

Содержание

1.	Термины	3
2.	Описание системы управления	4
3.	Функциональная схема модуля ввода / вывода	5
4.	Гальваническая изоляция	7
4.1.	Применяемые компоненты для обеспечения гальванической изоляции	9
4.1.1.	ISO power - изолирующие DC / DC преобразователи	9
4.1.2.	ISO RS-485 - преобразователи интерфейса RS-485 со встроенной изоляцией	9
4.1.3.	ISO DI - изоляция дискретных сигналов высокого напряжения	9
4.1.4.	ISO SPI - изоляция цифровых сигналов	9
5.	Протоколы обмена данными между модулями	10
5.1.	Физический уровень	10
5.1.1.	Формула расчета времени передачи для Raspberry	10
5.2.	Прикладной уровень	11
6.	Протоколы обмена данными между платами внутри модуля	12
6.1.	Протокол SPI	12
6.2.	Протокол I ² C	12
6.3.	Распиновка 20-пинового шлейфа	13
7.	Основные микроэлектронные компоненты	14
7.1.	AD7193 - 24-разрядный Σ - Δ АЦП	14
7.2.	ADS8688	14
7.3.	B2405 - DC / DC преобразователи 24 В / 5 В	14
7.4.	CA-IS3098W - приемопередатчик интерфейса RS-485	15
7.5.	CA-IS3105W - изоляция питания	15
7.6.	CA-IS3741HW - изоляция SPI	15
7.7.	CA-IS3980S - изоляция цифровых входов	15
7.8.	DS3231 - часы реального времени	17
7.9.	MCP23x17 - 16-битный расширитель входов / выходов	17
7.10.	TBD62783AFG - матрица из 8 DMOS транзисторов	18
7.11.	Светодиоды серии XL-1606	18
8.	Описание плат	19
8.1.	PM_CPU-RP - контроллер на базе Raspberry Pi	22
8.2.	PMCPU-LLP - контроллер на базе Luckfox Lyra / Luckfox Lyra Plus	26
8.2.1.	Настройка дерева устройств	26
8.3.	PMCPU-LLU - контроллер на базе Luckfox Lyra Ultra	31
8.3.1.	Настройка дерева устройств	31
8.4.	PMMCU-ESP32C3 - микроконтроллер ESP32	36
8.5.	PM_LED-10 - 10 светодиодов	41
8.6.	PM_LED-18 - 18 светодиодов	45
8.7.	PMCNV-DI16sink - 16 дискретных входов (PNP)	49
8.7.1.	Выбор номиналов резисторов	50
8.7.1.1.	Вывод формулы	50
8.7.1.2.	Проверочный расчет	51
8.7.1.3.	Принцип подбора номиналов резисторов	51

8.7.1.4. Выбранные номиналы резисторов для разных уровней напряжения	51
8.7.2. Расчёт потребления	52
8.8. PMCNV-DI16src - 16 дискретных входов (NPN)	56
8.9. PMCNV-DQ16src - 16 дискретных выходов	57
8.9.1. Подключение по I ² C	57
8.9.2. Расчёт потребления	58
8.10. PMCNV-Count6 - подключение 6 сигналов быстрого счёта	62
8.10.1. Подключение энкодеров разных типов	62
8.10.1.1. Выход с открытым коллектором (Open Collector)	62
8.10.1.2. Двухтактный (каскадный, комплементарный) выход (Push-Pull, Totem Pole)	63
8.10.1.3. Выход по напряжению (Voltage Output)	63
8.10.1.4. (TODO) Дифференциальный выход (Line Driver, RS-422) ..	63
8.11. PMCNV-RQ8 - 8 релейных выходов	67
8.11.1. Коммуникация с микроконтроллером	68
8.11.2. Подключение по I ² C	68
8.11.3. Расчёт потребления	68
8.12. PMCNV-AI8IU - 8 аналоговых входов (0..20 мА или 0..10 В)	73
8.13. PMCNV-AI4R - 4 аналоговых входа (термосопротивления)	77
8.14. PMCNV-AI4T - 4 аналоговых входа (термопары)	78
8.14.1. Преобразование измеренного напряжения в температуру	78
8.14.2. Компенсация холодного спая	78
8.14.3. Напряжение смещения	79
8.14.4. Цепи защиты	80
8.15. PMCNV-AI4W - 4 аналоговых входа (тензодатчики)	84
8.15.1. Расчёт потребления	84
8.16. PMCNV-AQ - аналоговый выход	88
8.17. PMCNV-EnMon - контроль параметров сети 400В	89
8.18. PM_HMI-Keyboard	90
8.19. PM_HMI-Touch	94
8.20. PM_DBG-FFC	98
8.21. PMDBG-FFC20	102
9. Комбинирование плат в модули	106
10. Габаритные размеры плат	107
Список использованных источников	109

1. Термины

CMTI Common Mode Transient Immunity - устойчивость к переходным процессам.

I²C Inter-Integrated Circuit - последовательная асимметричная шина для связи между интегральными схемами.

ESD Electrostatic Discharge - разряд электростатического электричества.

EFT Electrical Fast Transient - кратковременный выброс повышенного напряжения.

FFC Flat flexible cable - плоский гибкий кабель для электрического соединения печатных плат.

GPIO General-Purpose Input / Output - интерфейс ввода/вывода общего назначения.

LDO Low-dropout regulator - линейный регулятор напряжения с малым падением напряжения

SPI Serial Peripheral Interface - последовательный синхронный стандарт передачи данных для связи между интегральными схемами

UART Universal Asynchronous Receiver-Transmitter - узел вычислительных устройств, предназначенный для организации связи с другими цифровыми устройствами.

2. Описание системы управления

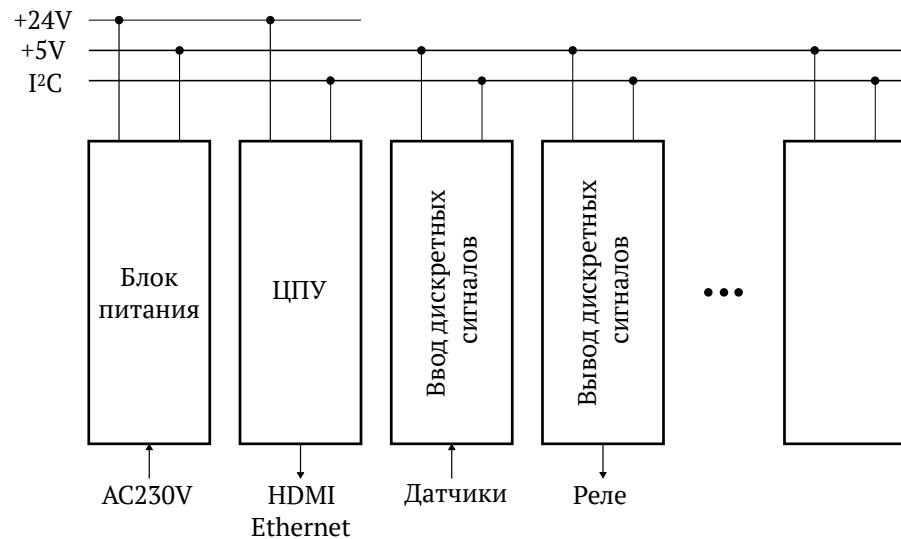


Рис. 1. Концепция модульной системы

Система управления состоит из набора совместимых по подключению и внешним габаритам модулей.

Отдельные модули связаны между собой общей шиной. Шина выполнена в виде стандартного кабеля с двумя витыми парами, обжатого двумя разъемами RJ11. Модули необходимо располагать так, чтобы суммарная длина шины была минимальной. По шине передаётся питание (GND, +5V) и сигналы интерфейса I²C (SDA, SCL).

Каждый модуль на шине имеет свой адрес, который задается DIP-переключателями на каждом модуле. Возможно использование до 8 модулей одного типа.

На данный момент реализованы модули:

Можно дополнительно реализовать:

- Модули аналоговых входов:
 - Тензодатчики
 - Ток 4-20mA
 - Напряжение 0-10В
 - Термосопротивление
 - Термопары
- Модули аналоговых выходов:
 - Ток 4-20mA
 - Напряжение 0-10В
- Модуль с аккумуляторными батареями
- Модуль управления RGB светодиодными лентами

3. Функциональная схема модуля ввода / вывода

На рисунке 2 представлена функциональная схема модуля ввода / вывода.

