



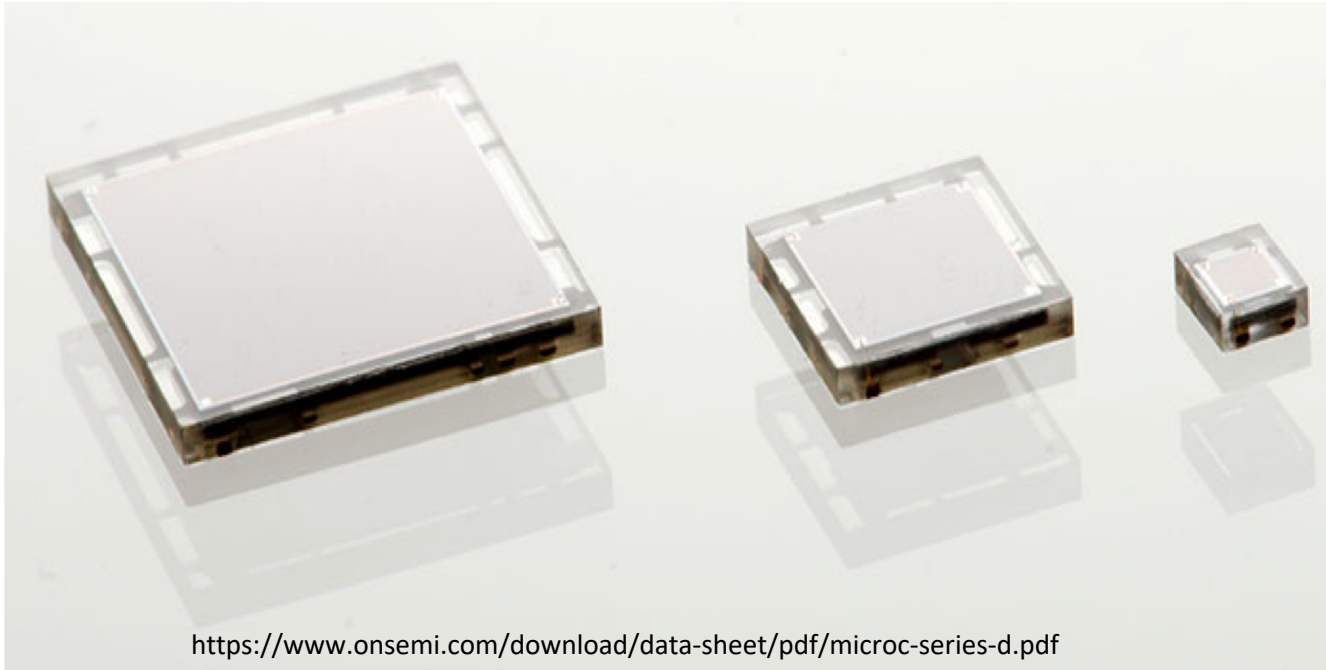
8-канальный источник питания с заземлённым электродом для кремниевых фотоумножителей

Студент: **Конотоп Алексей Давидович**, студент группы М24-112 кафедры №40 «Физика элементарных частиц» ИЯФИТ НИЯУ МИФИ, лаборант-исследователь ЛФРП ОФН НИЦ «Курчатовский институт»

Научный руководитель: **Тетерин Пётр Евгеньевич**, к.ф.-м.н., доцент кафедры №40 «Физика элементарных частиц» ИЯФИТ НИЯУ МИФИ

Научный консультант: **Дубинин Филипп Андреевич**, старший преподаватель кафедры №40 «Физика элементарных частиц», лаборант-исследователь ЛФРП ОФН НИЦ «Курчатовский институт»

Кремниевые фотоумножители (SiPM)

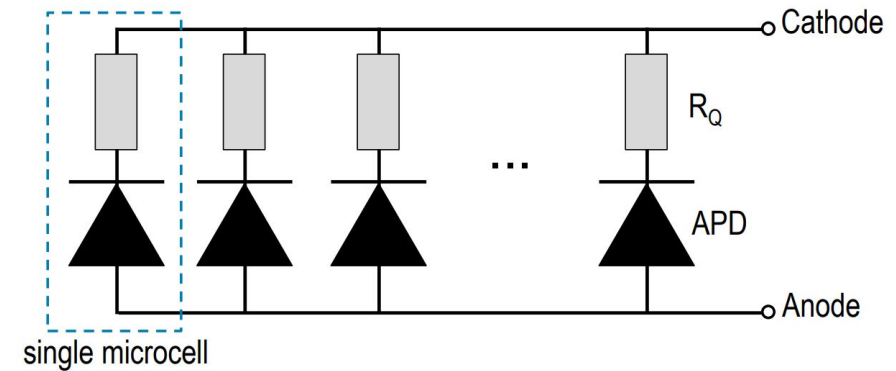


Преимущества:

- Компактность
- Устойчивость к ЭМ излучению
- Высокая эффективность
- Малое рабочее напряжение

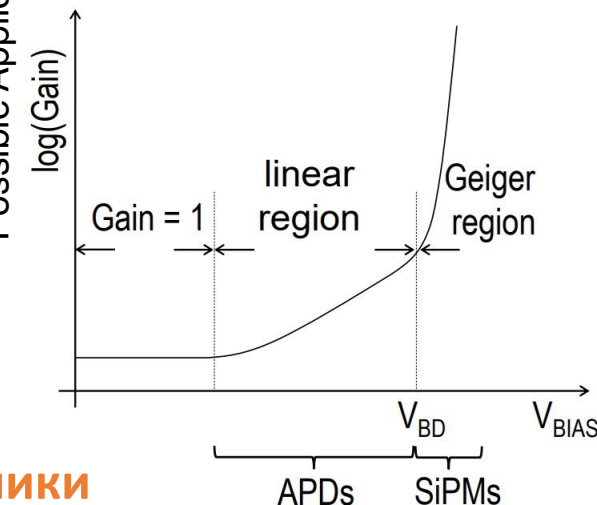
Управление питанием при помощи микроэлектроники

SiPM structure



All of the microcells are connected in parallel

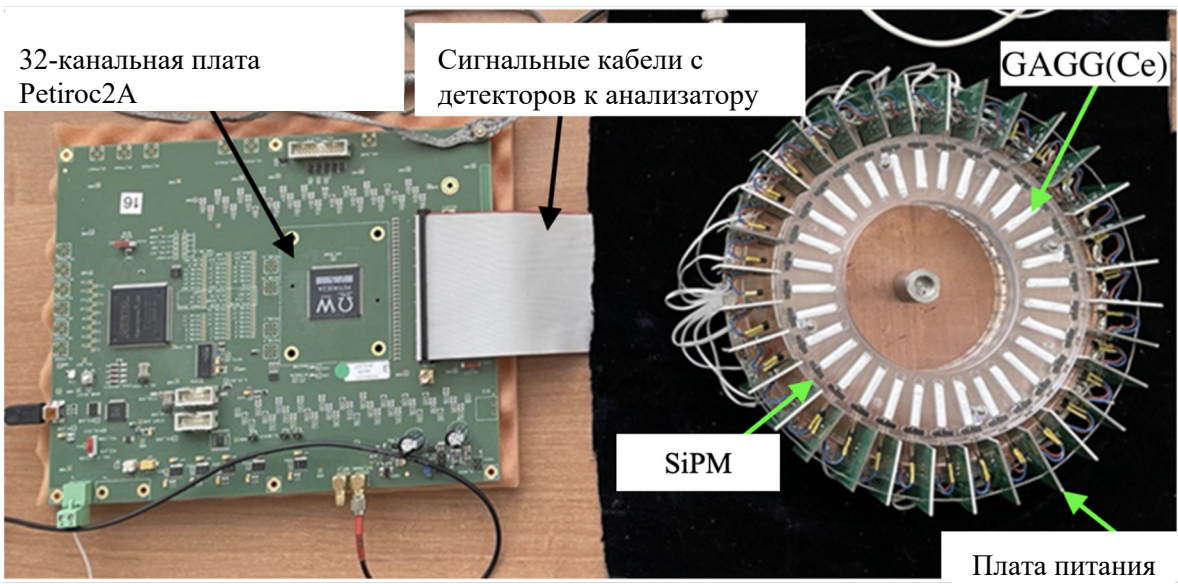
SiPM versus APD



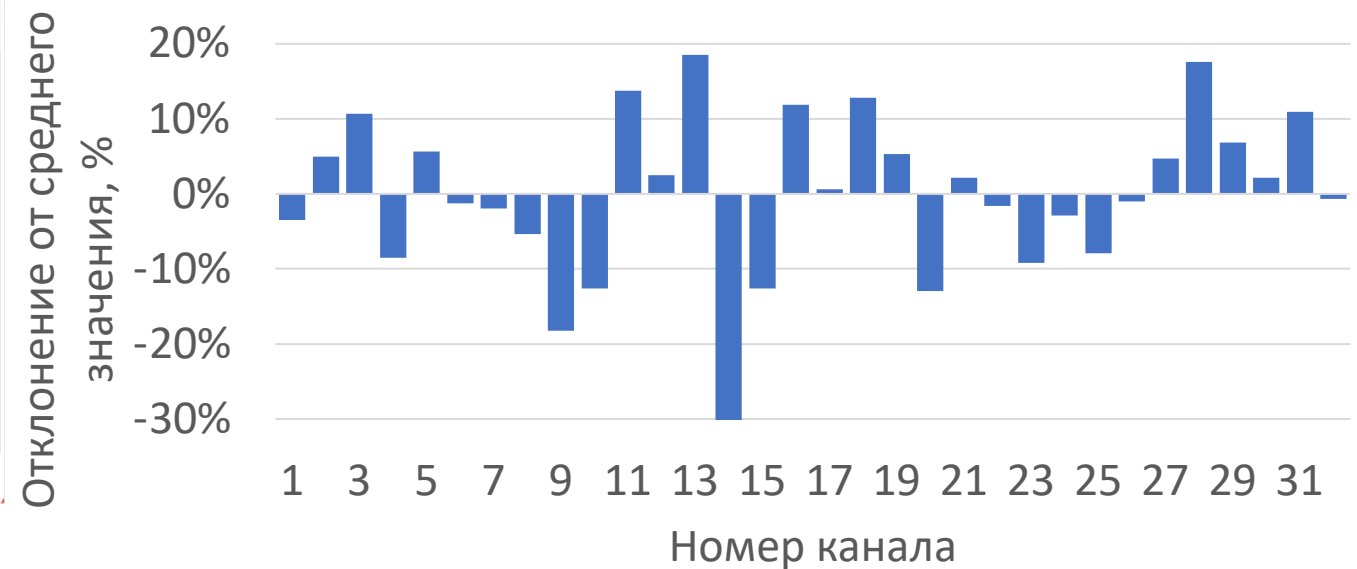
- Differ in construction
- $\text{Gain}_{\text{SiPM}} \gg \text{Gain}_{\text{APD}}$
- $F_{\text{SiPM}} \ll F_{\text{APD}}$

webinar "Silicon Photomultiplier: Operation, Performance & Possible Applications" by Slawomir Piatek

Неоднородность отклика установки



Отклонения положений пика от среднего значения



Фотоприёмник: SiPM Onsemi FC30035

Напряжение пробоя $V_{br} = 24.2 - 24.7$ В

При длине волны 520 нм и перенапряжении 3 В:

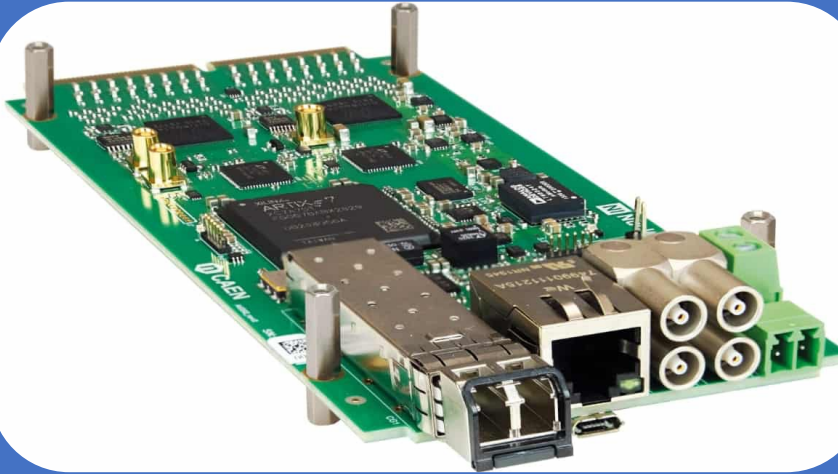
Эффективность регистрации (PDE) = 17%

Усиление = 3×10^6

Ср. положение фотопика = 318 канал АЦП
Разброс значений до 30%

Температурная зависимость напряжения пробоя V_{br}	21.5 мВ/°C
Температурная зависимость усиления	-0.8 %/°C

Методы управления питанием



CAEN FERS DT5202



- простота исполнения
- возможность внедрения цифрового управления

Управление
низким
потенциалом при
фиксированном
высоком



- Слабая помехоустойчивость
- Повышенные требования к фронт-энд электронике

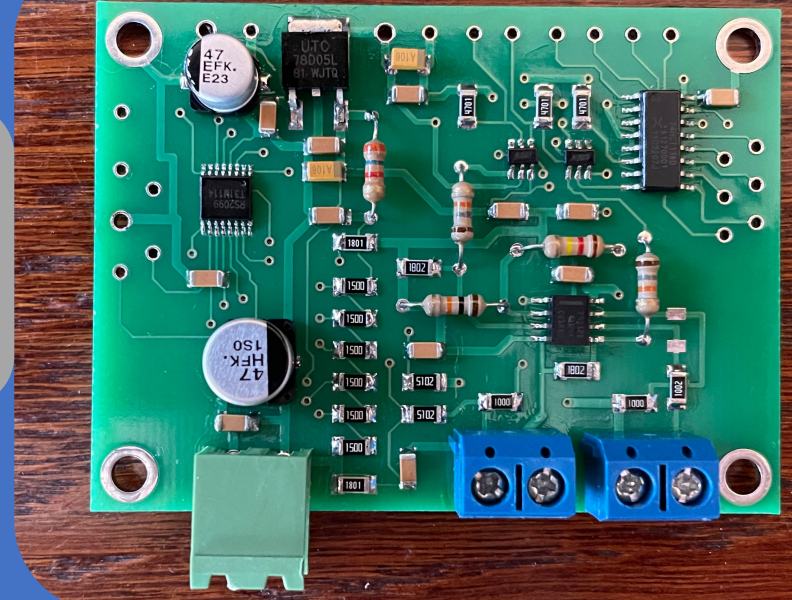


- Высокая помехоустойчивость
- Низкие требования к фронт-энд электронике



- Сложность исполнения
- Высокие требования к электронике

Управление
высоким
потенциалом при
наличии общей
земли



Прототип на 8 каналов

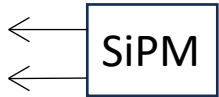
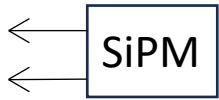
Цели и задачи

Целью работы является разработка многоканальной системы управления напряжением на кремниевых фотоумножителях с индивидуальной настройкой высокого потенциала и привязкой к общей земле.

Для реализации цели поставлены следующие **задачи**:

1. Разработать восьмиканальный прототип установки;
2. Провести анализ линейности системы управления;
3. Провести испытания установки на макете ПЭТ;
4. Исследовать помехоустойчивость прототипа;
5. Разработать прототип модуля измерения тока на каналах;
6. Протестировать модуль изменения тока.

