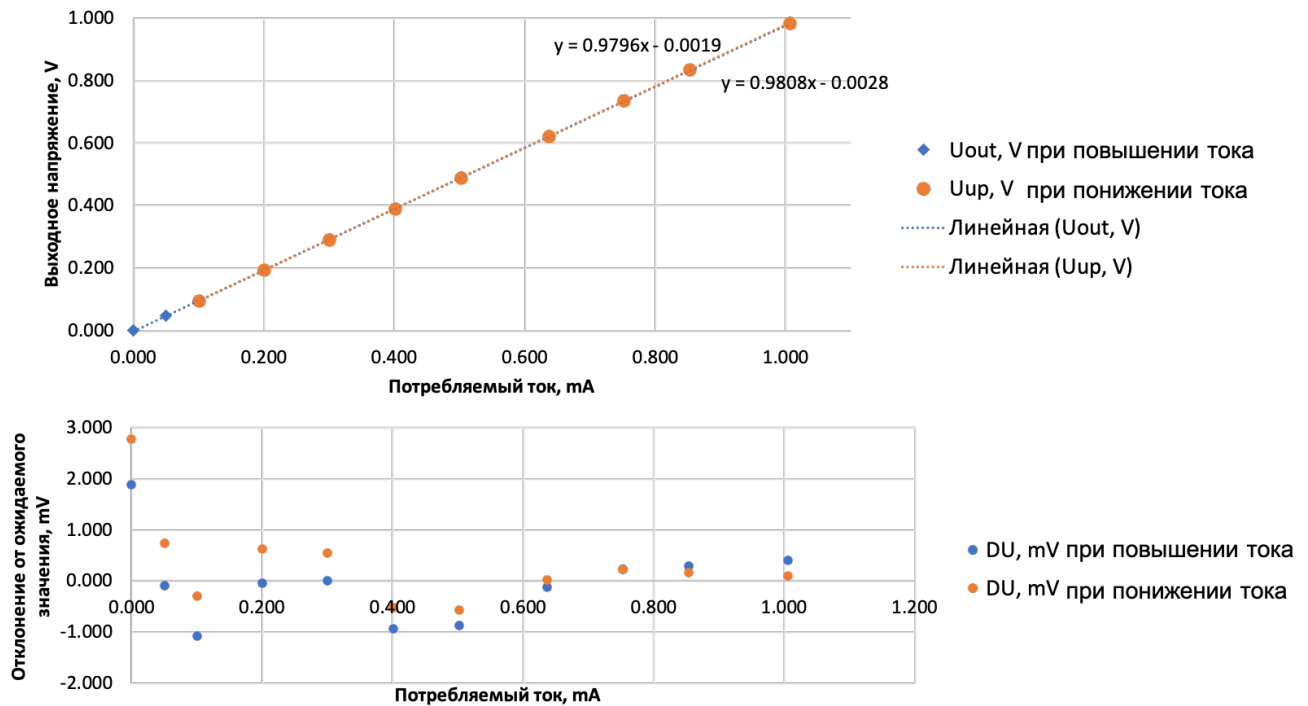


Рисунок 4.2 — Зависимость падения напряжения на шунте от протекающего через него тока с интервалом времени в 1 час при повышении и понижении потребляемого на канале тока

4.4 ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО ГЛАВЕ

Таким образом, в ходе разработке был представлен прототип модуля измерителя тока на базе амперметра, основанного на шунте, усиливающим и сравнивающим каскадах, построенных на базе прецезионных операционных усилителей и транзистора.

Модуль позволяет измерять потребляемый ток со средним отклонением от ожидаемого значения не более 0.5 мкА. Более низкая точность измерения при малых токах связана с особенностями работы каскада и не будет сказываться на точность в рабочем режиме

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная работа посвящена рассмотрению вопроса неоднородности отклика многоканальных детектирующих систем из сцинтиляционных детекторов на кремниевых фотоумножителей. Для решения проблемы исследовалась индивидуальная подстройка напряжений на каналах детектирующих установок. Представлен 8-канальный источник питания с заземлённым электродом для кремниевых фотоумножителей, а также прототип модуля измерения потребляемого тока на каналах установки.

Для обеспечения работоспособности источника разработан алгоритм управления и подстройки выходного напряжения, ПО для микроконтроллера, а также ПО для ОС Windows для удобного взаимодействия с электроникой источника.