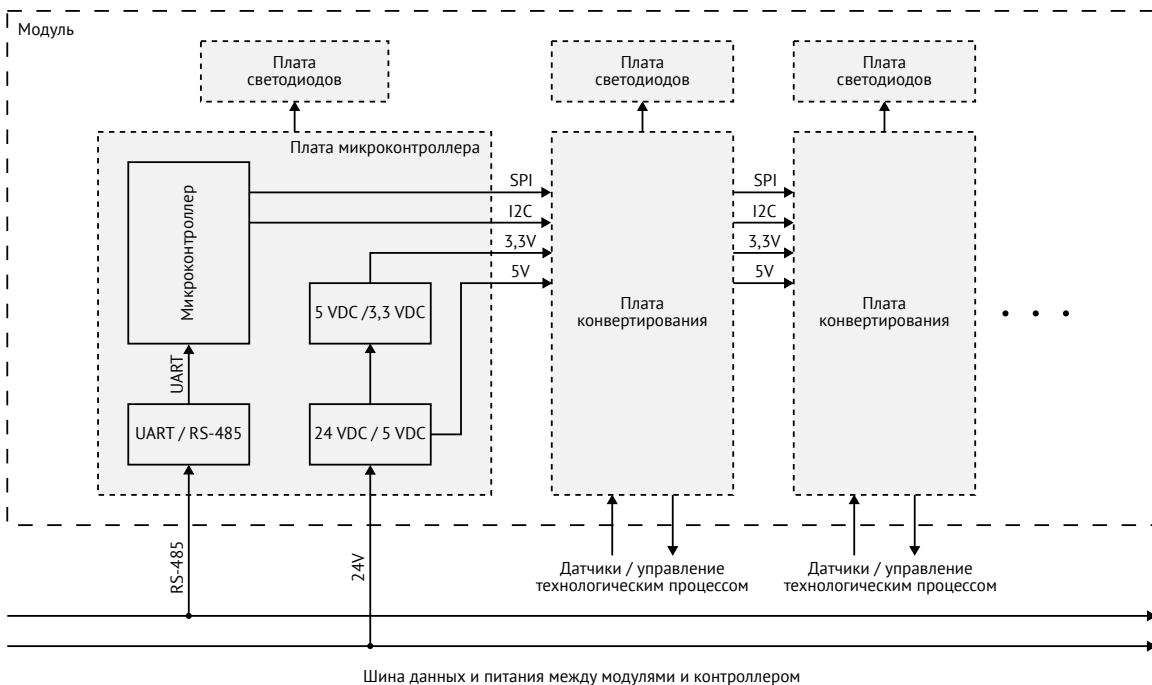


Рис. 2. Функциональная схема модуля ввода / вывода

Модуль состоит из нескольких плат.

Плата конвертирования

Основная плата с микросхемами преобразования цифровых сигналов в электрические и обратно. Для разных модулей ввода / вывода данная плата отличается.

Некоторые платы конвертирования можно комбинировать вместе в одном модуле. Максимальное количество - 4 платы. Количество ограничено разными факторами:

- Количеством микросхем, которыми должен управлять микроконтроллер. На «простых» платах (например, PMCNV-DI16sink или PM-CNV_RQ8) такая микросхема одна. На более «сложных» может быть больше. Например, на плате PMCNV-AI4T таких микросхем 3.
- Мощностью, потребляемой компонентами. Например, на плате PMCNV-RQ8 установлены реле, которые потребляют значительный ток, поэтому количество таких плат ограничено 2.

Например, к плате PMCNV-DI16sink можно подключить 16 дискретных датчиков. Т.е. к модулю можно подключить до 64 дискретных датчиков.

Информация о состоянии выводится на плату светодиодов.

Плата с микроконтроллером

Вспомогательная плата с микроконтроллером и регулятором напряжения. Данная плата унифицирована для всех модулей. Микроконтроллер по интерфейсу RS-485 подключается к ЦПУ и по интерфейсу SPI или I²C управляет микросхемами платы конвертирования.

Поскольку у каждого устройства на шине RS-485 должен быть уникальный адрес, на плате есть трехпозиционный DIP-переключатель для задания адреса конкретного модуля. Таким образом, можно использовать до 8 модулей.

В качестве микроконтроллера используется чип ESP32-C3. На чипе есть разъем для подключения внешней антенны, что дает возможность использовать беспроводное подключение.

Микроконтроллер программируется с помощью обычного кабеля Micro-USB. На плате выведены кнопки BOOT и EN, для перевода микроконтроллера в режим загрузки.

На плате устанавливается DC / DC преобразователь 24 В / 5 В, а также LDO регулятор выходом 3,3В .

Подключение к шине выполняется через 10-пиновый разъем (2 ряда по 5 контактов).

Подключение к плате конвертирования и плате светодиодов выполняется через 12-пиновые кабели FFC.

Информация о состоянии выводится на плату светодиодов.

Плата со светодиодами

Вспомогательная плата со светодиодами для отображения состояния микроконтроллера и электрических сигналов. В модуле может использоваться несколько таких плат. Есть версии на 10 и на 18 светодиодов.

4. Гальваническая изоляция

Гальваническая изоляция в модулях ввода / вывода применяется по разным причинам:

- Предотвращает протекание выравнивающего тока из-за разности потенциалов объектов, заземленных на разных шинах [1]. У разных модулей и контроллера независимое подключение к датчикам / исполнительным механизмам.
- Повышает устойчивость к разрядам статического электричества (ESD), кратковременным выбросам повышенного напряжения (EFT) [2].
- Понижение шумов на линиях передачи данных [3].

На рисунке 3 показана схема с гальванически изолированными областями. Можно выделить три области:

1. Область шины передачи данных и питания.
2. Область микроконтроллера, обеспечивающего работу платы конвертирования и обмен данными с основным контроллером.
3. Область подключения датчиков и исполнительных механизмов.

Области связаны между собой с помощью специальных компонентов, обеспечивающих требуемый уровень изоляции.

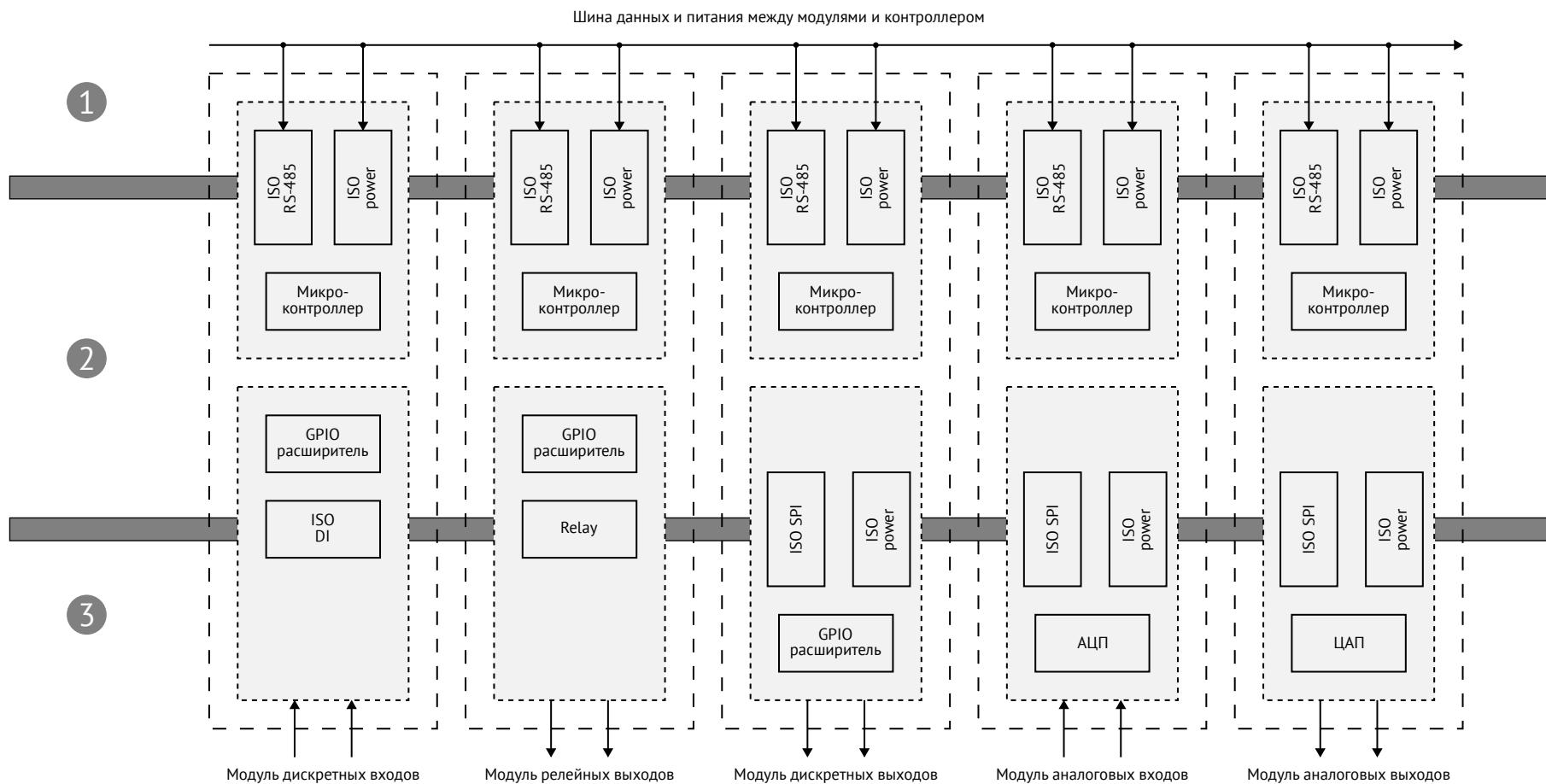


Рис. 3. Области гальванической изоляции

4.1. Применяемые компоненты для обеспечения гальванической изоляции

4.1.1. ISO power - изолирующие DC / DC преобразователи

[4]:

4.1.2. ISO RS-485 - преобразователи интерфейса RS-485 со встроенной изоляцией

4.1.3. ISO DI - изоляция дискретных сигналов высокого напряжения

4.1.4. ISO SPI - изоляция цифровых сигналов

5. Протоколы обмена данными между модулями

5.1. Физический уровень

CAN?? [5]