Восьмиканальный модуль подстройки



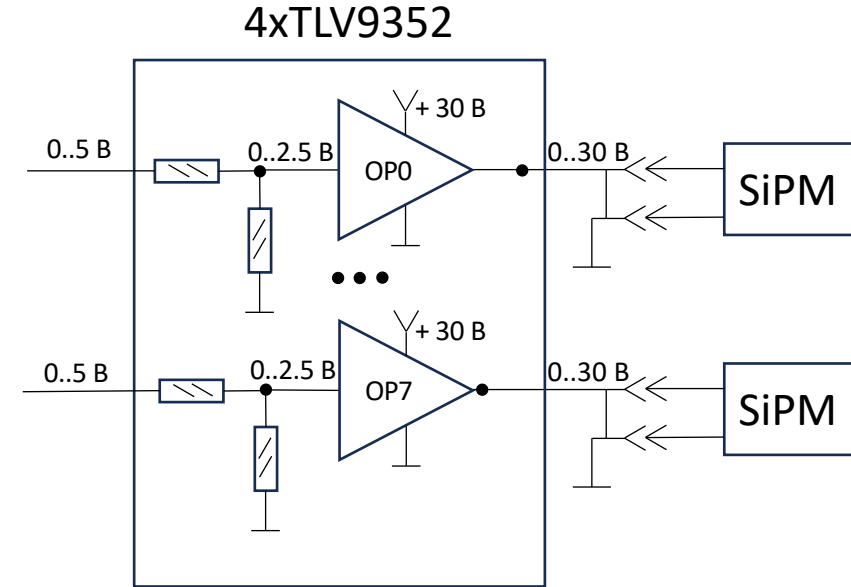
Восьмиканальный модуль подстройки. Операционный усилитель Rail-to-Rail



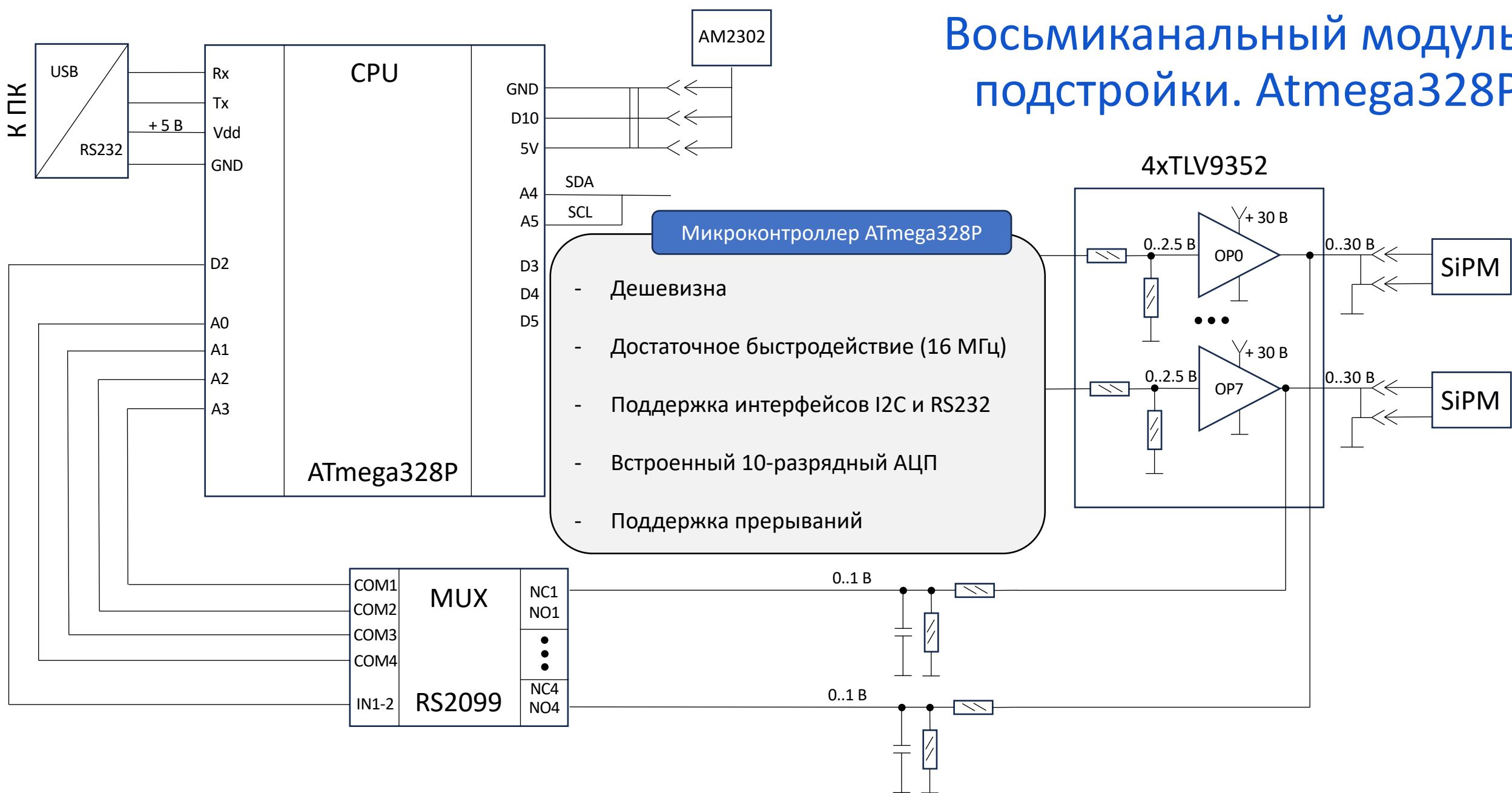
- простота исполнения
- компактность
- возможность внедрения цифрового управления



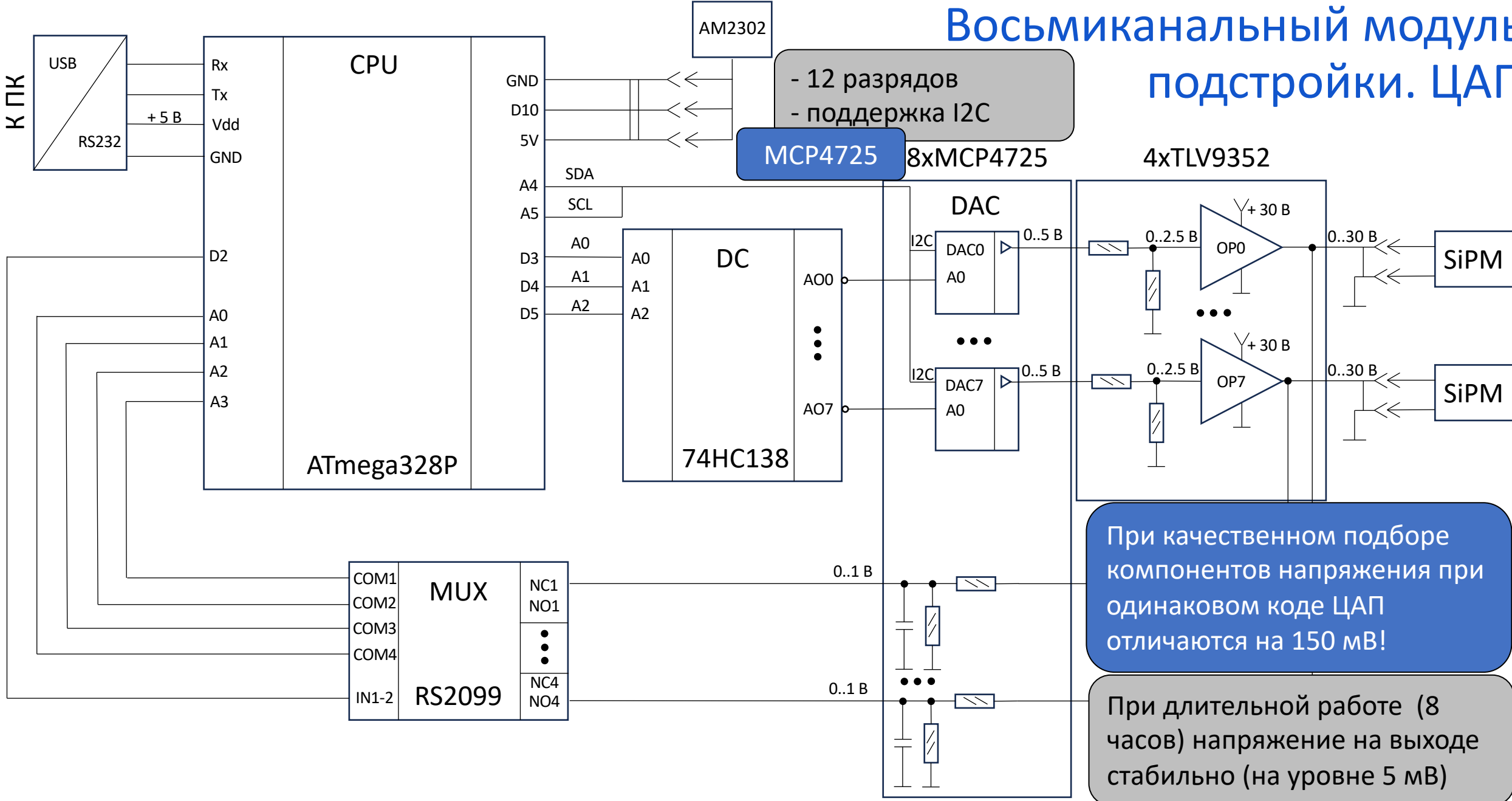
- Особая специфика электроники для высоких напряжений (относительно TTL)



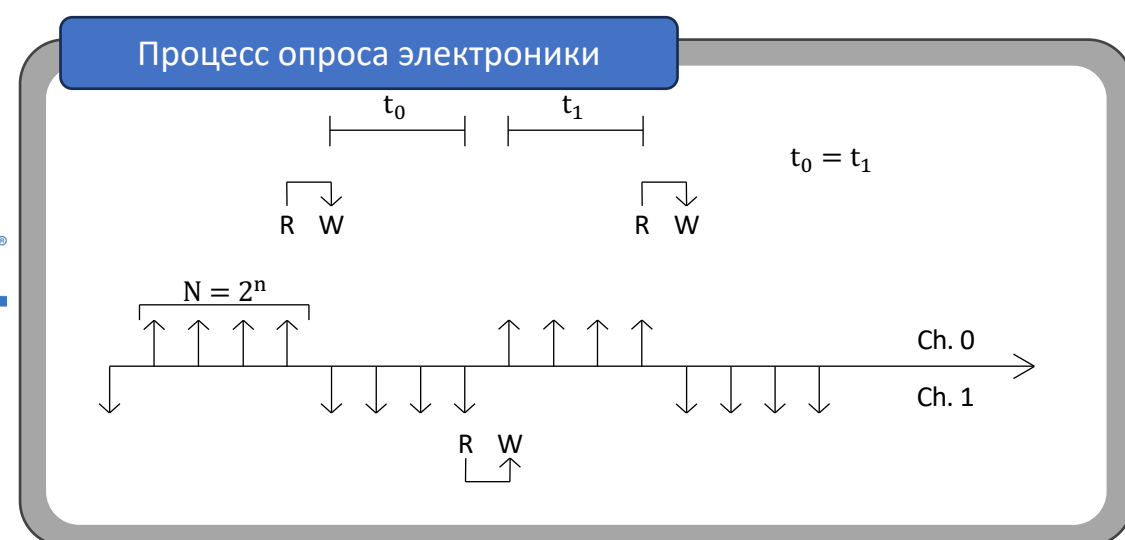
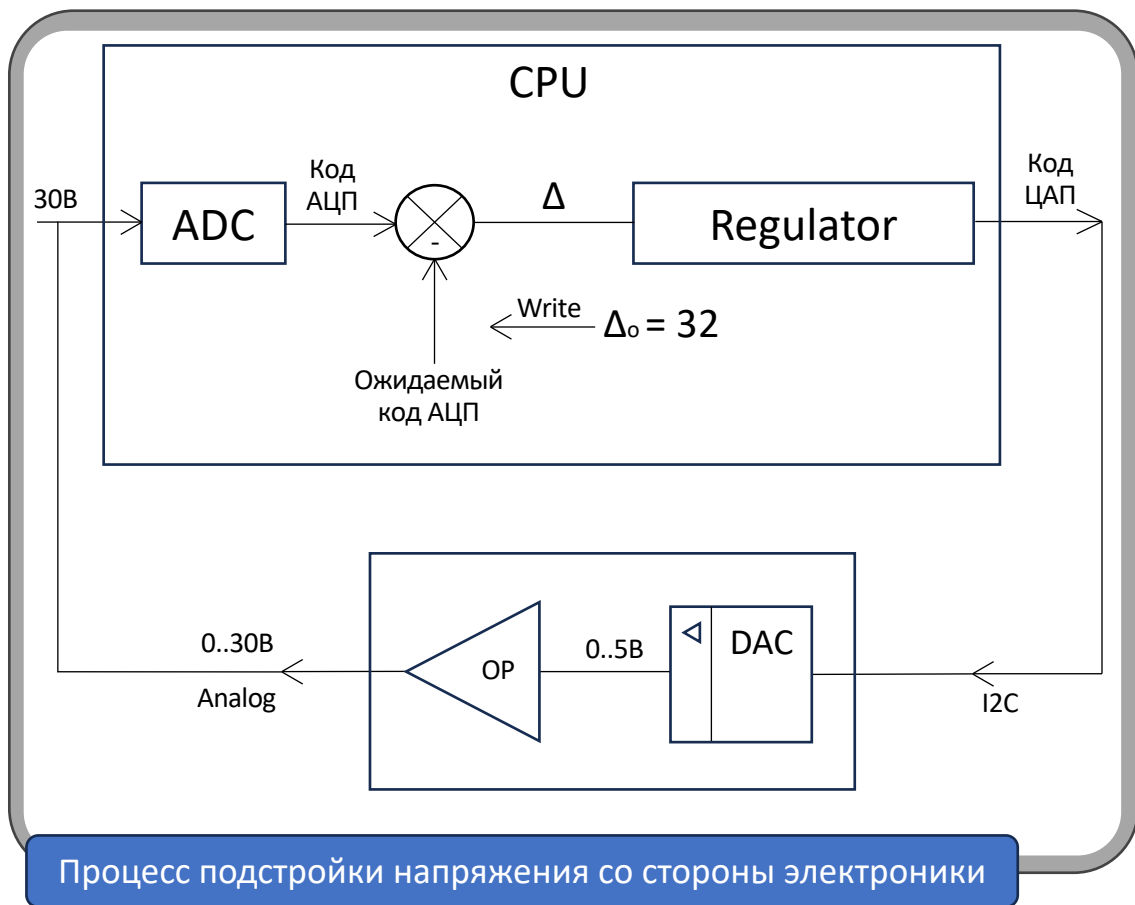
Восьмиканальный модуль подстройки. Atmega328P



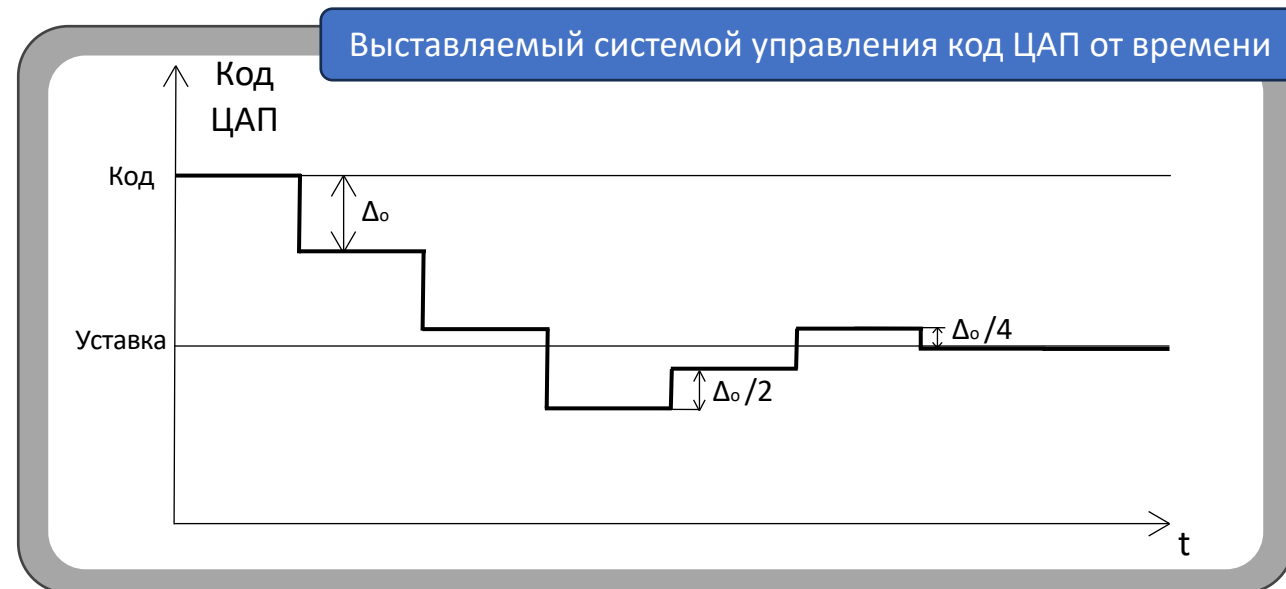
Восьмиканальный модуль подстройки. ЦАП



Цифровое управление. Механизм обратной связи



t_0 - время на переходной процесс установки выходного напряжения
 t_1 - время измерения результатов управления
 R – чтение DAC
 W – запись в DAC



Цифровое управление. Программное обеспечение

Arduino Temperature&Humidity Sensor

COM3: 9600_8N1

Temperature = 26.1 C

Humidity = 23.4 %

18:18:24.440 ID=2302, Sc=126, Bt=40, Sm=Ok

Disconnect

☒ Protocol:

Timestamp	dT	Len	Data
18:18:24.440	922	12	0a fe 08 00 ea 01 05 f0 7e 28 be 0d
18:18:23.518	934	94	0a 75 12 cf 02 ef 02 10 ef 03 2f 03 50 ...
18:18:22.515	933	93	0a 75 12 cf 02 ef 02 11 03 2f 03 50 03...
18:18:21.513	933	93	0a 75 12 cf 02 ef 02 11 03 2f 03 4f 03 ...
18:18:20.526	1018	93	0a 75 12 cf 02 ef 02 11 03 2f 03 50 03...
18:18:19.439	920	12	0a fe 08 00 eb 01 05 f1 7e 28 be 0d
18:18:18.519	934	94	0a 75 12 cf 02 ef 02 10 ef 03 2f 03 50 ...
18:18:17.516	933	94	0a 75 12 cf 02 ef 02 10 ef 03 2f 03 4f ...