Проведена калибровка системы управления напряжением, получено отклонение от ожидаемого значения не более 30 мВ, что соответствует одному каналу АЦП.

Чтобы убедиться в корректности выбора способа питания произведена проверка помехоустойчивости системы управления напряжением при различных её включениях. Показано, что при управлении высоким потенциалом амплитудное разрешение детектора оказалось лучше в 3 раза.

Для разработанного прототипа модуля измерения потребляемого на каналах тока проведено исследование линейности измерений. Отклонение от ожидаемого значения составило в среднем 0.5 мкА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Characterisation of SiPM radiation hardness for application in hadron calorimeters at FAIR, CERN and NICA / V. Mikhaylov [и др.] // Journal of Instrumentation. — 2020. — Т. 15, № 02. — С. C02005—C02005.
2. Simulation study on photon generation and collection of tower applied to NICA-MPD electromagnetic calorimeter / X. Peng [и др.] // Journal of Instrumentation. — 2022. — Т. 17, № 01. — T01004.
3. A beam–beam monitoring detector for the MPD experiment at NICA / M. Alvarado [и др.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2020. — Т. 953. — С. 163150.
4. Scintillators with silicon photomultiplier readouts for high-energy astrophysics and heliophysics / P. F. Bloser [и др.] // Space Telescopes and Instrumentation 2014: Ultraviolet to Gamma Ray. Т. 9144. — SPIE. 2014. — С. 330—340.
5. PET Prototype Based on Scintillation Detectors GAGG-SiPM Coupled to 32-Channel Petiroc2A Chip / F. Dubinin [и др.] // Physics of Particles and Nuclei Letters. — 2024. — Т. 21, № 4. — С. 715—718.
6. *Lecoq P., Gundacker S.* SiPM applications in positron emission tomography: toward ultimate PET time-of-flight resolution // The European Physical Journal Plus. — 2021. — Т. 136, № 3. — С. 292.
7. *Konotop A., Boyko N.* INSTALLATION FOR TESTING SILICON PHOTOMULTIPLIERS AND SCINTILLATION CRYSTALS // Vestnik natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta «MIFI». — 2023. — Т. 12(3). — С. 143—152.
8. Кремниевый фотоэлектронный умножитель / С. Клемин [и др.] // Электроника: наука, технология, бизнес. — 2007. — Т. 8. — С. 80—86.
9. Silicon Photomultipliers (SiPM), Low-Noise, Blue-Sensitive. — Accessed: 2025-07-23. <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/microc-series-d.pdf>.

10. Silicon Photomultipliers (SiPM), Low-Noise, Blue-Sensitive. — Accessed: 2026-02-03. https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/s14160-1310ps_etc_kapd1070e.pdf.
11. *Piatek S.* Silicon Photomultiplier. Operation, Performance & Possible Applications, 2019. — [Электронный ресурс].
12. FERS-5200: a distributed front-end readout system for multidetector arrays / M. Venaruzzo [и др.] // arXiv preprint arXiv:2010.15688. — 2020.
13. *Рудас М. С., Насникова И. Ю., Матякин Г. Г.* Позитронно-эмиссионная томография в клинической практике // М.: Центральная клиническая больница УДП РФ. — 2007.
14. *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.
15. Позитронная эмиссионная томография в онкогинекологии / Д. Рыжкова [и др.] // Сибирский онкологический журнал. — 2013. — 2 (56). — С. 77—83.
16. *Беляев В., Климанов В.* Физика ядерной медицины: учеб. пособие // М.: НИ-ЯУ МИФИ. — 2012.
17. *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.
18. *Crystals S.-G.* Physical properties of common inorganic scintillators // Saint-Gobain Crystals. — 2007.
19. The digital silicon photomultiplier — Principle of operation and intrinsic detector performance / T. Frach [и др.] // 2009 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record (NSS/MIC). — 2009. — С. 1959—1965.
20. *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.

21. 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.
22. *Акимов Ю. К.* Фотонные методы регистрации излучений. — Дубна : ОИЯИ, 2014. — С. 323.
23. *Sensors C.-S. S.* Silicon Photomultipliers (SiPM), Low-Noise, Blue-Sensitive // On Semiconductor. — 2020.
24. 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.
25. Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods / I. E. Commission [и др.] // CISPR 16. — 2010.