RS-485

Терминаторы

Выбор скорости - скрины с логанализатора

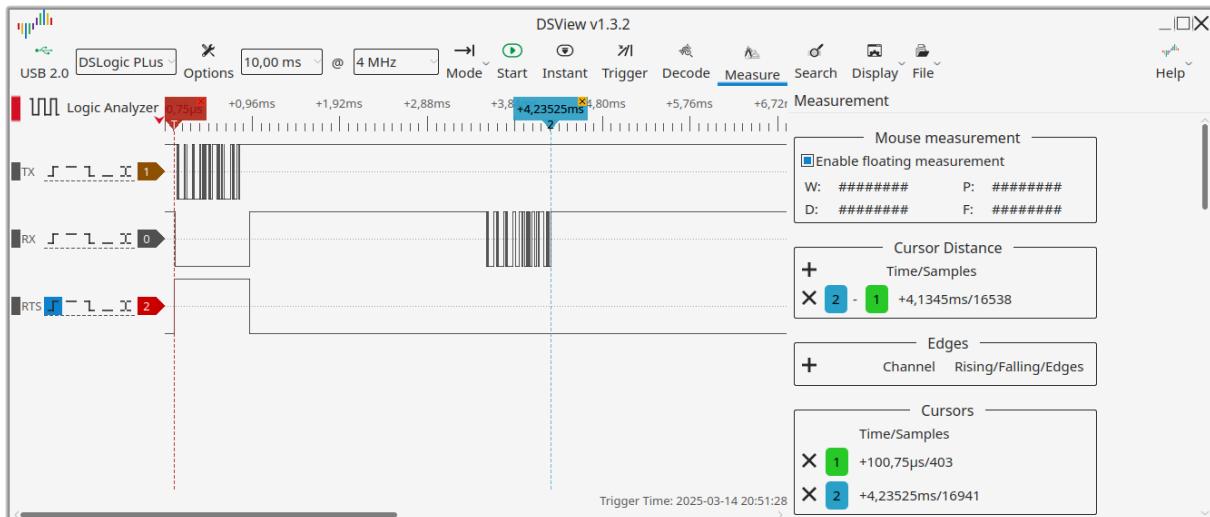


Рис. 4. Распиновка коннектора протокола SPI

5.1.1. Формула расчета времени передачи для Raspberry.

TODO - задержка передачи с логанализатора.

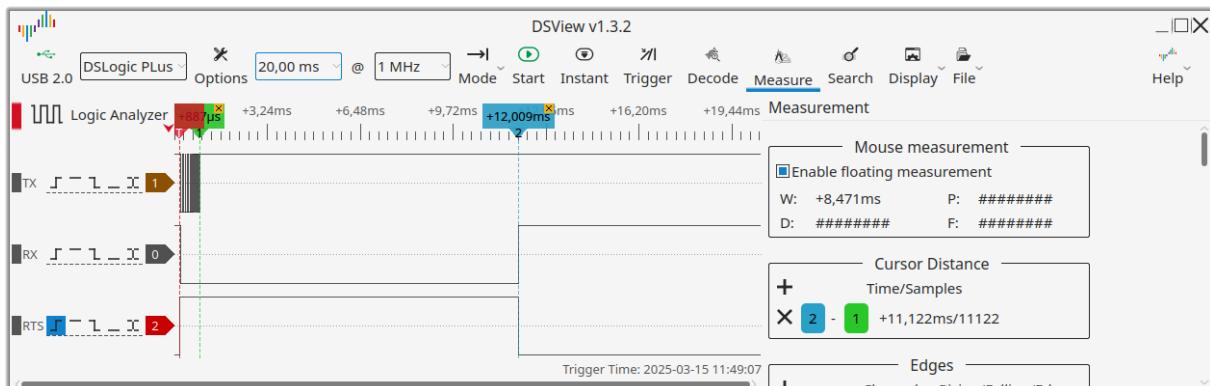


Рис. 5. Распиновка коннектора протокола SPI

$$v_{\text{data}} = v_{\text{uart}} \cdot \frac{\text{data_bits}}{\text{start_bits} + \text{data_bits} + \text{parity_bits} + \text{stop_bits}} \quad (1)$$

Где:

- v_{data} - скорость передачи данных, [бит/с]
- v_{uart} - скорость интерфейса UART, [бод]
- start_bits - количество стартовых бит. Как правило, 1 стартовый бит.
- data_bits - полезные данные. Значение в диапазоне 5 .. 8 бит.
- parity_bits - бит четности. 0 .. 1 бит.

- t - количество стоповых бит. 1 .. 2 бита.

Расчет времени передачи данных:

$$t = \frac{V_{\text{data}}}{v_{\text{data}}} \quad (2)$$

Где:

- t - время передачи, [с]
- V_{data} - объем данных для передачи, [бит]
- v_{data} - скорость передачи данных, [бит/с]

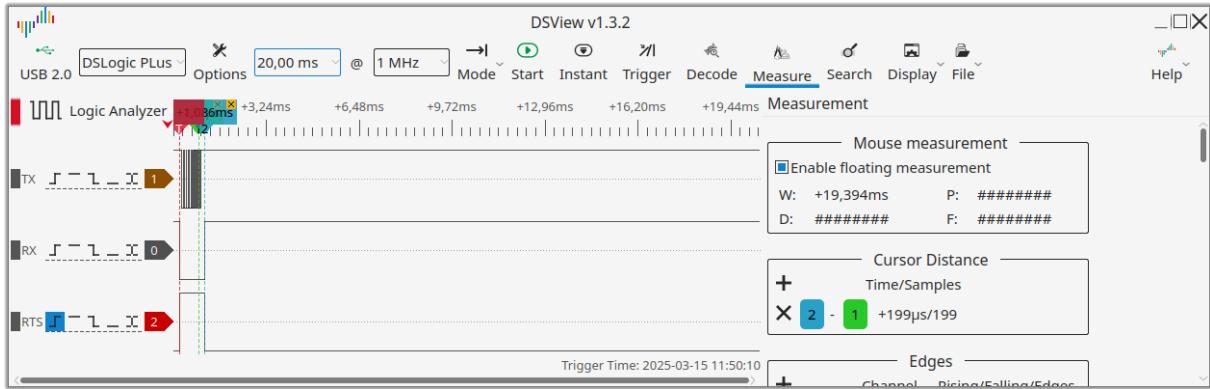


Рис. 6. Распиновка коннектора протокола SPI

5.2. Прикладной уровень

Сериализация данных - MessagePack.

Контрольная сумма

Примеры структур обмена данных между модулями

6. Протоколы обмена данными между платами внутри модуля

Наиболее распространенными протоколами обмена между интегральными схемами являются SPI и I²C. Разработанная плата PMMCU-ESP32C3 позволяет подключать платы конвертирования по обоим протоколам.

6.1. Протокол SPI

За основной протокол связи между платами внутри модуля принят SPI.

На рисунке 7 приведена распиновка разъема FFC для подключения платы микроконтроллера к платам конвертирования.

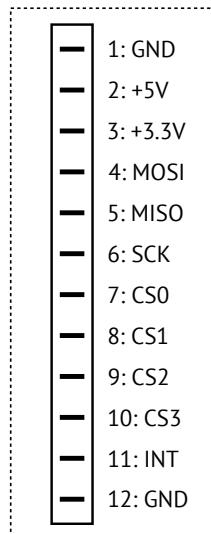


Рис. 7. Распиновка коннектора протокола SPI

Функции пинов:

- +5V - питание ведущих устройств напряжением +5 В.
- +3.3V - питание ведущих устройств напряжением +3,3 В.
- MOSI (Master Out Slave In) - передача данных от ведущего к ведомому
- MISO (Master In Slave Out) - передача данных от ведомого к ведущему
- SCK (Serial Clock) - передача тактового сигнала
- CS0 .. CS3 (Chip Select) - выбор микросхемы. 4 сигнала дают возможность подключать до 4 чипов через один коннектор.
- INT (Interrupt) - сигнал прерывания. Передается от ведущего устройства к ведомому при наступлении каких-то заданных событий.
- GND (Ground) - общий потенциал.

6.2. Протокол I²C

На рисунке 8 приведена распиновка разъема FFC для подключения платы микроконтроллера к платам конвертирования.

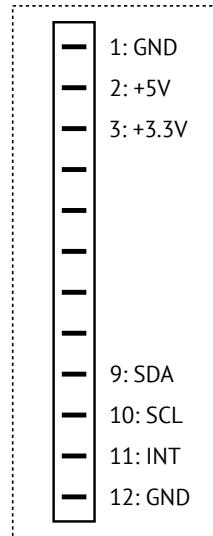


Рис. 8. Распиновка коннектора протокола I²C

Функции пинов:

- +5V - питание ведущих устройств напряжением +5 В.
- +3.3V - питание ведущих устройств напряжением +3,3 В.
- SDA (Serial Data) - передача данных
- SCL (Serial Clock) - передача тактового сигнала
- INT (Interrupt) - сигнал прерывания. Передается от ведущего устройства к ведомому при наступлении каких-то заданных событий.
- GND (Ground) - общий потенциал.

6.3. Распиновка 20-пинового шлейфа

1. GND
2. GND
3. +5V
4. +5V
5. +3V3
6. +3V3
7. GND
8. SPI_MOSI
9. SPI_MISO
10. SPI_SCK
11. SPI_CS0
12. SPI_CS1
13. SPI_CS2
14. SPI_CS3
15. GND
16. GND
17. I2C_SDA
18. I2C_SCL
19. GND
20. GND

7. Основные микроэлектронные компоненты

Ниже перечислены основные электронные компоненты, которые применяются в платах.