Clear

OK Cancel

AO, V	AI, V	No.
0.000	22.940	Ch. 0
0.000	23.950	Ch. 1
0.000	24.948	Ch. 2
0.000	25.950	Ch. 3

Channel #0

DAC: 0 => Vout Write DAC

EEPROM: 0 => Vout Write EEPROM

Status: BSY

ADC: 0 max: 0 min: 0

Vout, V: 0 Set

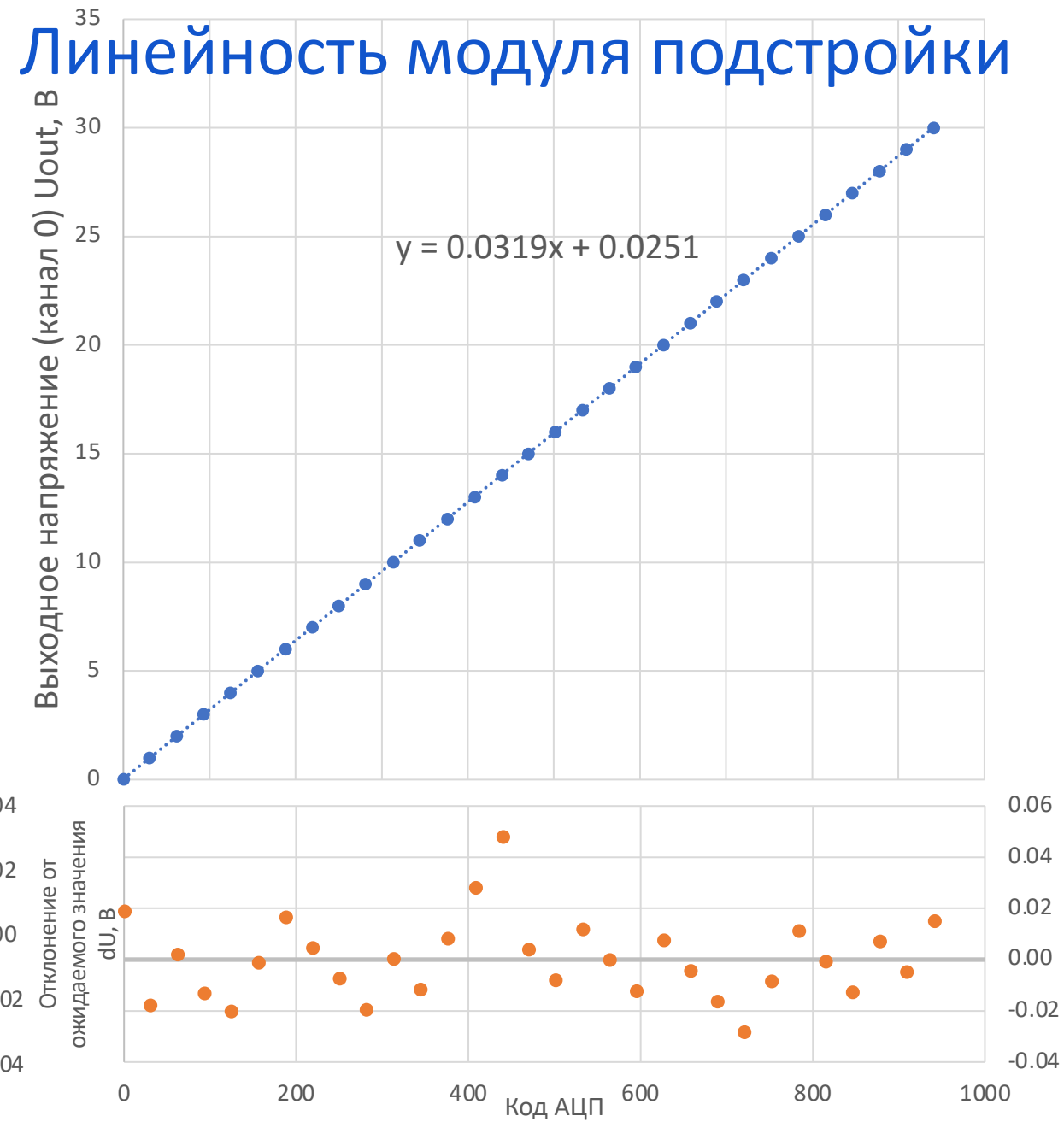
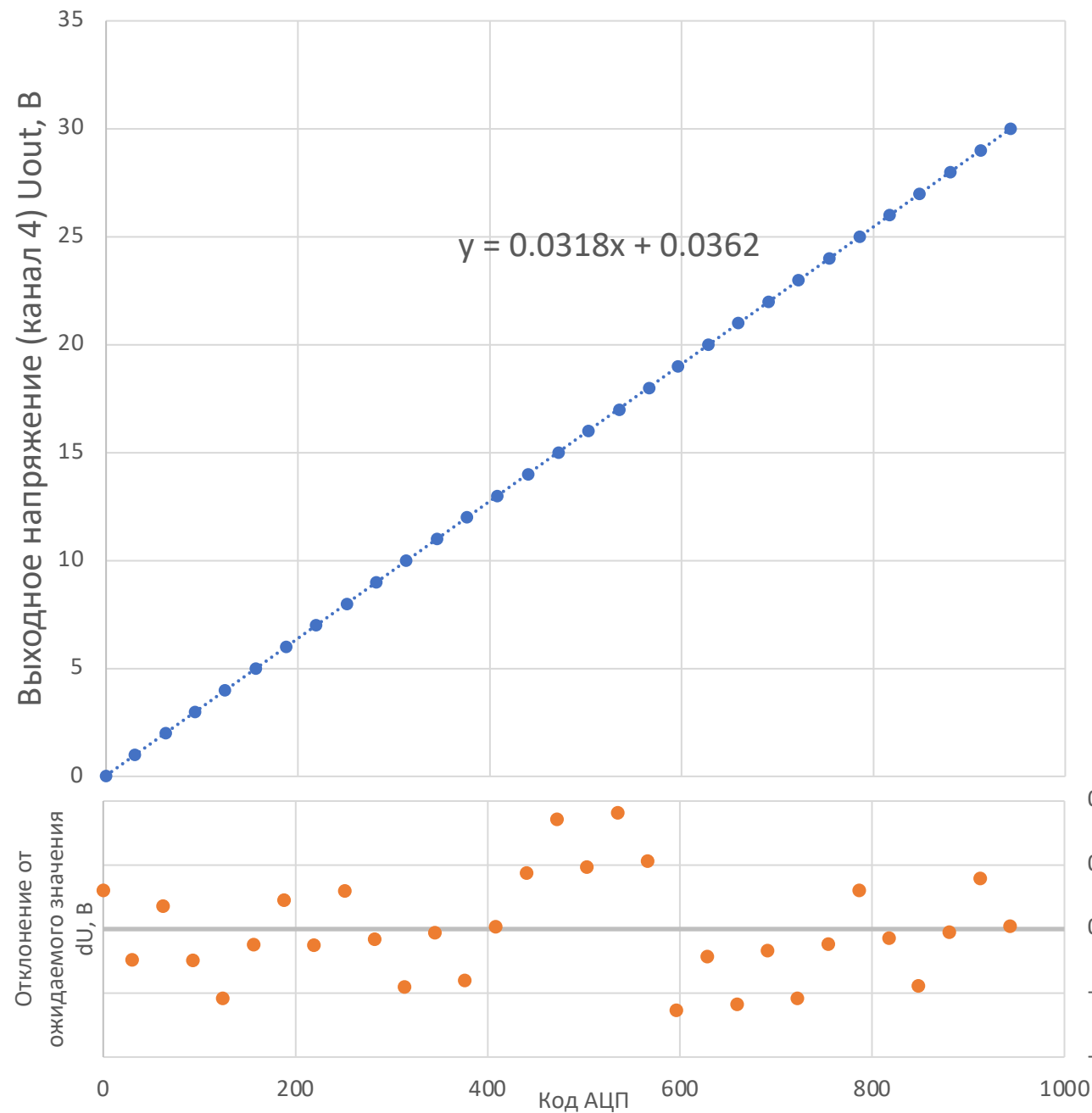
K = 0.0314 Calibrate

Power-down

OK Cancel

Язык программирования: C++
Фреймворк MFC
Поддерживаемые ОС: Windows
7/8(8.1)/10/11 (x86 platform)



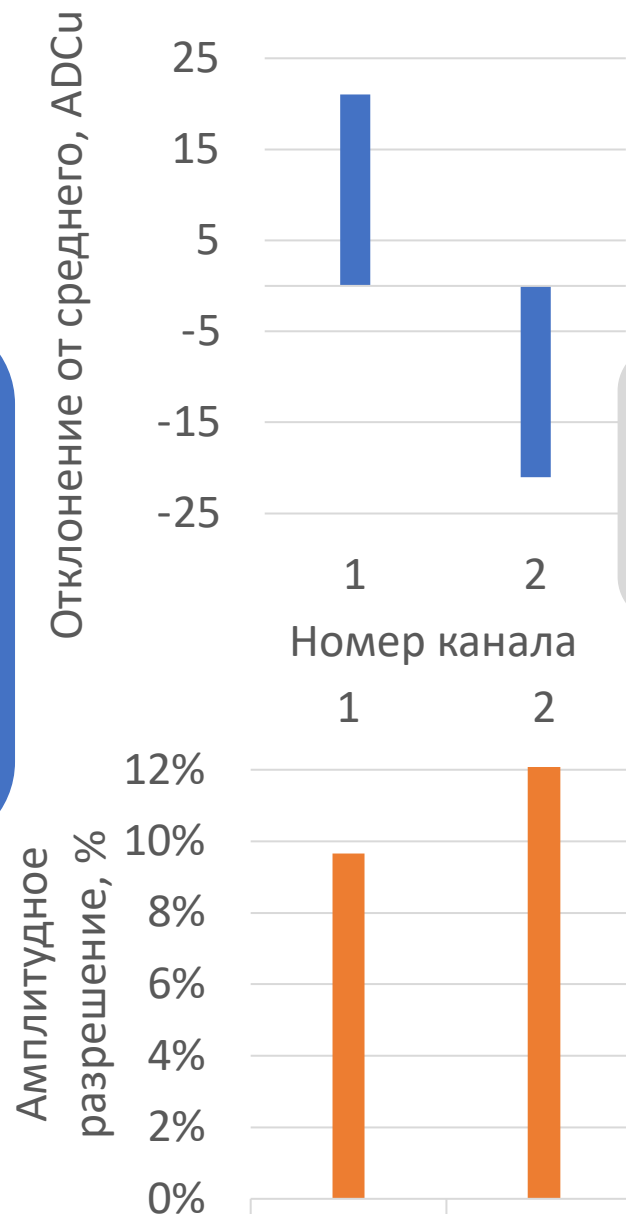


Тестирование на макете ПЭТ

Испытания на двух детекторах макета ПЭТ:

- Кристалл LYSO
- SiPM onsemi FC30035 3x3 мм²
- Напряжение питания (исходное) 27.0 В

Исследование на спектре источника ¹³⁷Cs
(гамма-кванты 662 кэВ)



Повышение
напряжения на
втором канале
на 0.4 В

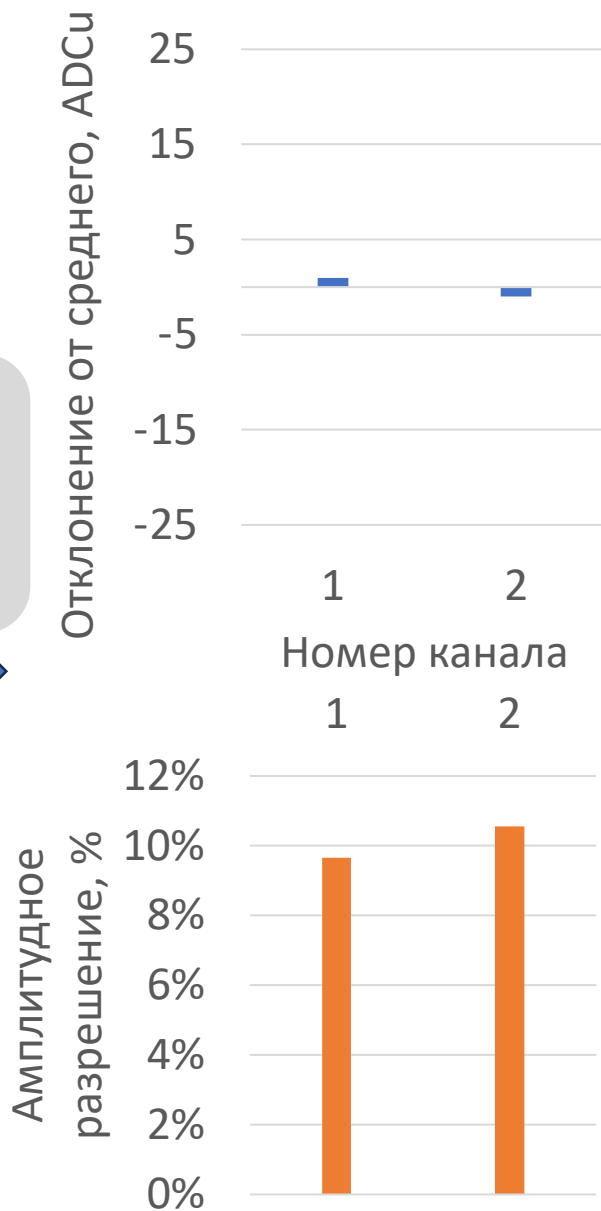


Схема установки для низкого потенциала

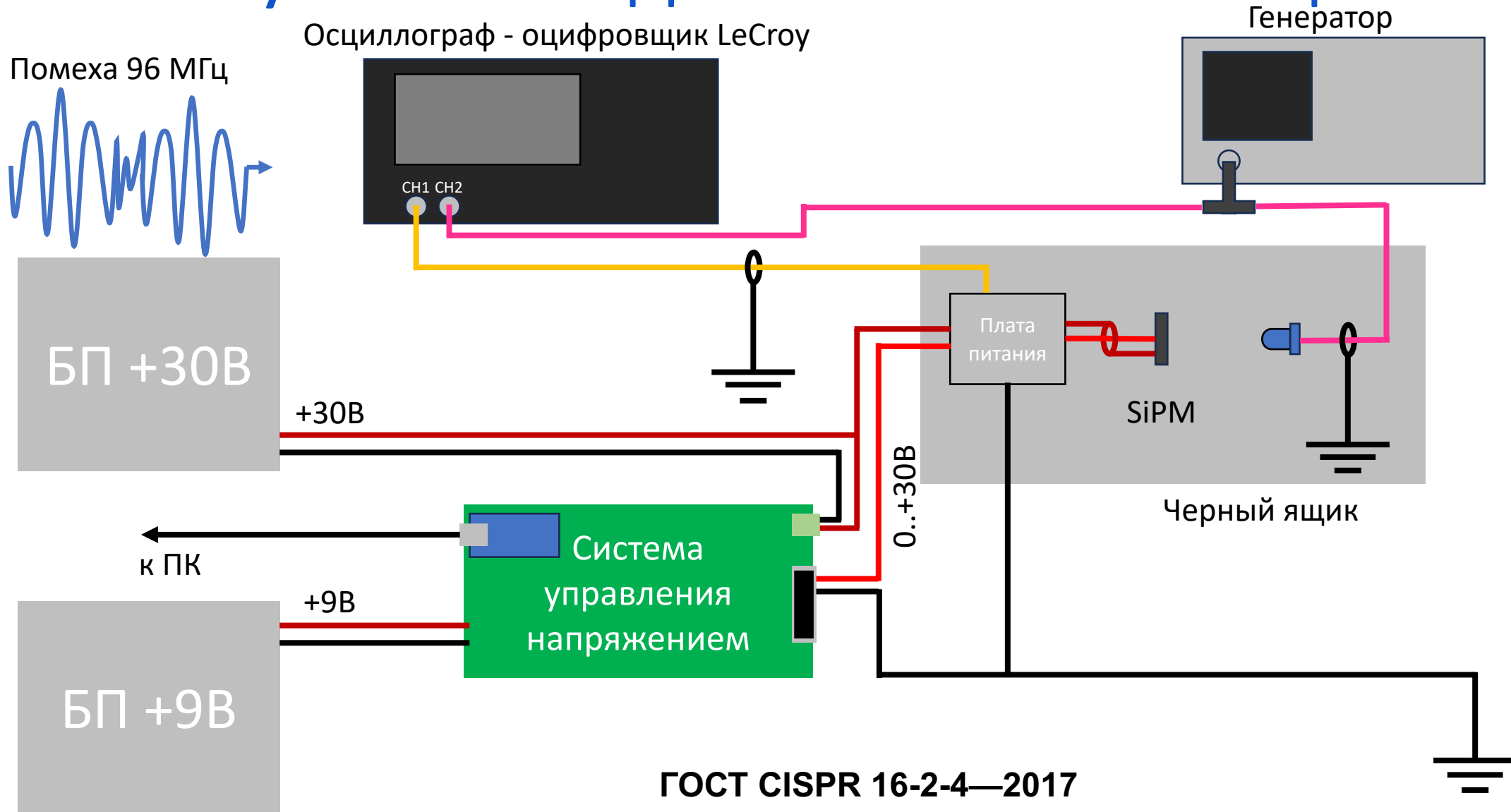
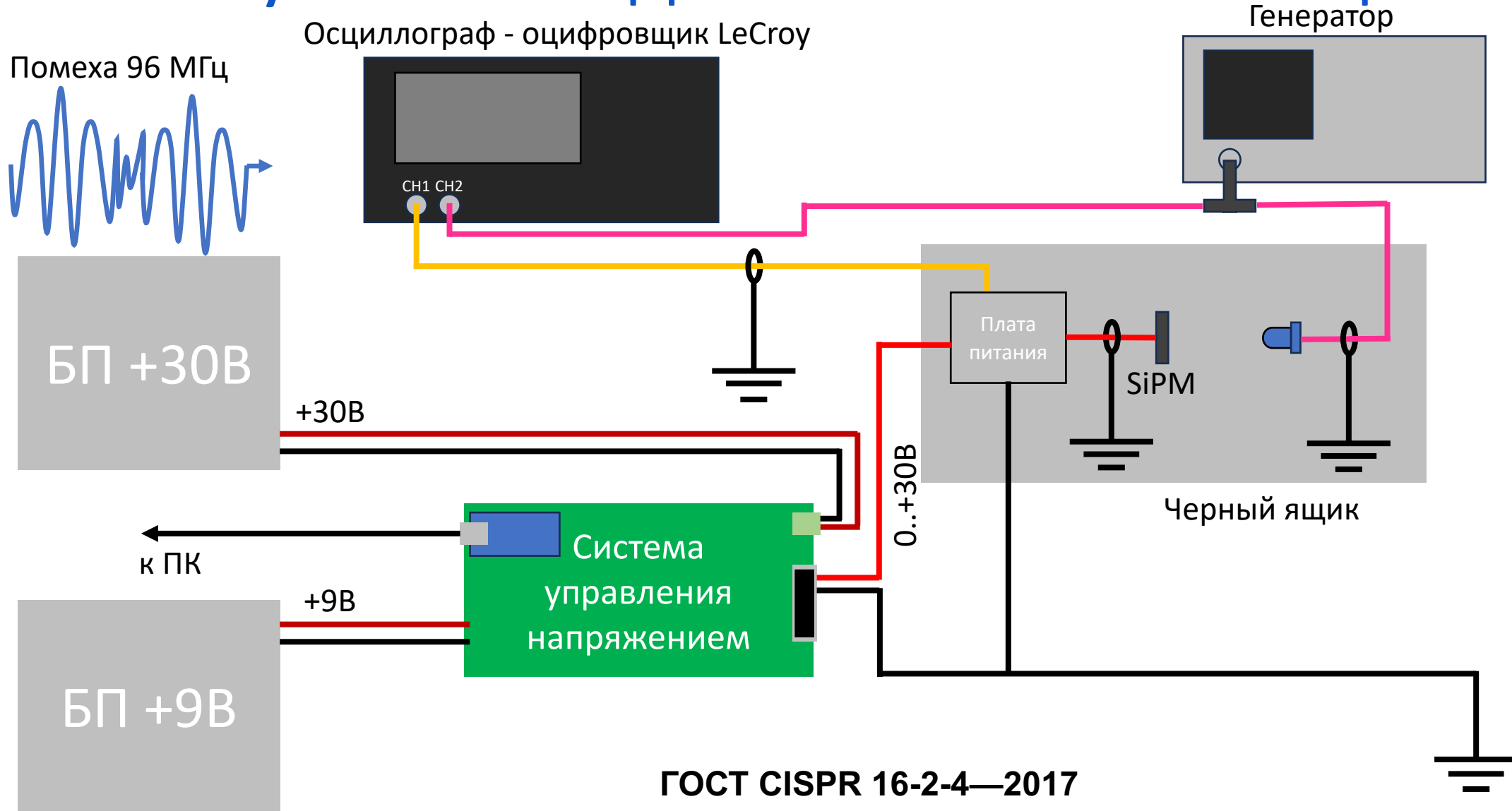