7.1. AD7193 - 24-разрядный $\Sigma - \Delta$ АЦП

АЦП AD7193 компании Analog Devices хорошо подходит для измерения показаний датчиков с небольшим полным диапазоном измерения. Основные характеристики АЦП:

- Тип АЦП - 24-разрядный сигма-дельта ($\Sigma - \Delta$).
- Встроенный усилитель с программируемым коэффициентом усиления 1 .. 128. Позволяет измерять напряжения в диапазоне 40 мВ .. 5 В.
- Низкий уровень шумов. До 22 разрядов при низкой частоте дискретизации.
- 4 дифференциальных канала измерения. Автоматический мультиплексор.
- Подключается к микроконтроллеру по интерфейсу SPI.

Функциональная схема показана на рисунке 9.

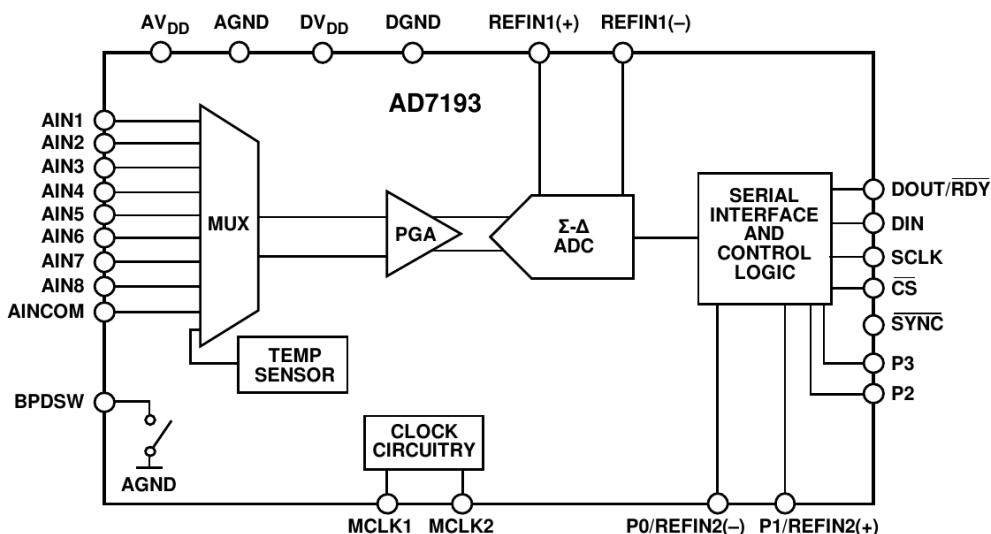


Рис. 9. Функциональная схема АЦП AD7193

Используется в платах:

- PM-CNV_AI4-W
- PMCNV-AI4R
- PMCNV-AI4T

7.2. ADS8688

7.3. B2405 - DC / DC преобразователи 24 В / 5 В

- B2405LS-1WR3 - мощность 1 Вт
- B2405S-2WR3 - мощность 2 Вт
- B2405S-3WR3 - мощность 3 Вт

Основные характеристики:

Используется в платах:

- PMMCU-ESP32C3

7.4. CA-IS3098W - приемопередатчик интерфейса RS-485

В микроконтроллерах / мини-компьютерах присутствует интерфейс UART. Для преобразования в протокол RS-485 используются передатчики CA-IS3098W [6] со встроенной гальванической изоляцией.

Основные параметры:

- Скорость передачи - до 20Mbps
- До 256 устройств в одном сегменте сети
- Гальваническая изоляция: $5 \text{ kV}_{\text{RMS}}$ и $\pm 150 \frac{\text{kV}}{\mu\text{s}}$ CMTI
- Защита от короткого замыкания и перегрева

На рисунке 10 показана функциональная схема передатчика.

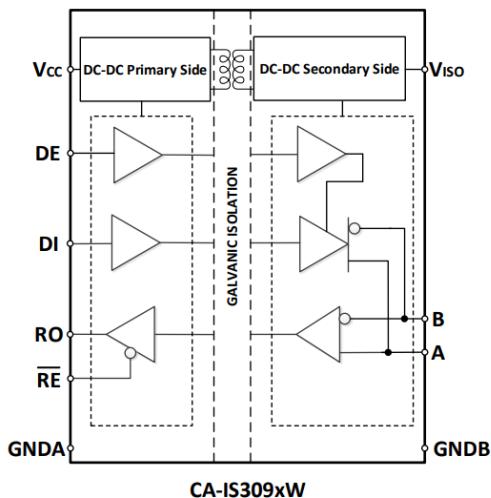


Рис. 10. Функциональная схема передатчика RS-485

Обозначения выводов:

- DE (Driver Output Enable) - Разрешение выходов передатчика
- DI (Driver Input) — Вход передатчика
- RO (Receiver Output) - Выход приемника
- $\overline{\text{RE}}$ (Receiver Output Enable) - Разрешение выхода приемника
- A - Неинвертирующий вход/выход
- B - Инвертирующий вход/выход

Используется в платах:

- PM_CPU-RP
- PMMCU-ESP32C3

7.5. CA-IS3105W - изоляция питания

7.6. CA-IS3741HW - изоляция SPI

7.7. CA-IS3980S - изоляция цифровых входов

В промышленности для подключения цифровых датчиков наиболее часто применяется постоянное напряжение 24 В, тогда как микроконтроллеры работают, как правило, на напряжении 3,3 В или 5 В.

В данном проекте в качестве изолятора применяется чип CA-IS3980S [7]. Функциональная схема показана на рисунке 11.

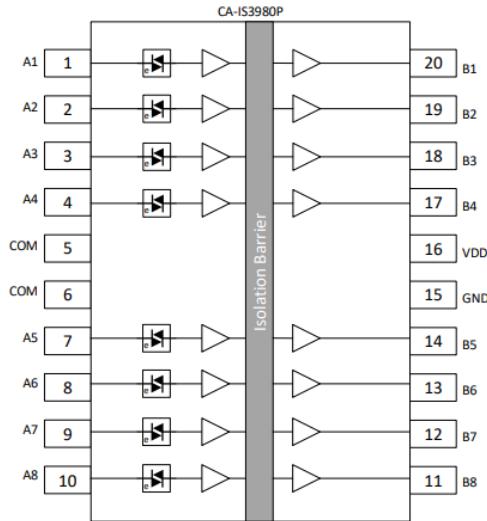


Рис. 11. Функциональная схема изолятора цифровых входов

Основные характеристики:

- Совместимость со стандартом IEC 61131-2, тип входов 1, 2 и 3.
- 8 параллельных каналов.
- Скорость передачи до 2 Mbps.
- $\pm 300 \frac{kV}{\mu s}$ CMTI.
- 2500V_{RMS} изоляция.

На рисунке 12 показана упрощенная схема отдельного канала. The internal LED emulator output drives an ON-OFF keying (OOK) modulator, to transfer digital signals across the SiO₂ based isolation barrier between circuits with different power domains. In many applications, this capacitive isolation technology is replacing optocoupler-based solution because it can reduce the power requirements and take up less board space while offering the same isolation capability.

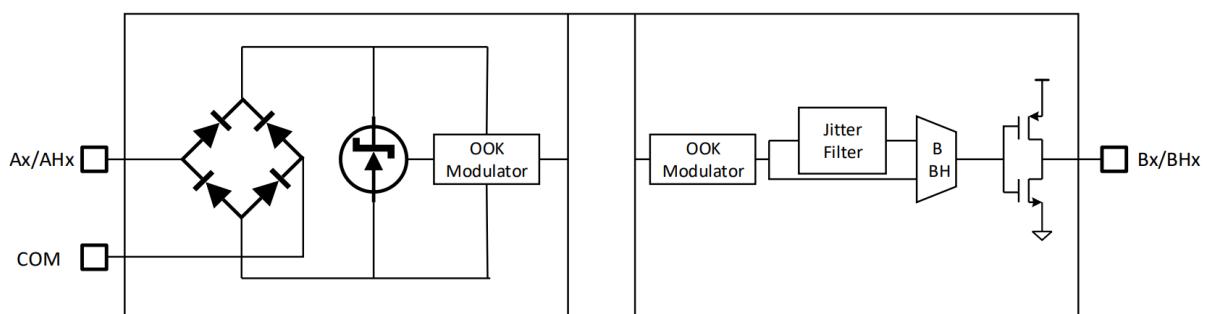


Рис. 12. Упрощенная схема для отдельного канала

On the output side, the signal is either passed directly to the output stage in the case of a high-speed channel (BHx), or the signal is routed through a debounce filter block in the case of a low-speed channel (Bx) for robust operation in industrial environments.

Используется в платах:

- PMCNV-DI16sink.

7.8. DS3231 - часы реального времени

7.9. MCP23x17 - 16-битный расширитель входов / выходов

Применяется для опроса состояния входов (на платах входов) и управления выходами (на платах выходов).

Основные характеристики:

- 16 двунаправленных входов / выходов
- Связь с микроконтроллером по протоколу SPI (MCP32S17) или I²C (MCP32017).
- Выходы с прерываниями по событию срабатывания входов.

Функциональная схема показана на рисунке 13.