Схема установки для высокого потенциала



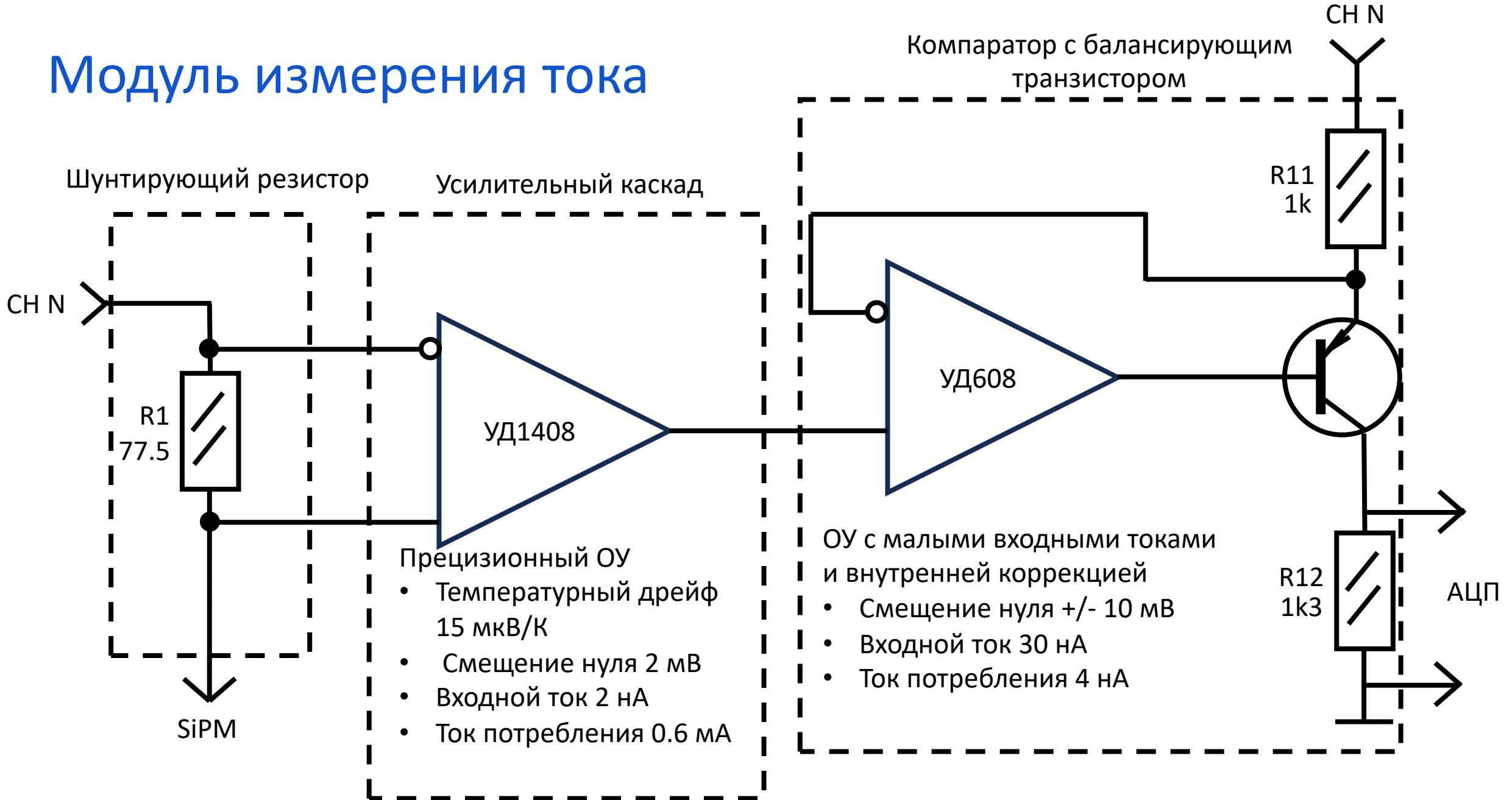
Сводная таблица результатов

	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

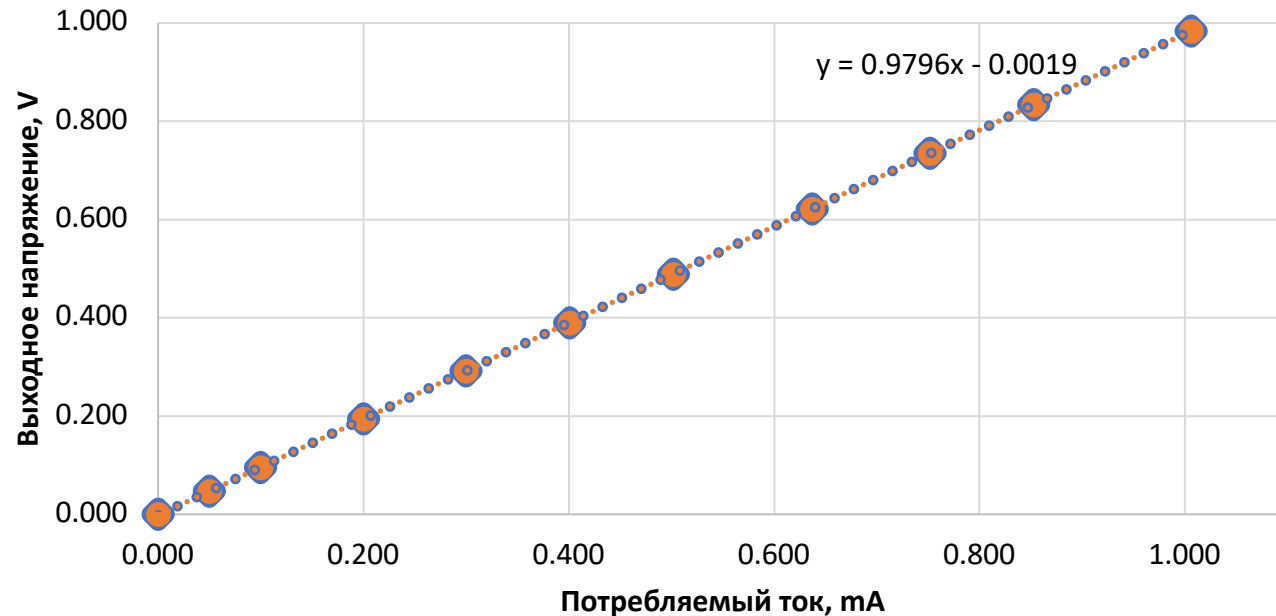
В схожих условиях наличие общей земли улучшает результат на 25 п.п.!

! Измерение проводилось при
наличии постоянной помехи 96 МГц
на уровне с полезным сигналом

Модуль измерения тока

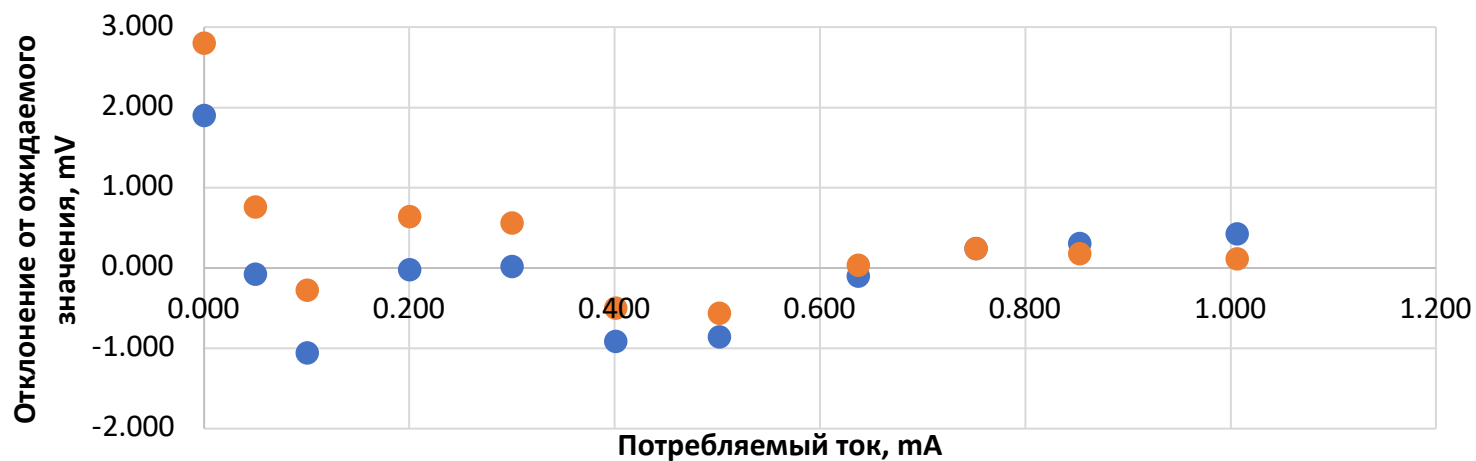


Линейность модуля измерения тока



- ◆ U_{out} , В при повышении тока
- U_{up} , В при понижении тока
- ... Линейная аппрокс. U_{out} , В
- ... Линейная аппрокс. U_{up} , В

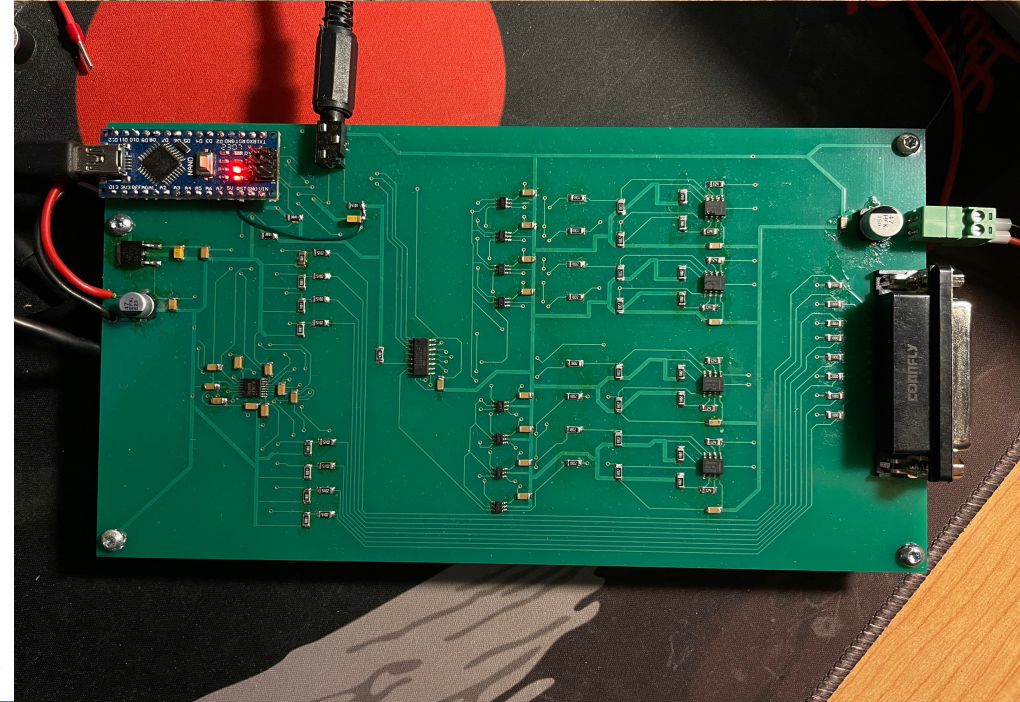
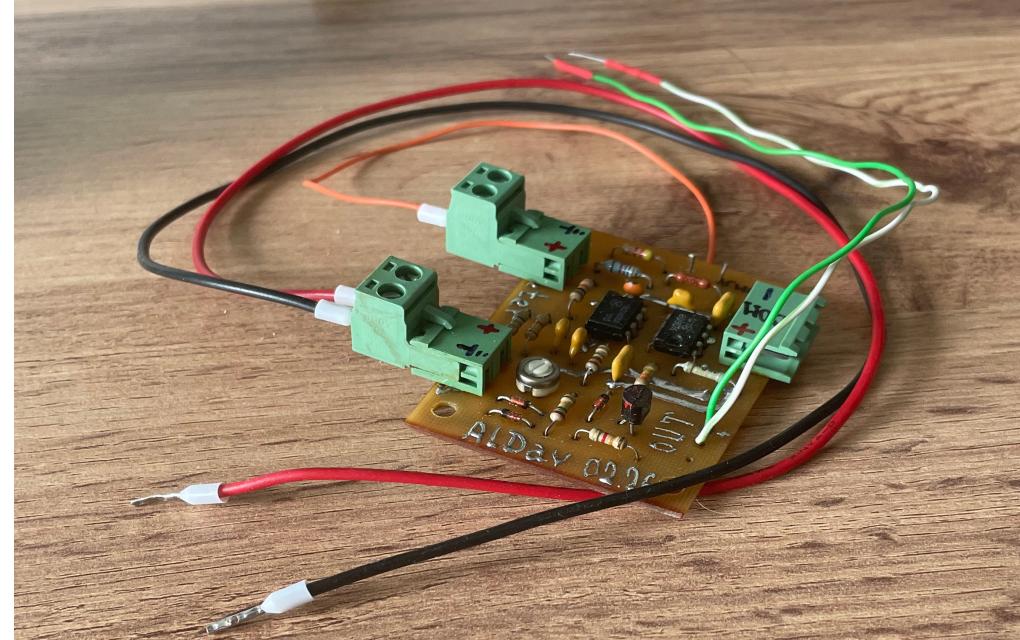
Отклонение от ожидаемого значения не превосходит 3 мВ!