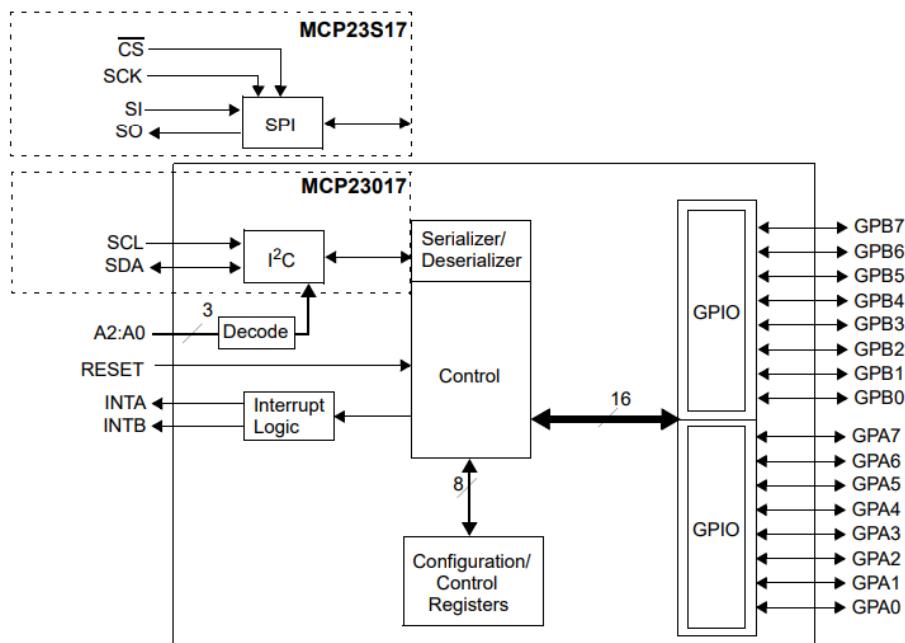


Рис. 13. Функциональная схема MCP23x17

Адрес устройства определяется замыканием пинов A0..A2 на «-» или «+».

A2	A1	A0	Адрес
-	-	-	32
-	-	+	33
-	+	-	34
-	+	+	35
+	-	-	36
+	-	+	37
+	+	-	38
+	+	+	39

Таблица 1. Адрес микросхемы MCP23x17

Используется в платах:

- [PMCNV-DI16sink](#)

- PMCNV-DQ16src
- PMCNV-RQ8
- PM-HMI_Keyboard

7.10. TBD62783AFG - матрица из 8 DMOS транзисторов

Используется для управления силовыми нагрузками, поскольку нагрузочная способность выходов микроконтроллера довольно низкая.

Основные характеристики:

- напряжение питания до 50 В
- выходной ток на каждый канал до 500 мА

На рисунке 14 показана эквивалентная схема для отдельного канала.

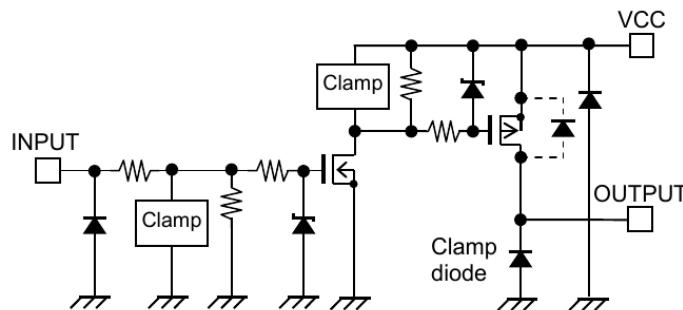


Рис. 14. Эквивалентная схема для отдельного канала

Используется в платах:

- PMCNV-DQ16src
- PMCNV-RQ8

7.11. Светодиоды серии XL-1606

Серия светодиодов бокового свечения компании XinLight. Устанавливаются в посадочное место размера 0602.

Артикул	Цвет
XL-1606UYC	желтый
XL-1606UWC	белый
XL-1606UOC	оранжевый
XL-1606UGC	изумрудно-зеленый
XL-1606UBC	синий
XL-1606SYGC	зеленый
XL-1606SURC	красный

8. Описание плат

В таблице 3 приведён список всех плат.

Артикул	Описание	Версия	3,3 В	5 В
Платы ЦПУ				
PMCPU-RP	ЦПУ на базе мини-компьютера Raspberry Pi или совместимого с ним	0.0.0		
PMCPU-LLP	ЦПУ на базе мини-компьютера Luckfox Lyra / Luckfox Lyra Plus	0.0.0		
PMCPU-LLU	ЦПУ на базе мини-компьютера Luckfox Lyra Ultra	0.0.0		
Платы микроконтроллеров				
PMMCU-ESP32C3	Плата на базе микроконтроллера ES32-C3 для работы плат конвертирования и передачи данных на ЦПУ	0.0.7		
Платы светодиодов				
PMLED-10	Плата на 10 светодиодов	0.0.0		
PMLED-18	Плата на 18 светодиодов	0.0.0		
Платы конвертирования цифровых и электрических сигналов				
PMCNV-DI16sink	Подключение 16 дискретных входов постоянного напряжения (PNP)	0.0.0	70,4 мА 232,3 мВт	0 мА 0 мВт
PMCNV-DI16src	Подключение 16 дискретных входов постоянного напряжения (NPN)	0.0.0	70,4 мА 232,3 мВт	0 мА 0 мВт
PMCNV-Count6	Подключение 6 сигналов быстрого счёта	0.0.0		
PMCNV-DQ16src	Подключение 16 дискретных выходов постоянного напряжения	0.0.0	6,9 мА 22,8 мВт	198,2 мА 991 мВт
PMCNV-RQ8	Подключение 8 релейных выходов	0.0.0	31 мА 102,3 мВт	344 мА 1720 мВт
PMCNV-AI4R	Подключение 4 термосопротивлений	0.0.0		
PMCNV-AI4T	Подключение 4 термопар	0.0.2		
PMCNV-AI4W	Подключение 4 тензодатчиков	0.0.3	0 мА 0 мВт	35,6 мА 178 мВт
PMCNV-AI8IU	Подключение 8 датчиков 4 .. 20 мА или 0 .. 10 В	0.0.0		

Артикул	Описание	Версия	3,3 В	5 В
<u>PMCNV-AQ</u>	Подключение аналоговых выходов	0.0.0		
<u>PMCNV-EnMon</u>	Контроль параметров сети 400В	0.0.0		
Подключение цифровых интерфейсов				
<u>PMIFC-IIC8</u>	Подключение 8 устройств по I2C	0.0.0		
<u>PMIFC-1Wire8</u>	Подключение 8 устройств по 1-Wire	0.0.0		
Платы для создания интерфейса оператора				
<u>PM-HMI_Keyboard</u>	Клавиатура 7x7	0.0.0		
<u>PM-HMI_Touch</u>	Подключение touch-контроллера дисплея	0.0.0		
Платы для отладки				
<u>PMDBG-FFC</u>	Для подключения осциллографа в разрыв кабеля FFC	0.0.0		
<u>PMDBG-FFC20</u>	Для подключения осциллографа в разрыв кабеля FFC 20-пинов	0.0.1		

Таблица 3. Перечень плат

8.1. PM_CPU-RP - контроллер на базе Raspberry Pi

ЦПУ на базе мини-компьютера Raspberry Pi, или совместимого по габаритам, креплению и 40-пиновому штекеру.

На плате располагается микросхема часов реального времени DS3231 (раздел 7.8). Получить доступ к микросхеме можно по протоколу I²C. Для работы часов при отсутствии внешнего питания присутствует держатель батарейки CR1220.

На плате есть микросхема Flash памяти на 32 Мбит. Подключена через интерфейс SPI0. Хотя система Raspberry работает с карты памяти формата MicroSD, для надежной работы карту памяти рекомендуется переключать в режим «Только для чтения». Поэтому необходима внешняя память, для хранения настроек пользователя.

Микроконтроллер подключается к шине RS-485 через приемопередатчик UART - RS-485 с гальванической изоляцией. Подробнее о преобразователе описано в разделе 7.4.

Программировать можно практически на всех языках программирования, поддерживающих архитектуру процессора ARM64.

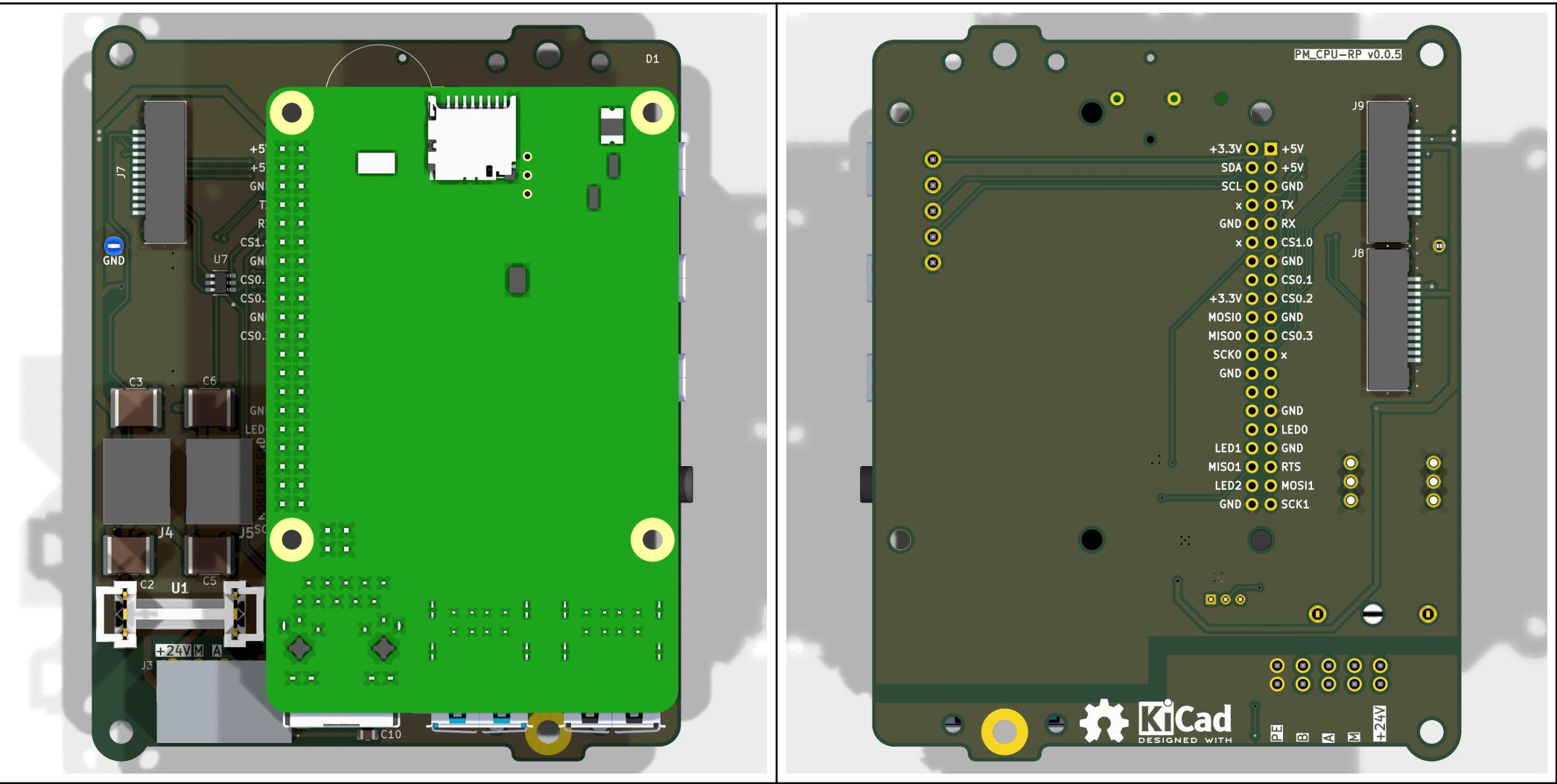
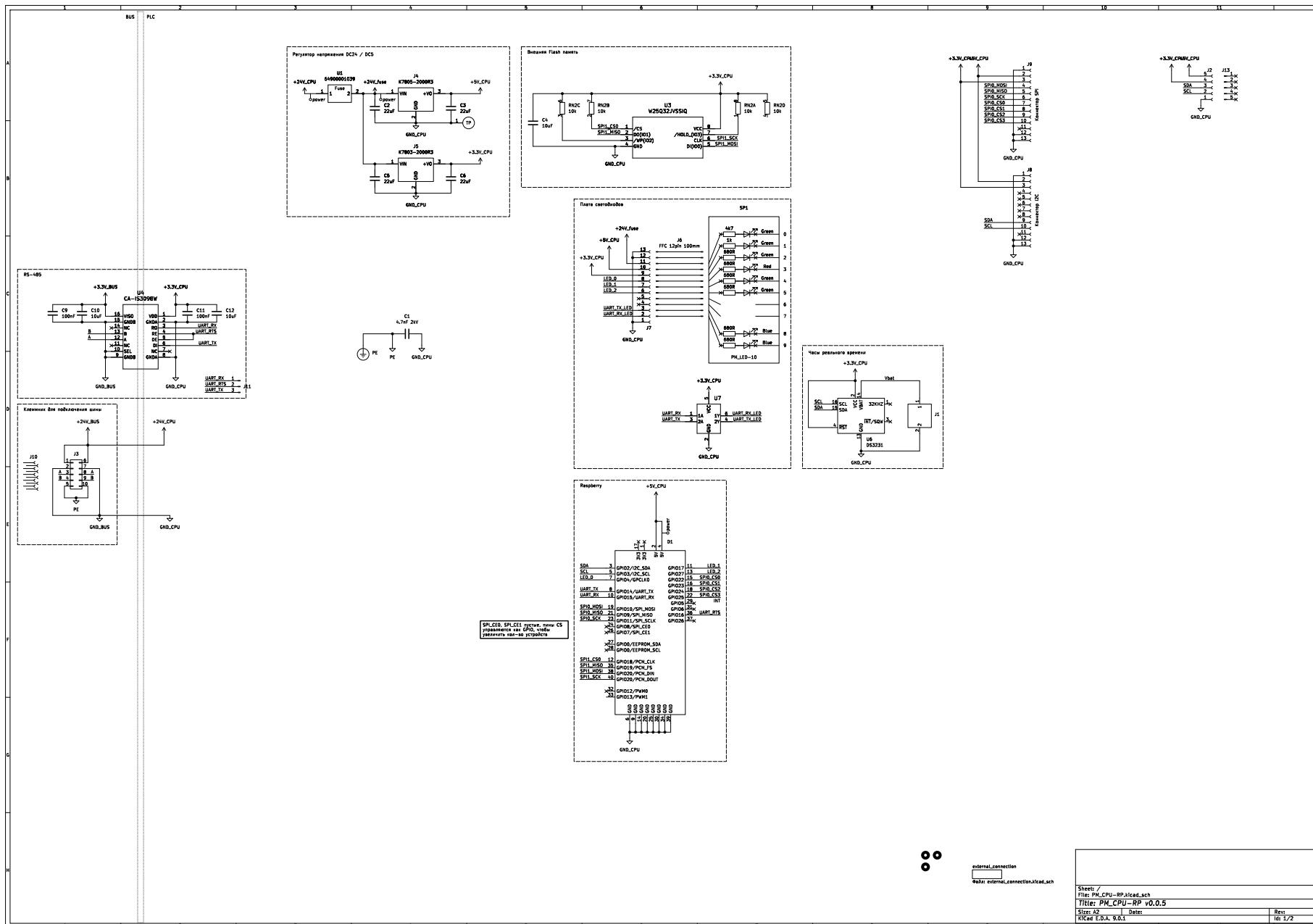


Рис. 15. Внешний вид платы PM_CPU-RP



Обозначение	Количе- ство	part_ipn
C1	1	C_4.7nF_2kV_1812_MLCC-X7R
C2, C3, C5, C6	4	C_22uF_50V_2220_MLCC-X7R
C4, C10, C12	3	C_10uF_16V_0805_MLCC-X5R
C9, C11	2	C_100nF_16V_0603_MLCC-X7R
D2, D3, D4, D6, D7	5	XL-1606SYGC
D5	1	XL-1606SURC
D8, D9	2	XL-1606UBC
J1	1	BS-12-A1AJ002-F
J2	1	15EDGRC-3.5-05P
J3	1	15EDGRHC-THR-3.5-10P
J4	1	K7805-2000R3
J5	1	K7803-2000R3
J6	1	FFC_12P_P1.0_100mm_straight
J7, J8, J9	3	AFA07-S12FCC-00
J10	1	15EDGKNH-3.5-10P
J11	1	PinHeader_01x03_P2.00_THT_straight
J13	1	15EDGK-3.5-05P
R1	1	R_1k_0603_1%
R2	1	R_4k7_0603_1%
R3, R4, R5, R6, R7, R8	6	R_680R_0603_1%
RN2	1	R_10k_0603x4_1%
SP1	1	PM_LED-10-v0.0.1
U1	1	64900001039
U2	1	Keystone_5117
U3	1	W25Q32JVSSIQ
U4	1	CA-IS3098W
U6	1	DS3231SN
U7	1	SN74LVC2G14DBVR

Таблица 4. Перечень элементов платы PM_CPU-RP

8.2. PMCPU-LLP - контроллер на базе Luckfox Lyra / Luckfox Lyra Plus

8.2.1. Настройка дерева устройств

Для работы периферии необходимо настроить дерево устройств.

Сигнал	Rockchip matrix	GPIO устройство; линия
SPI ₀ - /dev/spidev0.0		
MOSI	RM_IO12	/dev/gpiochip0; 12
MISO	RM_IO13	/dev/gpiochip0; 13
SCK	RM_IO11	/dev/gpiochip0; 11
CS0	RM_IO10	/dev/gpiochip0; 10
CS1	RM_IO9	/dev/gpiochip0; 9
CS2	RM_IO8	/dev/gpiochip0; 8
CS3	RM_IO7	/dev/gpiochip0; 7
I ² C ₀ - /dev/i2c-0		
SDA	RM_IO6	/dev/gpiochip1; 6
SCL	RM_IO5	/dev/gpiochip1; 5

Таблица 5. Назначение сигналов выводам процессора

Путь к файлу с настройками:

- Для Luckfox Lyra - kernel/arch/arm/boot/dts/rk3506g-luckfox-lyra.dts
- Для Luckfox Lyra Plus - kernel/arch/arm/boot/dts/rk3506g-luckfox-lyra-plus.dts

```
&spi0 {  
    status = "okay";  
    pinctrl-names = "default";  
    pinctrl-0 = <&rm_iol1_spi0_clk &rm_iol2_spi0_mosi &rm_iol3_spi0_miso>;  
    spidev@0 {  
        compatible = "rockchip,spidev";  
        spi-max-frequency = <100000000>;  
        reg = <0>;  
    };  
};  
  
&i2c0 {  
    status = "okay";  
    pinctrl-names = "default";  
    pinctrl-0 = <&rm_io5_i2c0_scl &rm_io6_i2c0_sda>;  
};
```