- DU, мВ при повышении тока
- DU, мВ при понижении тока

Заключение

- Разработана восьмиканальная система управления напряжением на кремниевых фотоумножителях с заземлённым электродом
- Произведена калибровка каналов системы управления, отклонение от ожидаемого значения не более 30 мВ
- Произведена проверка помехоустойчивости системы управления напряжением в различных включениях. При управлении высоким потенциалом амплитудное разрешение детектора оказалось лучше в 3 раза для слабых оптических сигналов
- Разработан прототип модуля измерения потребляемого на каналах тока
- Исследована линейность модуля измерения тока. Среднее отклонение от ожидаемого значения 0.5 мкА



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

По вопросам обращаться: Конотоп Алексей Давидович, +7(964)522-06-69 akonotop03@mail.ru

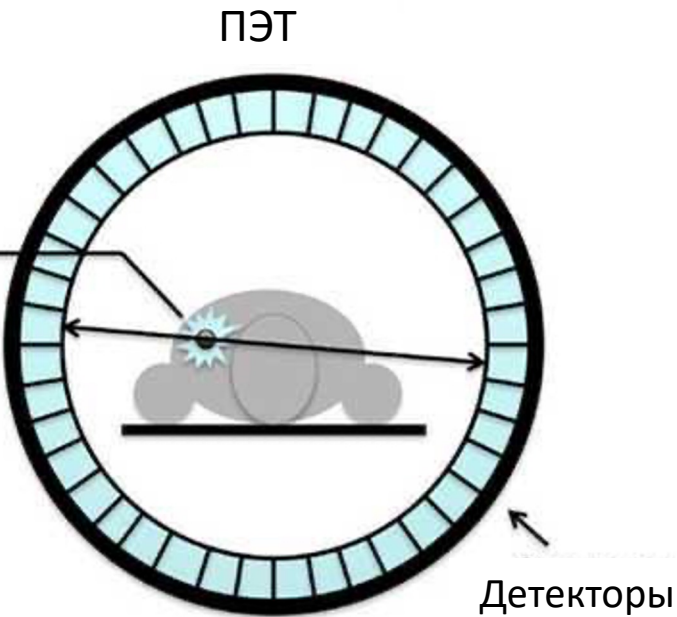
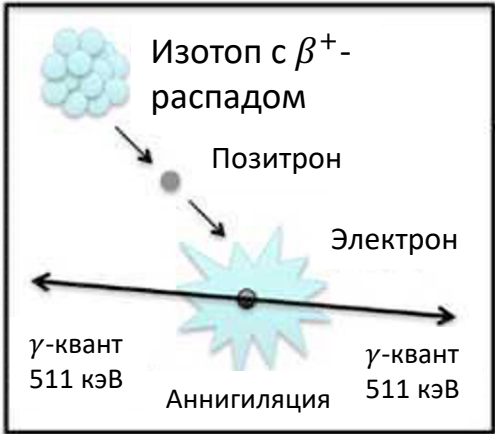
Принципы ПЭТ-сканирования

- Радиоактивный распад
- Аннигиляция позитрона, рождение двух гамма-квантов
- Детектирование гамма-квантов
- Восстановление изображения

Фтордизоксиглюкоза (FDG)

FDG является наиболее часто используемым радиофармпрепаратом в ПЭТ-визуализации. Он содержит радиоактивный изотоп F-18 и имитирует глюкозу. Из-за высокого потребления глюкозы раковыми клетками и некоторыми другими активными тканями, FDG-ПЭТ широко используется для диагностики, определения стадии и мониторинга рака.

Позитронный распад и аннигиляция электрон-позитронной пары

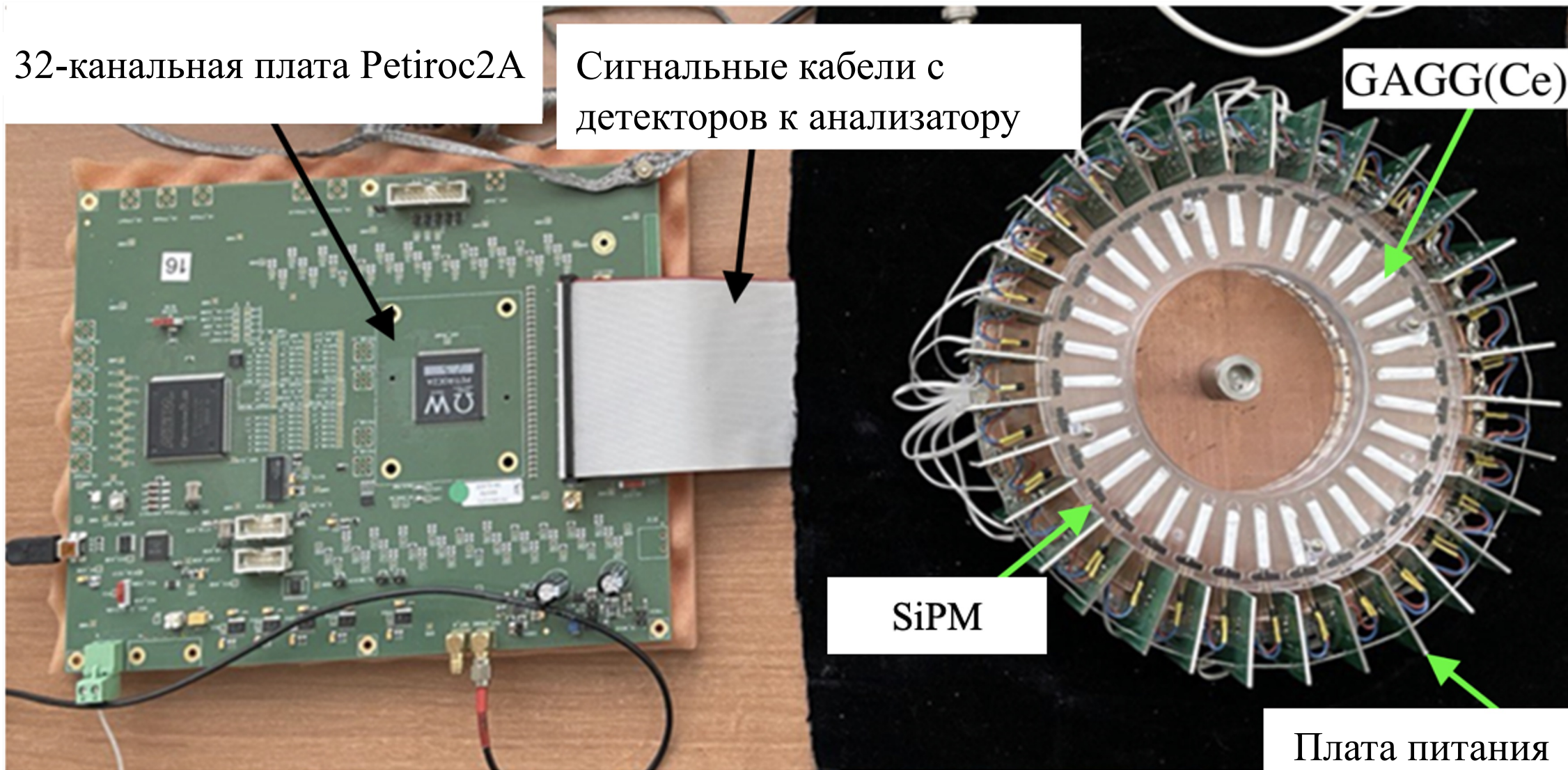


Радионуклид	Полураспад	Тип распада	E_{max} , МэВ
^{11}C	20,4 мин	$\beta^+(100)$	0,970
^{13}N	10 мин	$\beta^+(100)$	1,2
^{15}O	2 мин	$\beta^+(100)$	1,74
^{18}F	110 мин	$\beta^+(97)$	0,64
^{68}Ga	68 мин	$\beta^+(89)$	1,9
^{82}Rb	72 с	$\beta^+(95)$	3,25
^{124}I	4,2 дней	$\beta^+(23)$	2,14

Макет ПЭТ

32-канальная плата Retiros2A

Сигнальные кабели с
детекторов к анализатору



SiPM

GAGG(Ce)

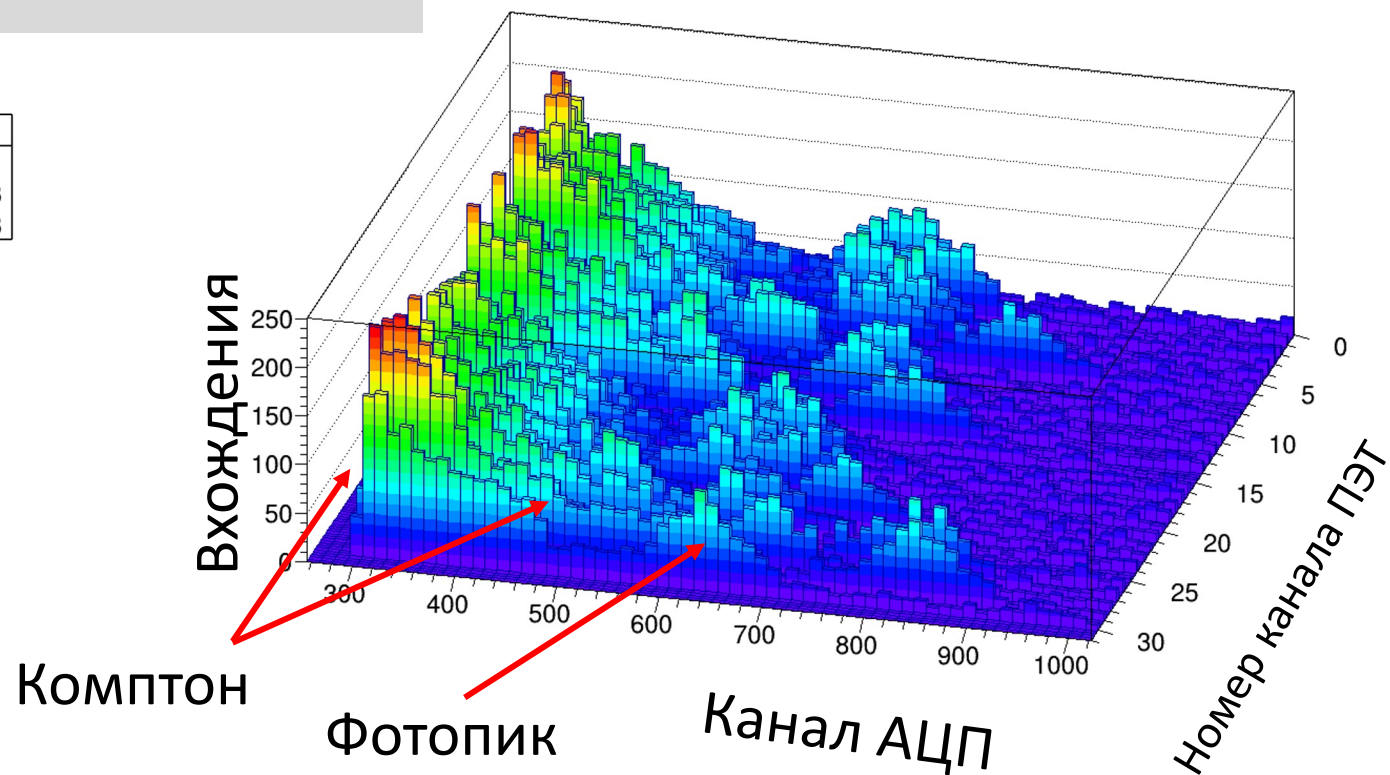
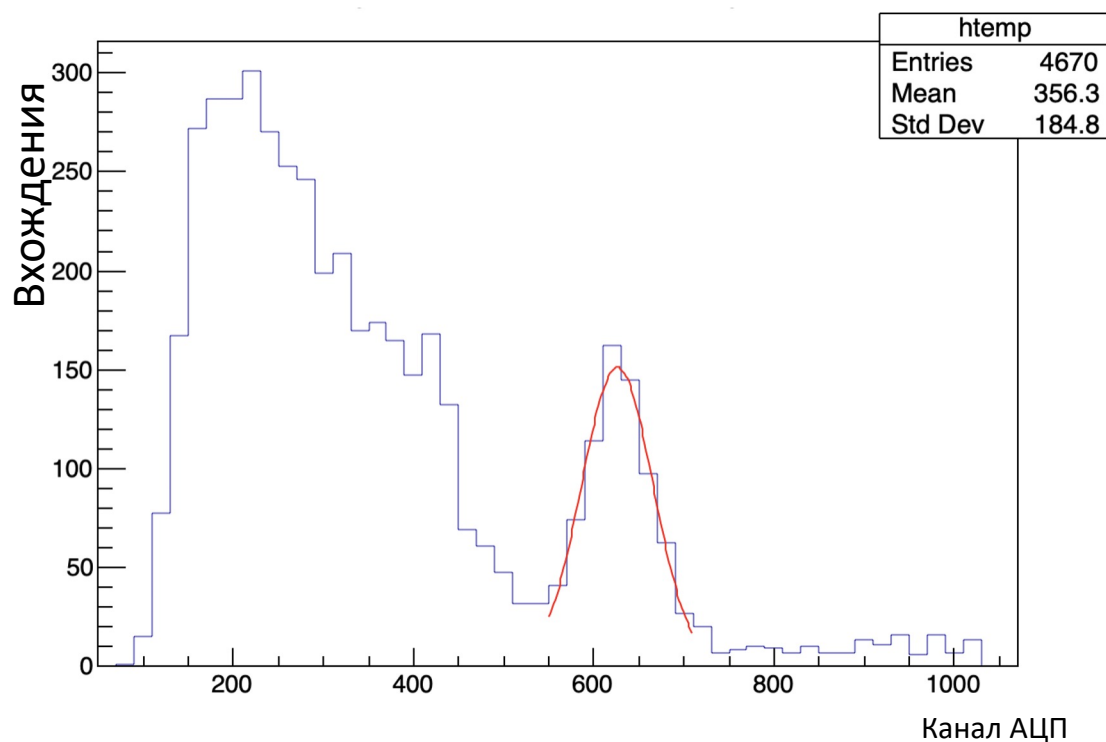
Плата питания

Характеристики модели ПЭТ

Лучшее энергетическое разрешение (511 кэВ) - 14 %

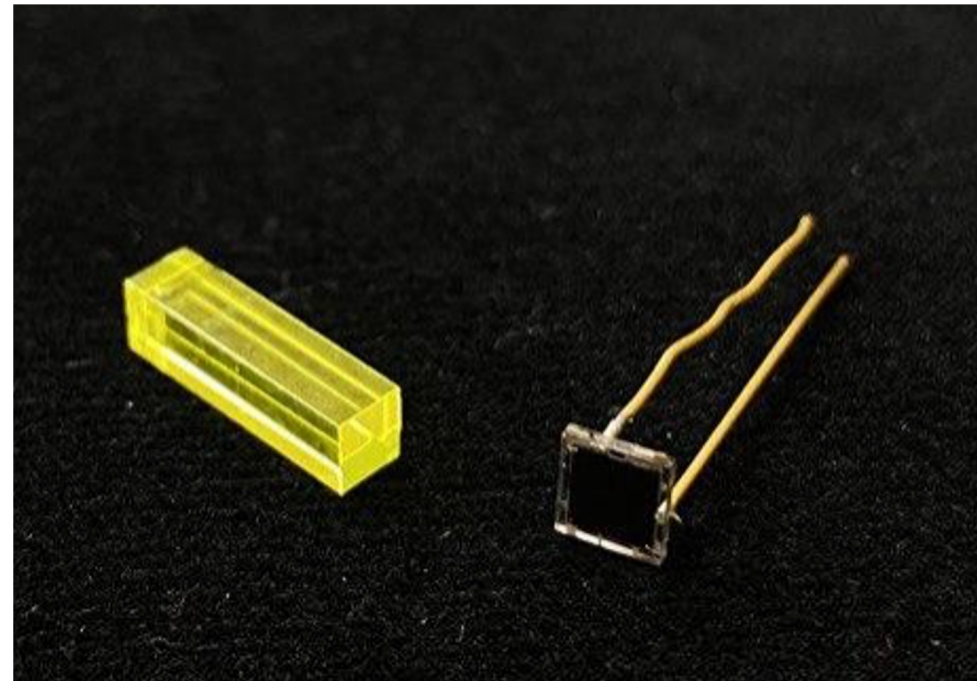
Лучшее ЭР одиночного детектора (662 кэВ) - 8%

Временное разрешение - 1.80 ± 0.07 нс (одиночный)



Материалы детекторов

	LYSO(Ce)	BGO	NaI(Tl)	GAGG(Ce)
Плотность, г/см ²	7.1	7.13	3.67	6.63
Z_{eff}	63	73	50	54.4
λ_{max} , нм	420	480	415	520
t, нс	40	300	230	87(90%) 255(10%)
Световыход, фотон/кэВ	30	10	38	46
Гигроскопичность	Нет	Нет	Да	Нет
Радиоактивность	Да	Нет	Нет	Нет



Неорганические сцинтилляторы GAGG(Ce) 3x3x20 мм

Фотоприёмник: SiPM Onsemi FC30035

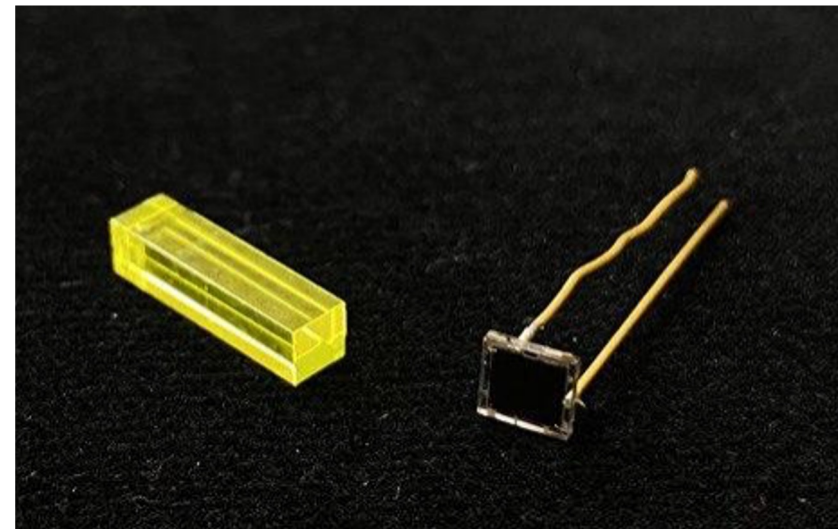
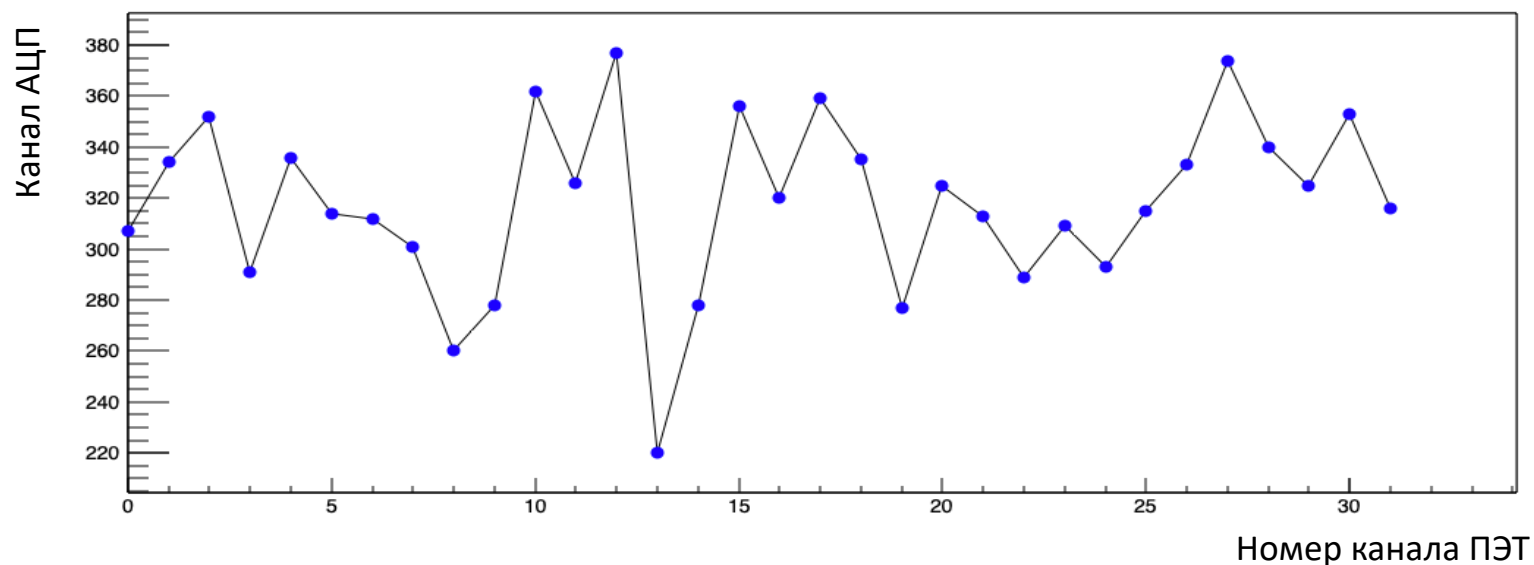
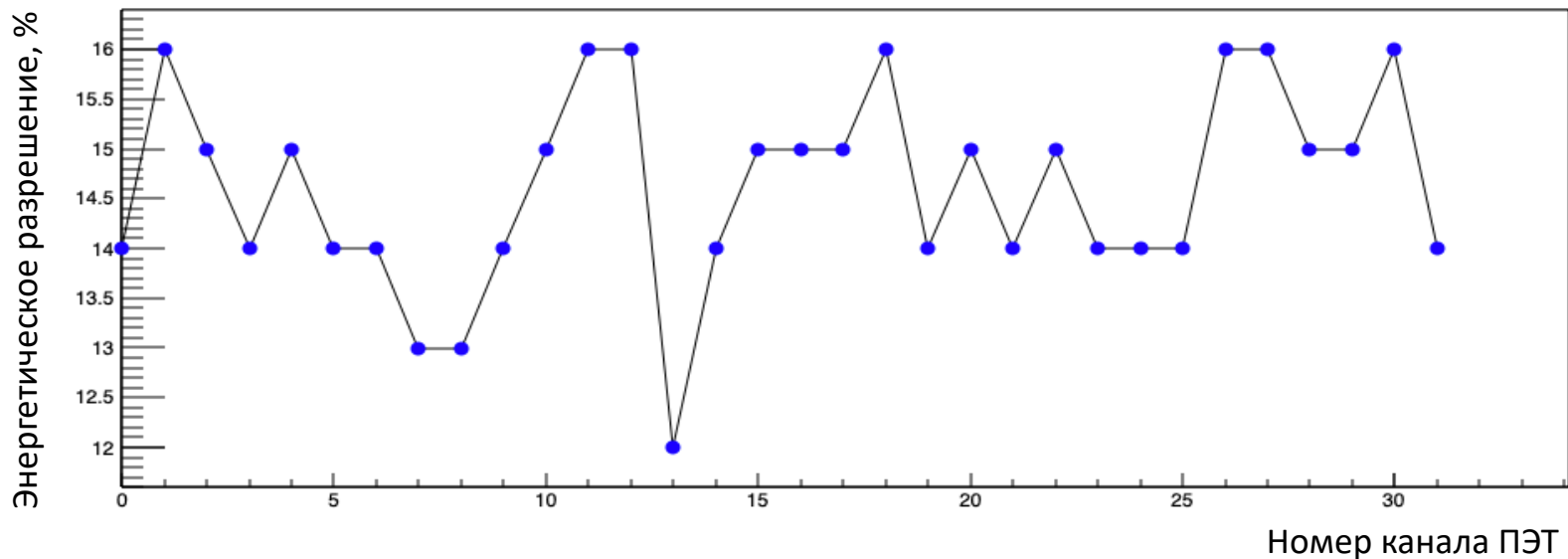
Напряжение пробоя $V_{\text{br}} = 24.2 - 24.7$ В

При длине волны 520 нм и перенапряжении 3 В:

Эффективность регистрации (PDE) = 17%

Усиление = 3×10^6

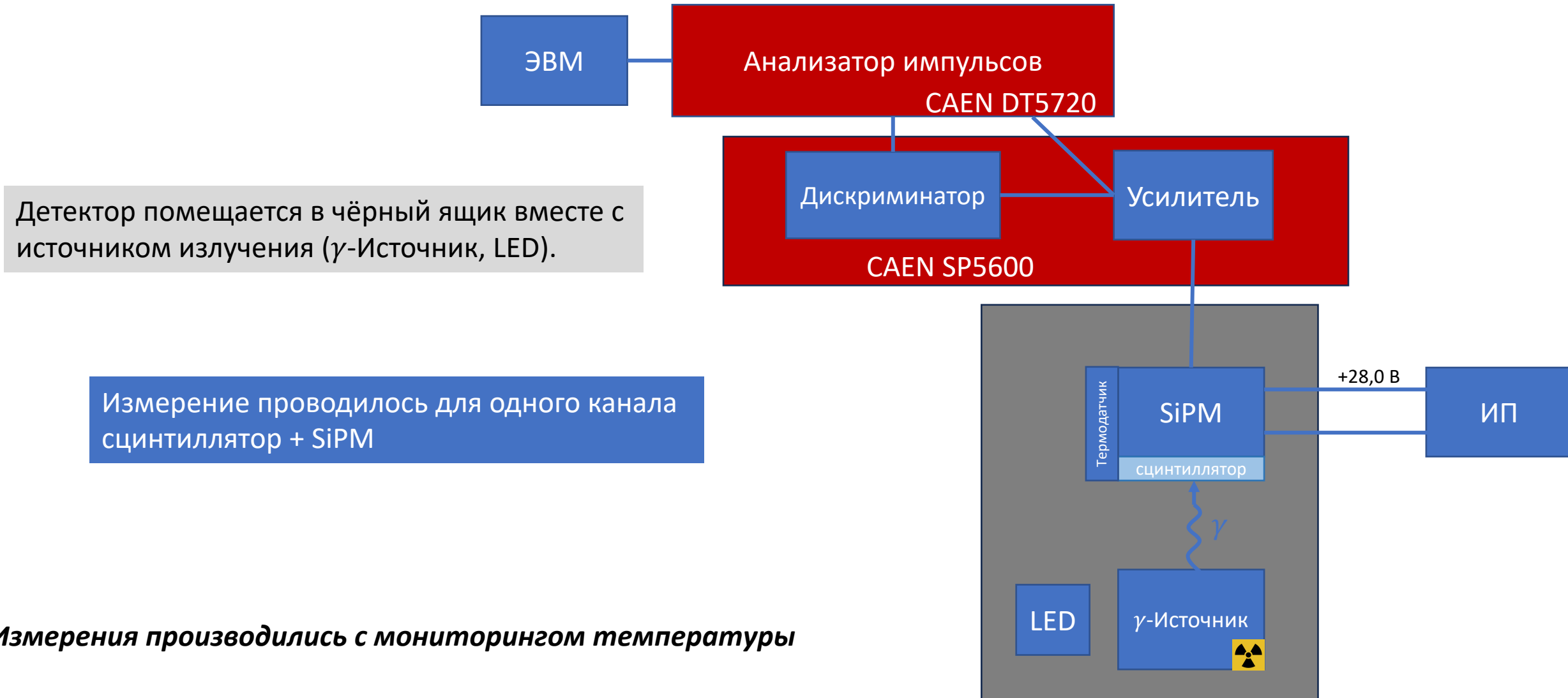
Неоднородность установки



Ср. энергетическое разрешение = 15%
Разброс значений = 9%

Ср. положение фотопика = 318 канал АЦП
Разброс значений = 20%

Установка для изучения неоднородности отклика



Восьмиканальный модуль подстройки

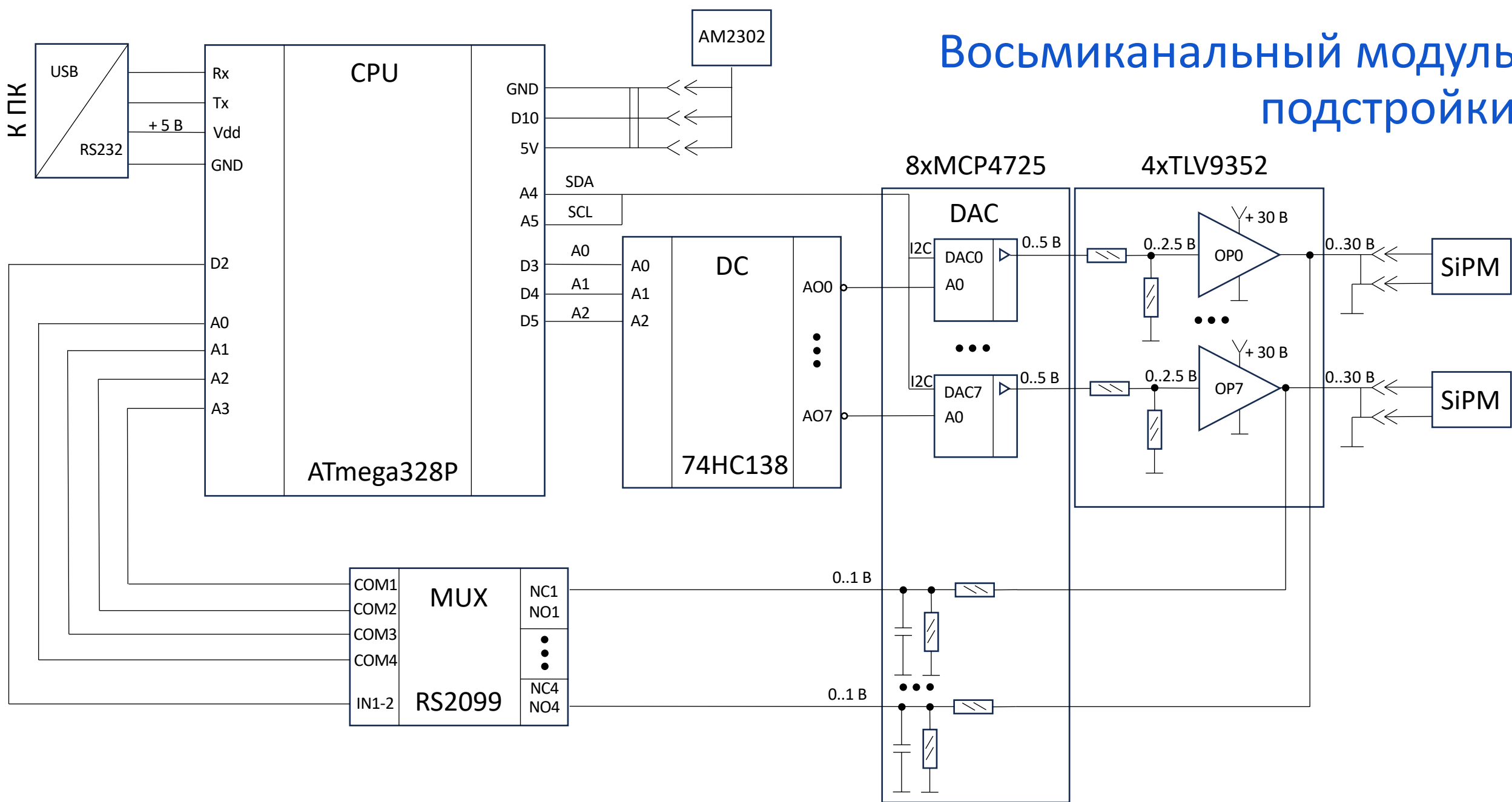
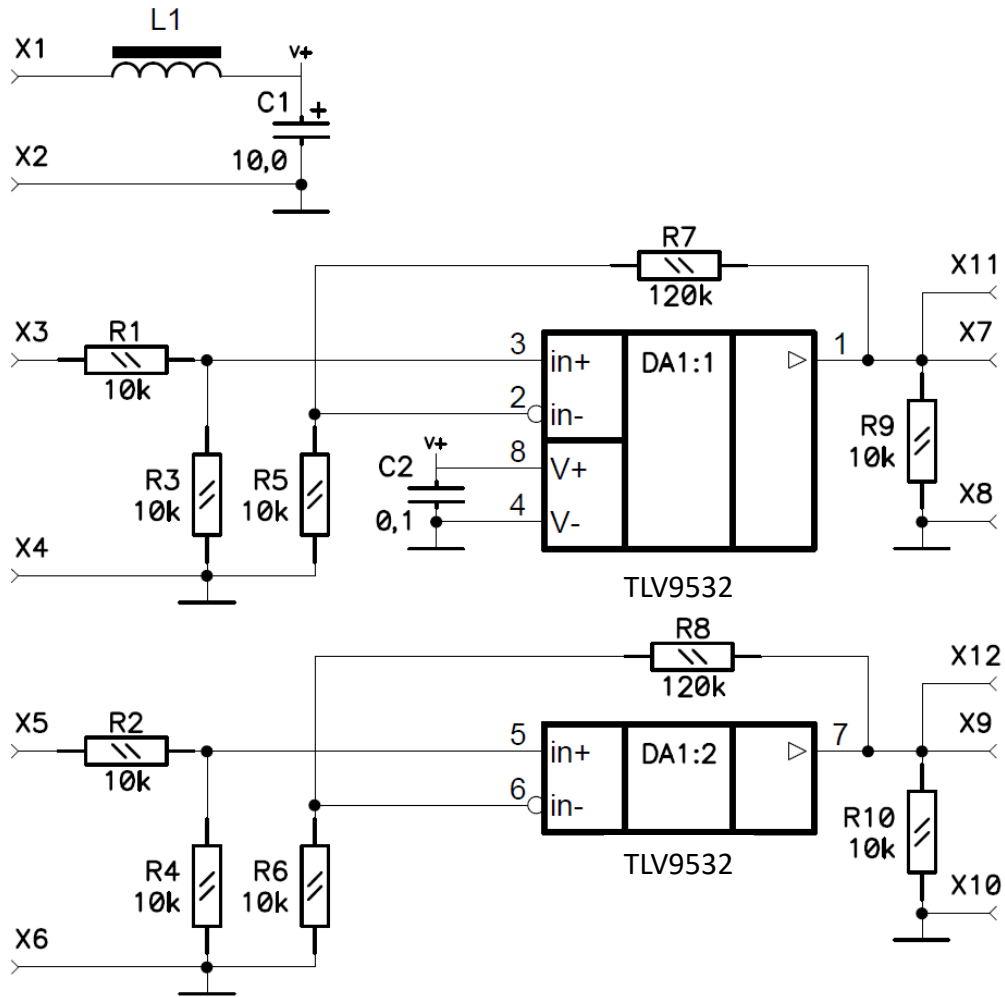