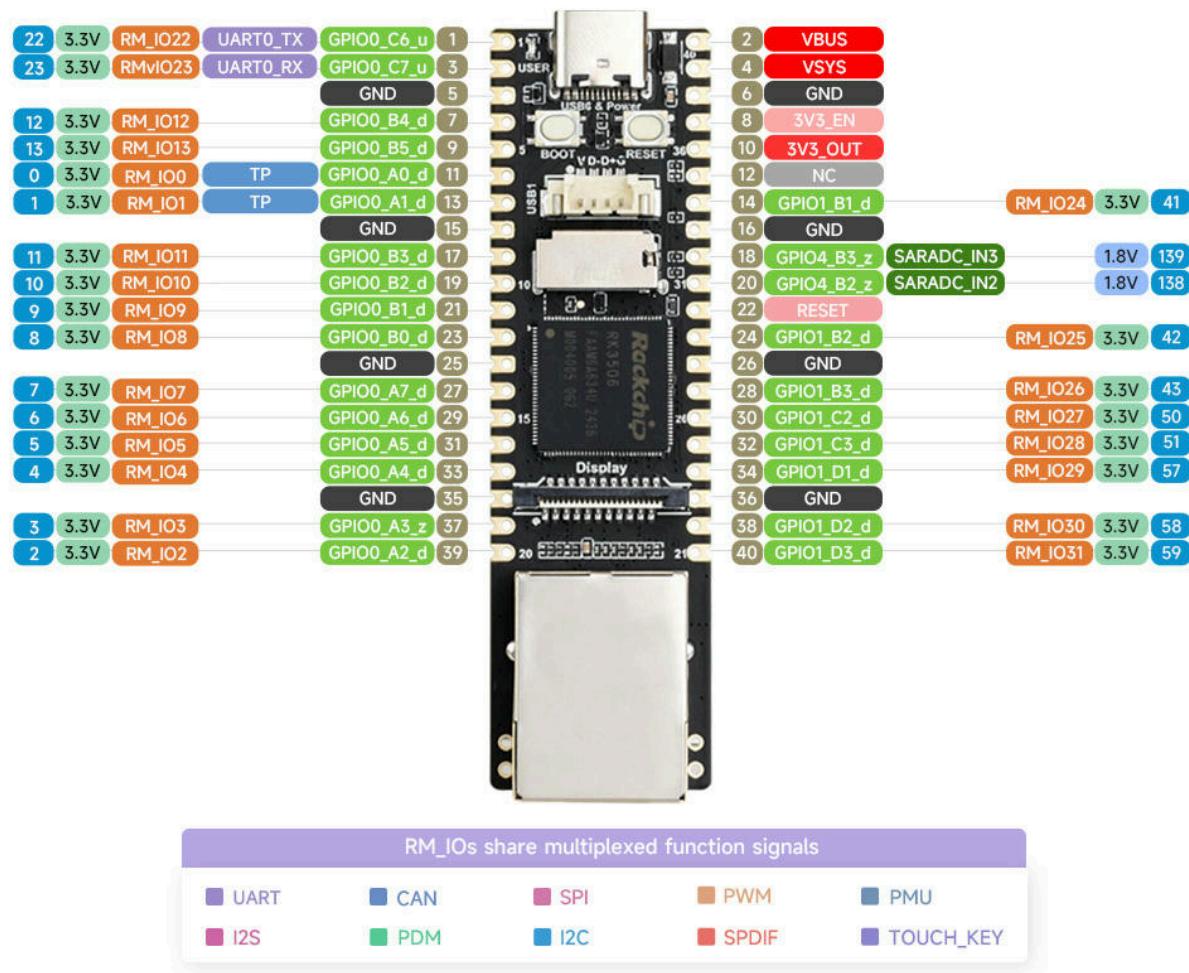


Рис. 17. Распиновка Luckfox Lyra Plus

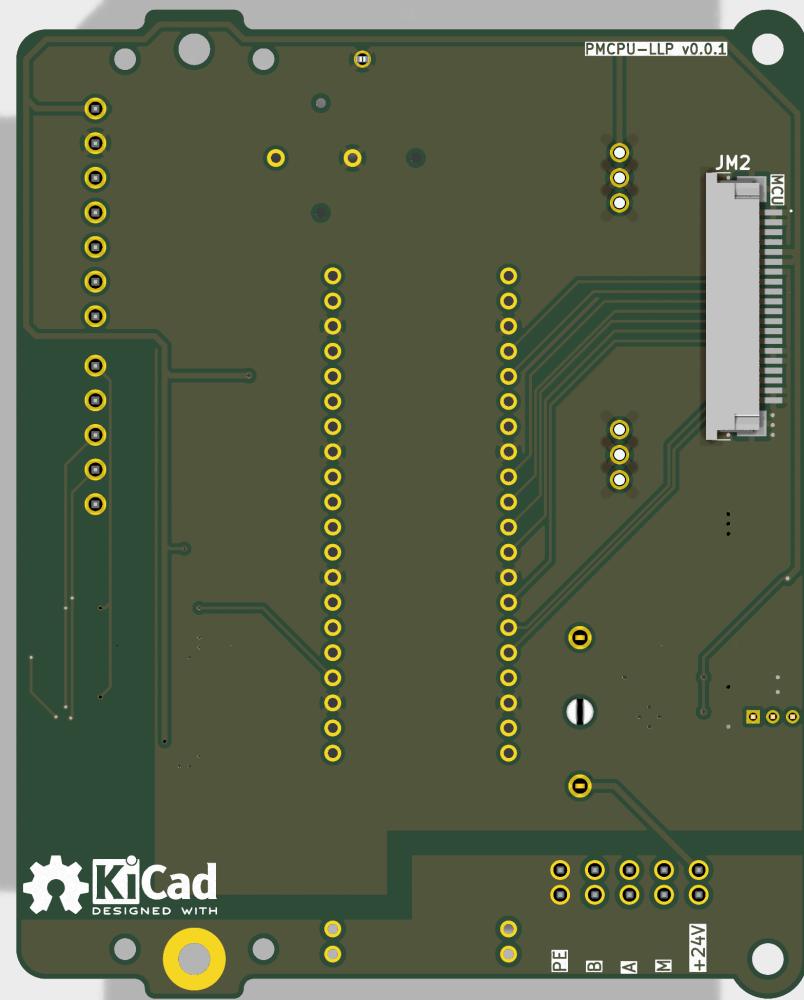
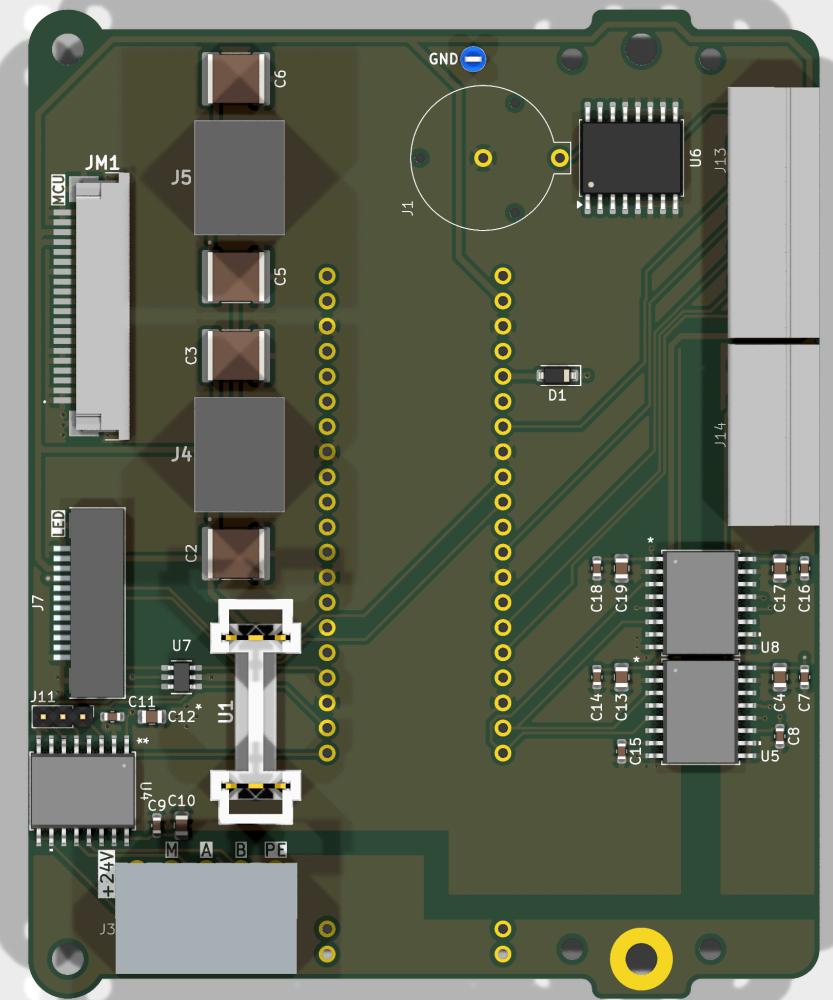