Схема на базе операционного усилителя 'Rail-to-Rail'

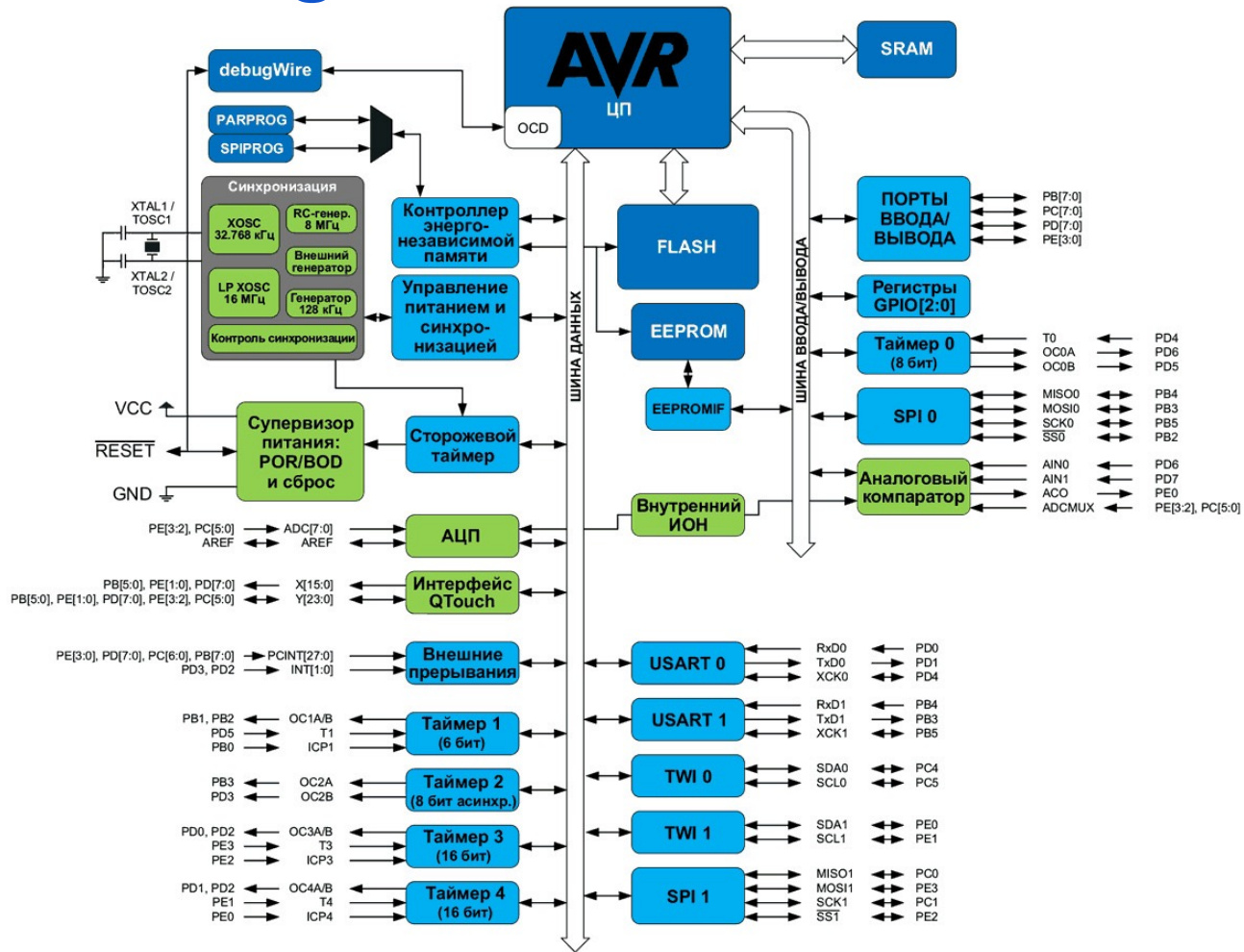


- простота исполнения
- компактность
- возможность внедрения цифрового управления



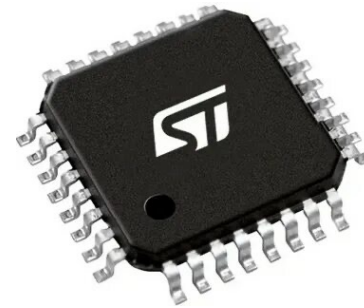
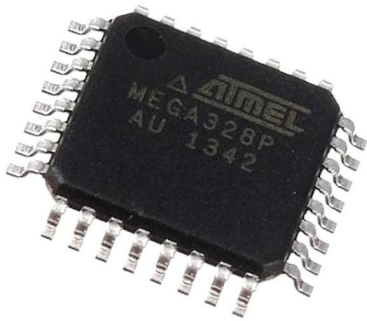
- Особая специфика электроники для высоких напряжений (относительно TTL)

Цифровое управление. ATmega328P



- Дешевизна
- Достаточное быстродействие (16 МГц)
- Поддержка интерфейсов I2C и RS232
- Встроенный 10-разрядный АЦП
- Поддержка прерываний

ATmega328p против STM32xx

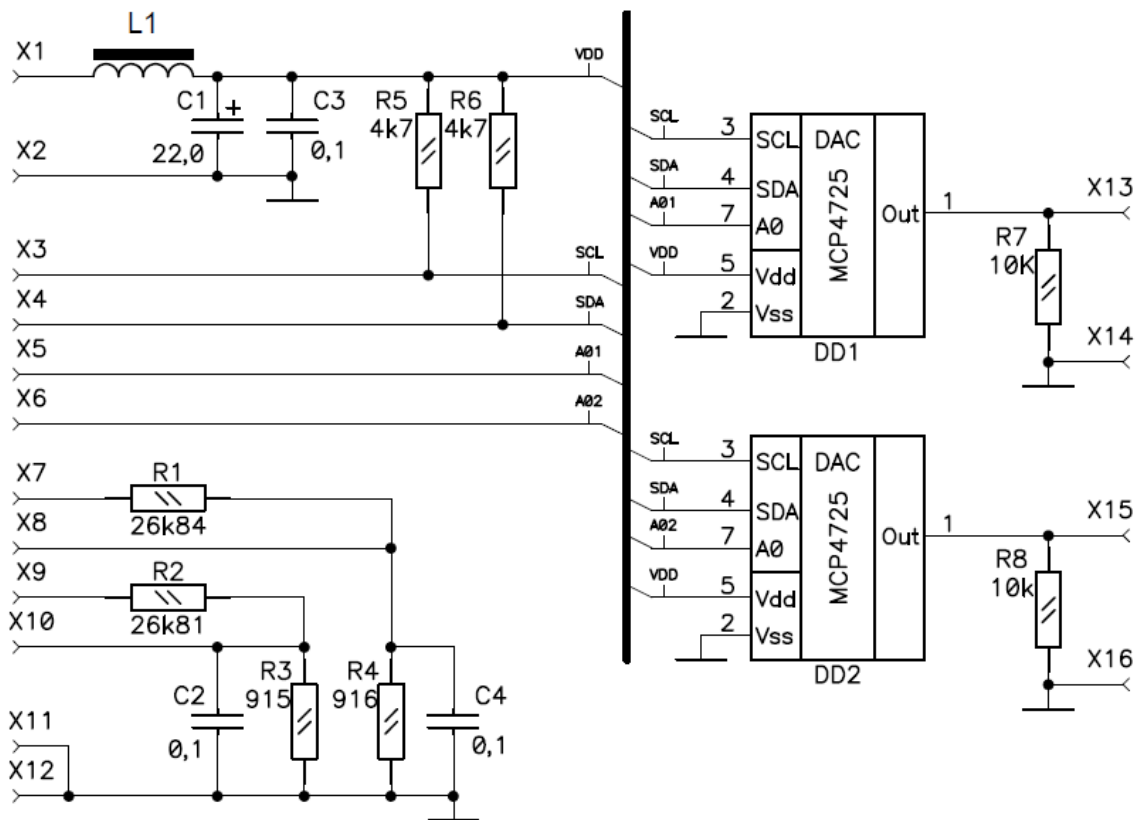


Параметры	ATmega328P	STM32F103C8T6
Архитектура ядра	AVR-RISC	ARM
Частота, МГц	16	72
Разрядность АЦП, бит	10	12 (x2)
Поддержка интерфейсов	USART, I2C (TWI), SPI	UART, USART, I2C (TWI), SPI, CAN, Ethernet, USB
Напряжение питания, В	5	3.3

Цифровое управление. ЦАП

MCP4725

- 12 разрядов
- поддержка I2C



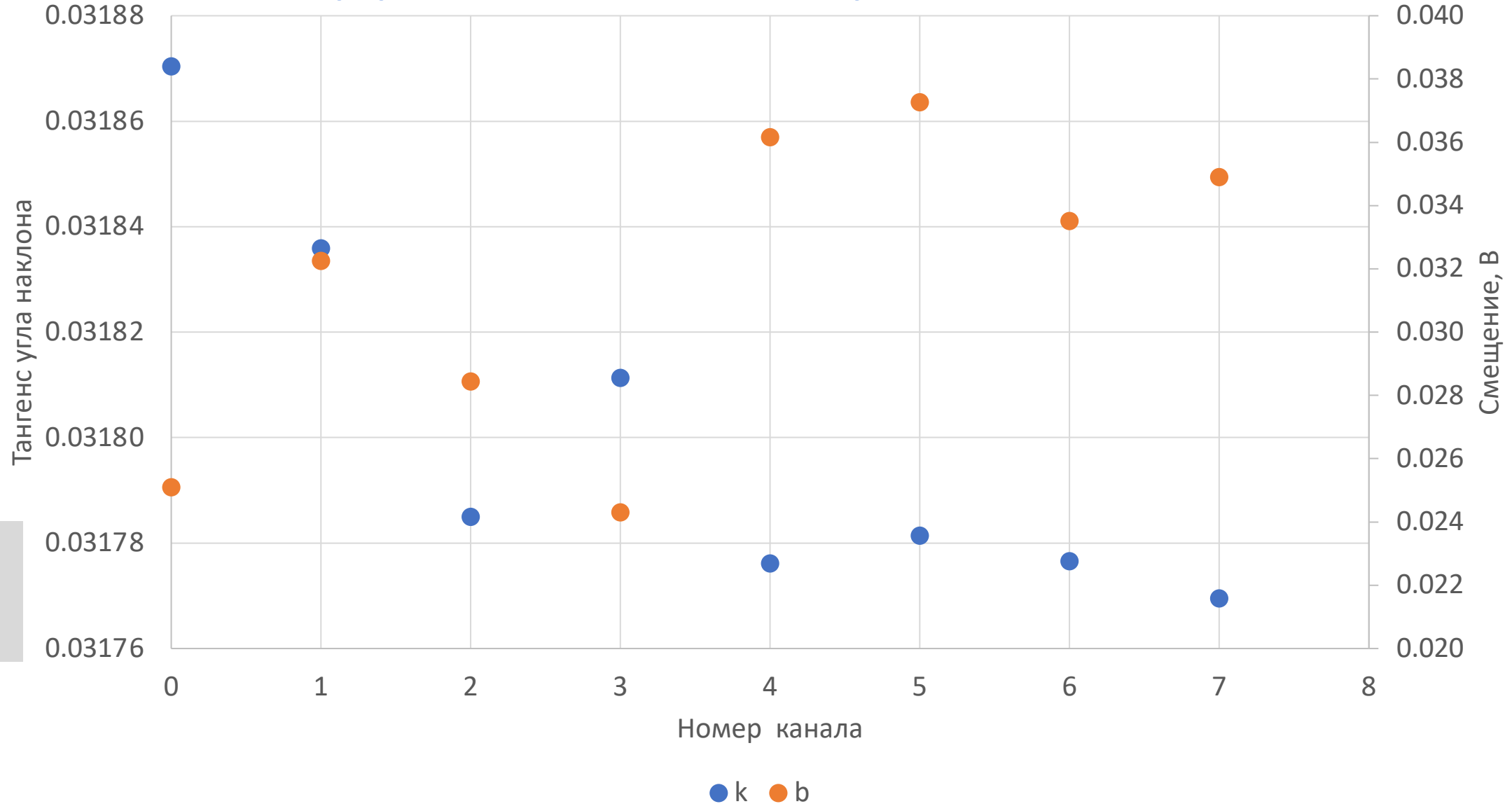
Выходное сопротивление делителя:
 $R_o = R2 \parallel R3 = 27 \cdot 0,91 / (27 + 0,91) = 0,88 \text{ кОм}$
Постоянная времени делителя
 $R_o \cdot C2 = 0,088 \text{ мс}$
Коэффициент передачи по постоянному току:
 $K = R3 / (R2 + R3) = 0.033$
 $U30 = 30 \cdot K = 0.99 \text{ В}$

При качественном подборе компонентов напряжения при одинаковом коде ЦАП отличаются на 150 мВ!

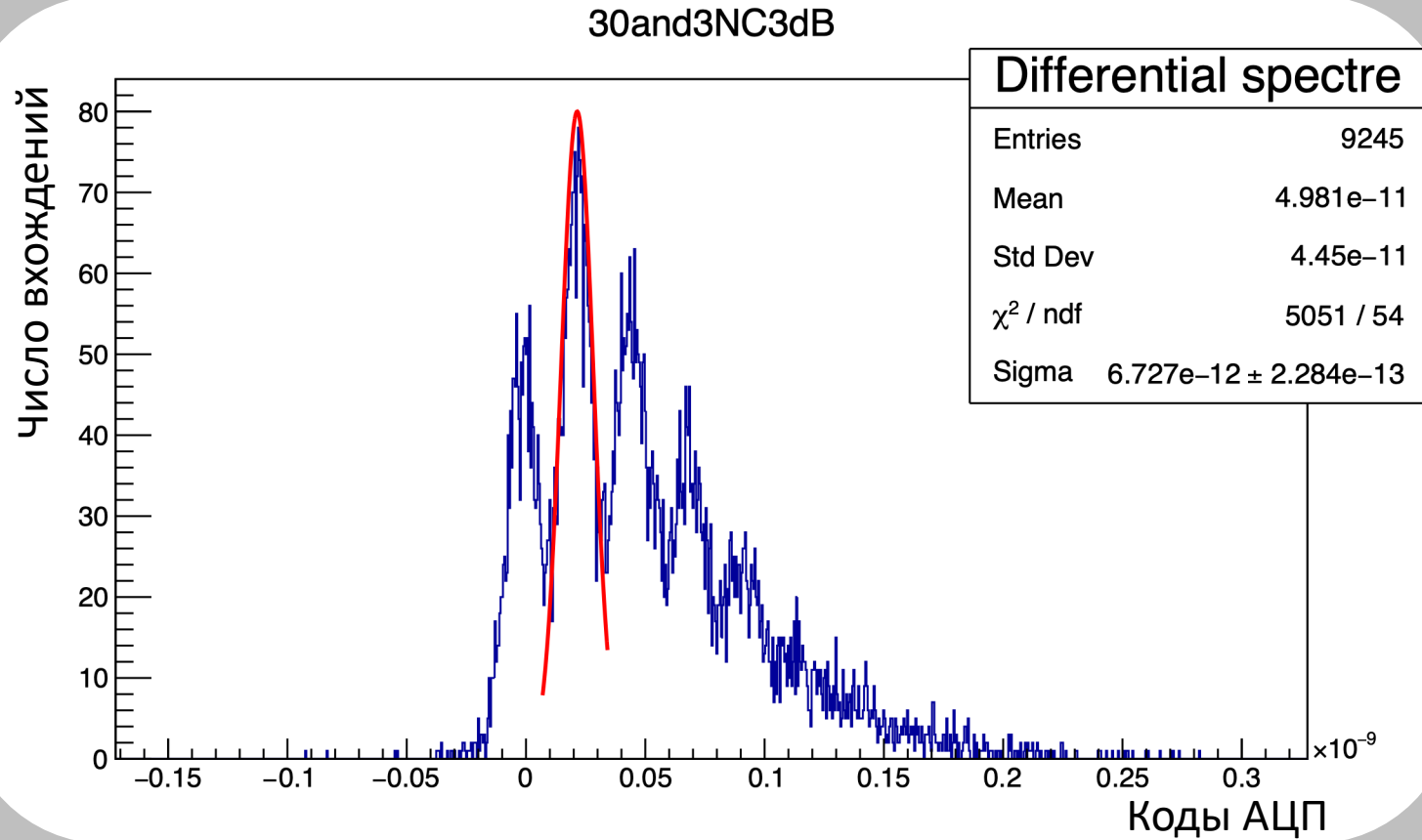
При длительной работе (8 часов) напряжение на выходе стабильно (на уровне 5 мВ)

Измерение производится с наблюдением за температурой

Распределение коэффициентов подстройки



Результаты для низкого потенциала



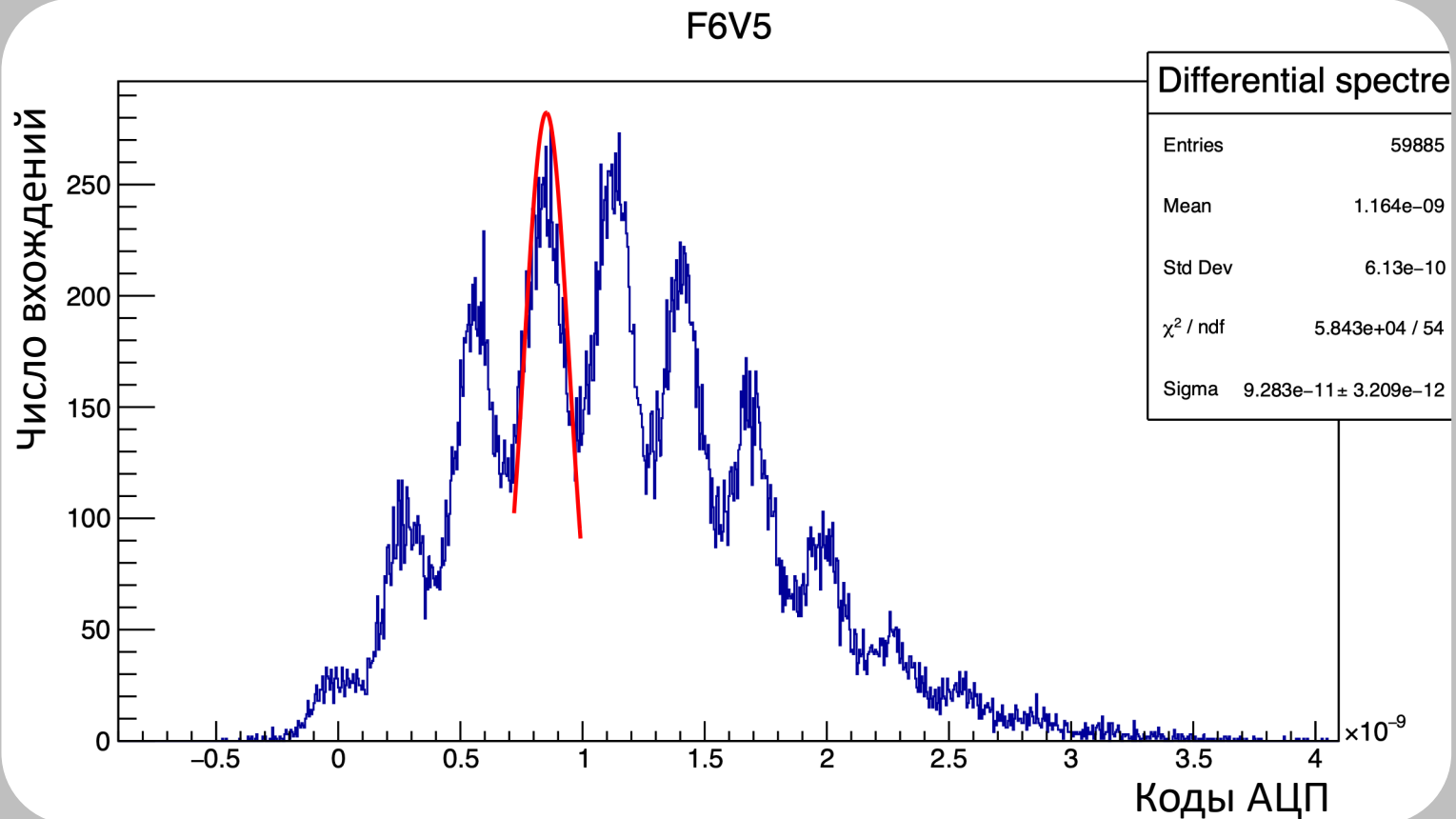
Параметры:

- Высокое: +30 В
- Низкое: +3 В (АСУ)
- Полоса пропускания: 20 МГц
- Шумоподавление: +3 дБ

Амплитудное разрешение:

$$A_{res} = (37.6 \pm 2.4) \%$$

Результаты для высокого потенциала (без коррекций)



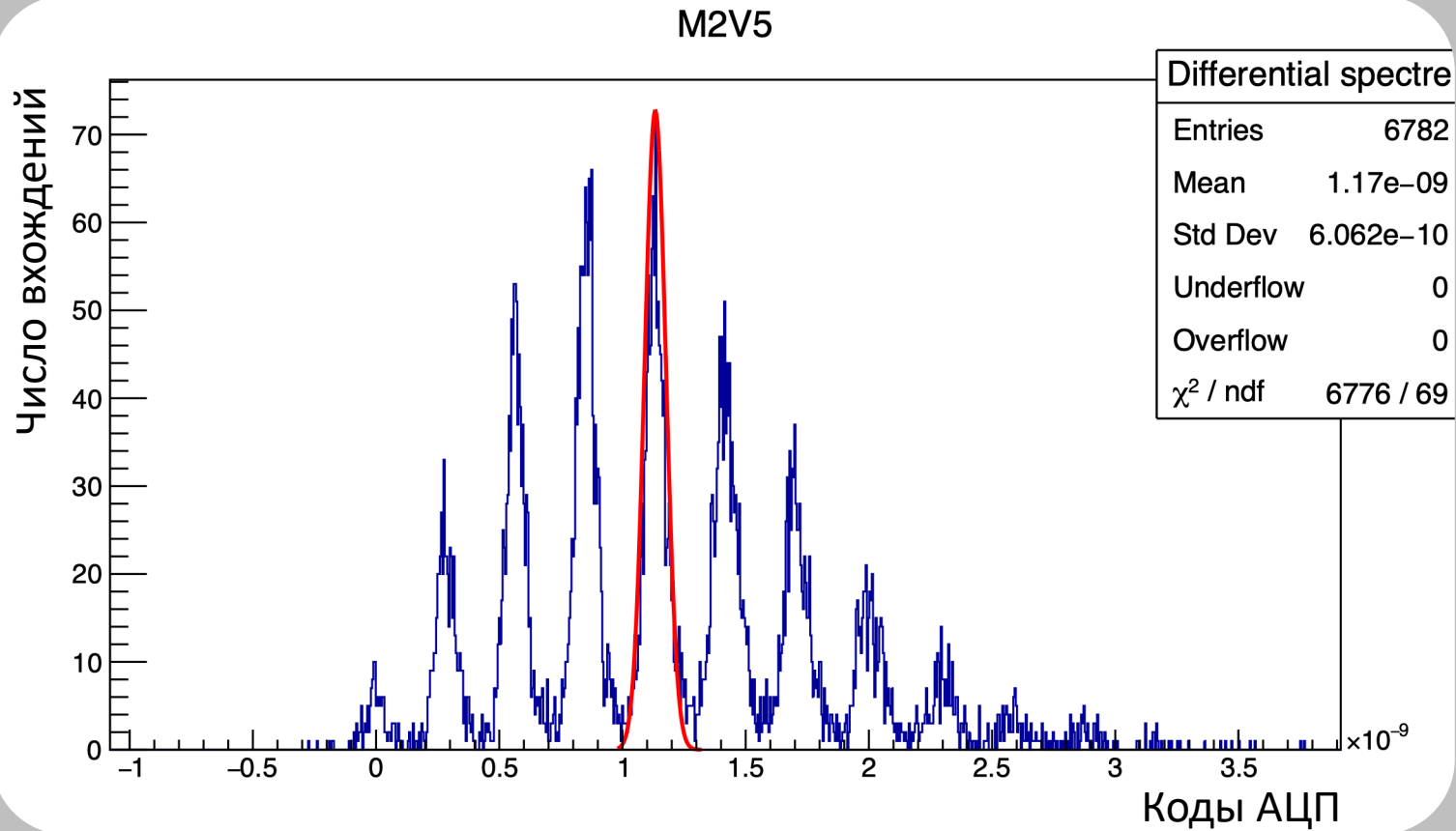
Параметры:

- Высокое: +27 В (АСУ)
- Низкое: Общий
- Полоса пропускания: полн.
- Шумоподавление: нет

Амплитудное разрешение:

$$A_{res} = (34.3 \pm 0.9) \%$$

Результаты для высокого потенциала (с коррекцией)



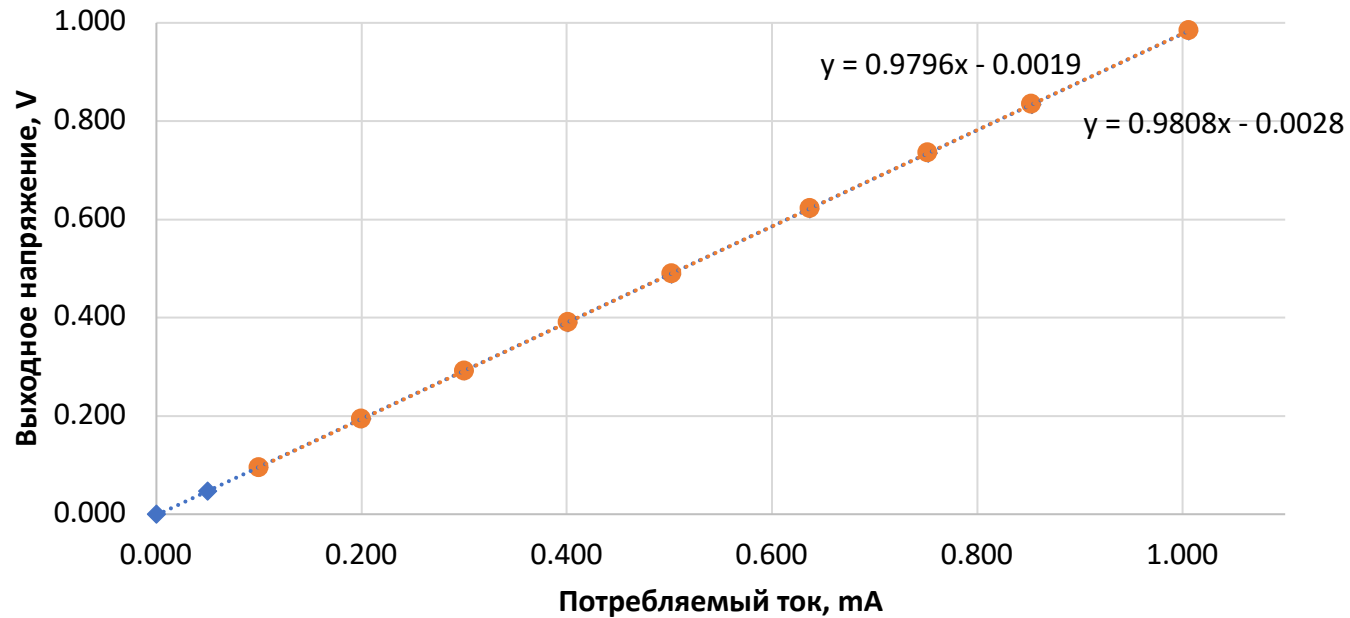
Параметры:

- Высокое: +27 В
- Низкое: Общий
- Полоса пропускания: 20 МГц
- Шумоподавление: +3 дБ

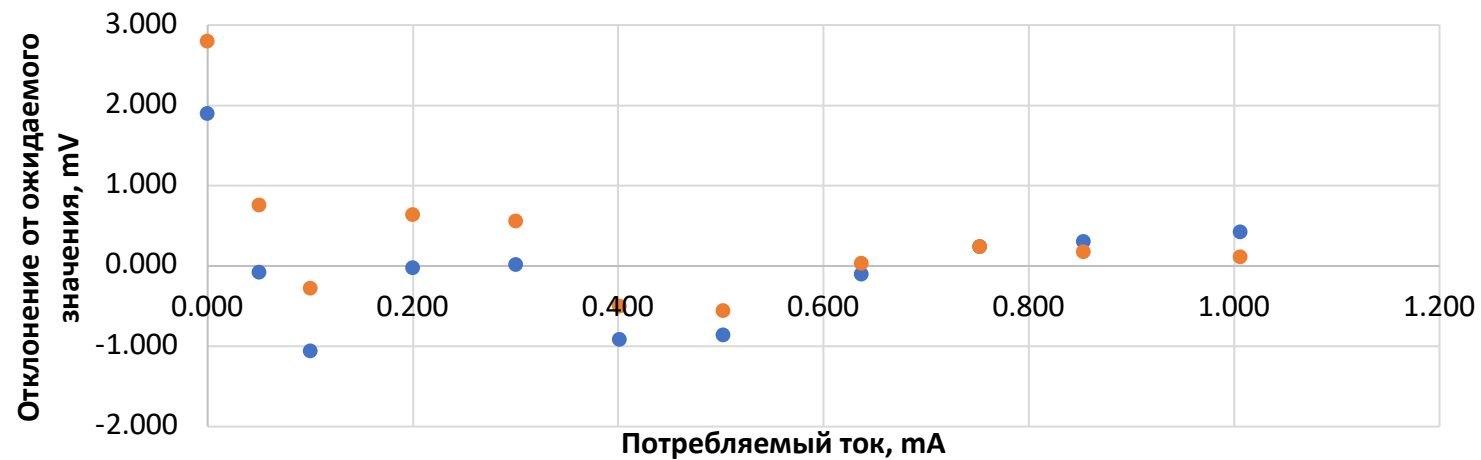
Амплитудное разрешение:

$$A_{res} = (12.7 \pm 0.4) \%$$

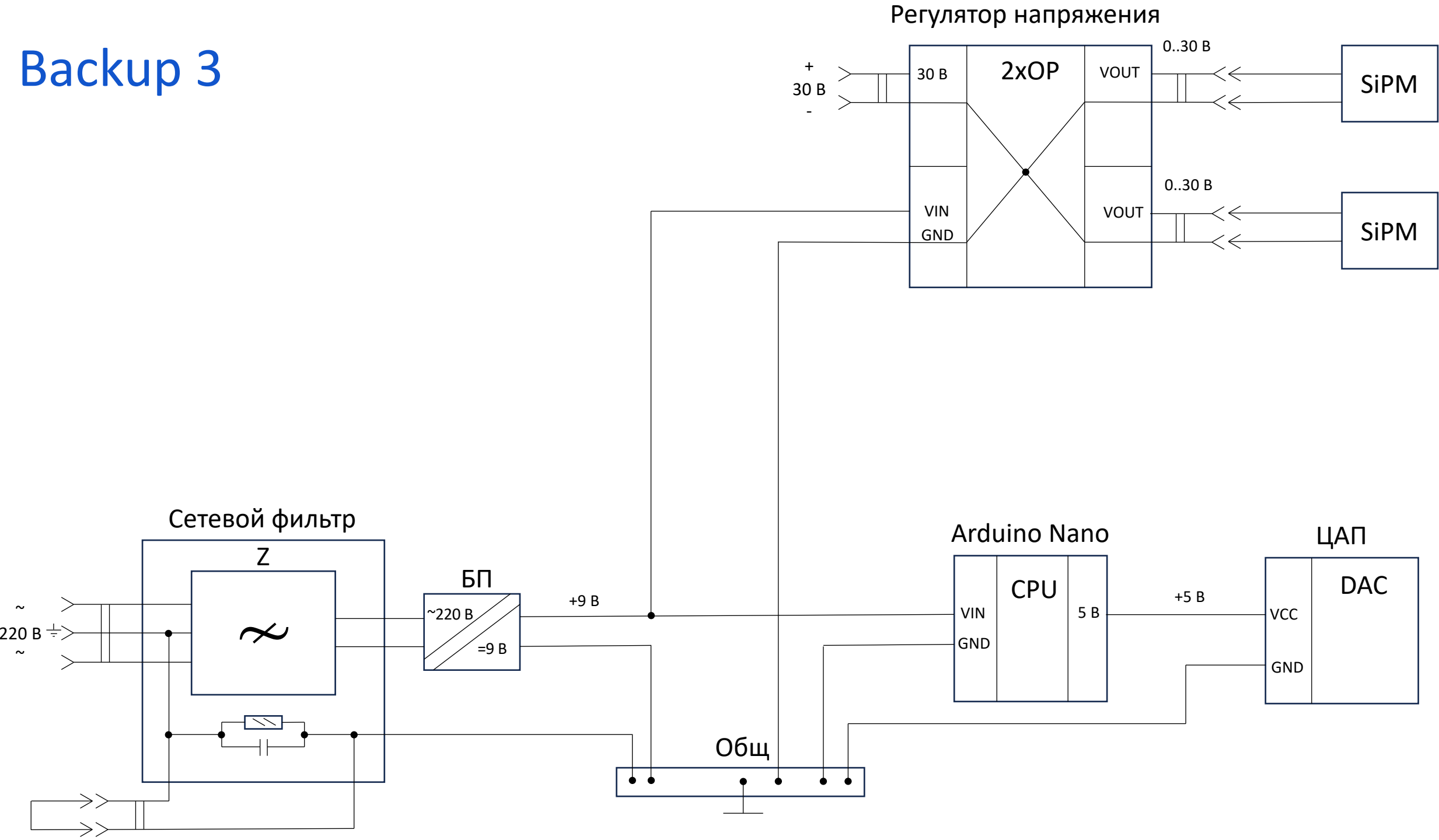
Линейность модуля измерения тока



Отклонение от
ожидаемого значения не
превосходит 3 мкА!



Backup 3



Backup