Рис. 18. Внешний вид платы PMCPU-LLP

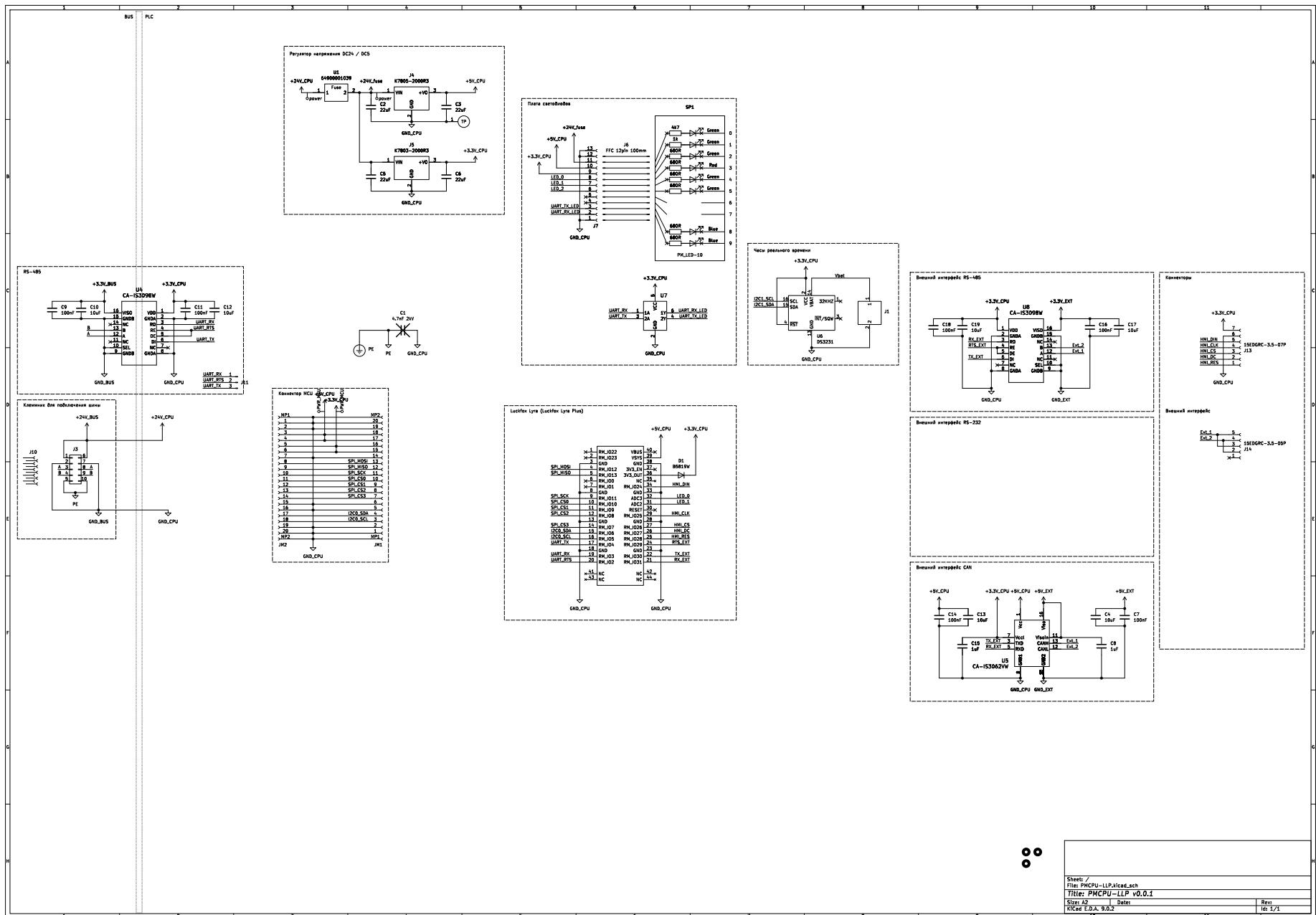


Рис. 19. Принципиальная электрическая схема платы PMCPU-LLP

Обозначение	Количе- ство	part_ipn
C1	1	C_4.7nF_2kV_1812_MLCC-X7R
C2, C3, C5, C6	4	C_22uF_50V_2220_MLCC-X7R
C4, C10, C12, C13, C17, C19	6	C_10uF_16V_0805_MLCC-X7R
C7, C9, C11, C14, C16, C18	6	C_100nF_16V_0603_MLCC-X7R
C8, C15	2	C_1uF_50V_0603_MLCC-X7R
D1	1	B5819W
D2, D3, D4, D6, D7	5	XL-1606SYGC
D5	1	XL-1606SURC
D8, D9	2	XL-1606UBC
J1	1	BS-12-A1AJ002-F
J3	1	15EDGRHC-THR-3.5-10P
J4	1	K7805-2000R3
J5	1	K7803-2000R3
J6	1	FFC_12P_P1.0_100mm_straight
J7	1	AFA07-S12FCC-00
J10	1	15EDGKNH-3.5-10P
J11	1	PinHeader_01x03_P2.00_THT_straight
J13	1	15EDGRC-3.5-07P
J14	1	15EDGRC-3.5-05P
JM1, JM2	2	AFA07-S20FCC-00
R1	1	R_1k_0603_1%
R2	1	R_4k7_0603_1%
R3, R4, R5, R6, R7, R8	6	R_680R_0603_1%
SP1	1	PM_LED-10-v0.0.1
U1	1	64900001039
U2	1	Keystone_5117
U3	1	
U4, U8	2	CA-IS3098W
U5	1	CA-IS3062VW
U6	1	DS3231SN
U7	1	SN74LVC2G14DBVR

Таблица 6. Перечень элементов платы PMCPU-LLP

8.3. PMCPU-LLU - контроллер на базе Luckfox Lyra Ultra

8.3.1. Настройка дерева устройств

Для работы периферии необходимо настроить дерево устройств.

Сигнал	Rockchip matrix	GPIO устройство; линия
SPI ₀ - /dev/spidev0.0		
MOSI	RM_IO8	/dev/gpiochip0; 8
MISO	RM_IO7	/dev/gpiochip0; 7
SCK	RM_IO6	/dev/gpiochip0; 6
CS0	RM_IO5	/dev/gpiochip0; 5
CS1	RM_IO4	/dev/gpiochip0; 4
CS2	RM_IO3	/dev/gpiochip0; 3
CS3	RM_IO2	/dev/gpiochip0; 2
I ² C ₀ - /dev/i2c-0		
SDA	RM_IO25	/dev/gpiochip1; 10
SCL	RM_IO24	/dev/gpiochip1; 9

Таблица 7. Назначение сигналов выводам процессора

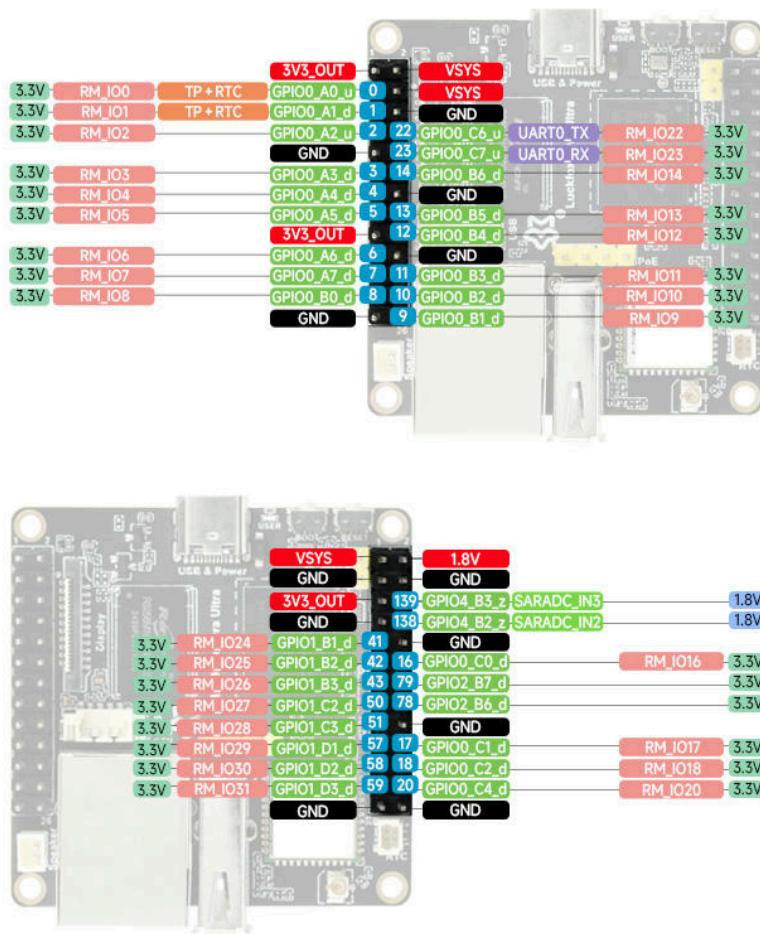
Путь к файлу с настройками: kernel/arch/arm/boot/dts/rk3506b-luckfox-lyra-ultra-w.dts

```
&spi0 {
    status = "okay";
    pinctrl-names = "default";
    pinctrl-0 = <&rm_io6_spi0_clk &rm_io8_spi0_mosi &rm_io7_spi0_miso>;
    spidev@0 {
        compatible = "rockchip,spidev";
        spi-max-frequency = <100000000>;
        reg = <0>;
    };
};

&i2c0 {
    status = "okay";
    pinctrl-names = "default";
    pinctrl-0 = <&rm_io24_i2c0_scl &rm_io25_i2c0_sda>;
};
```

В системе появятся адаптеры /dev/spidev0.0 и /dev/i2c-0.

TODO - uart для связи с модулями



Provides flexible pin multiplexing, allowing any pin to be configured for RM_IO functionality.

UART	CAN	SPI	PWM	PMU
I2S	PDM	I2C	SPDIF	TOUCH_KEY

Please refer to Rockchip RK3506B Datasheet for more details

Рис. 20. Распиновка Luckfox Lyra Ultra

Настройка экрана: <https://wiki.luckfox.com/Luckfox-Lyra/SDK#6-device-tree-configuration>

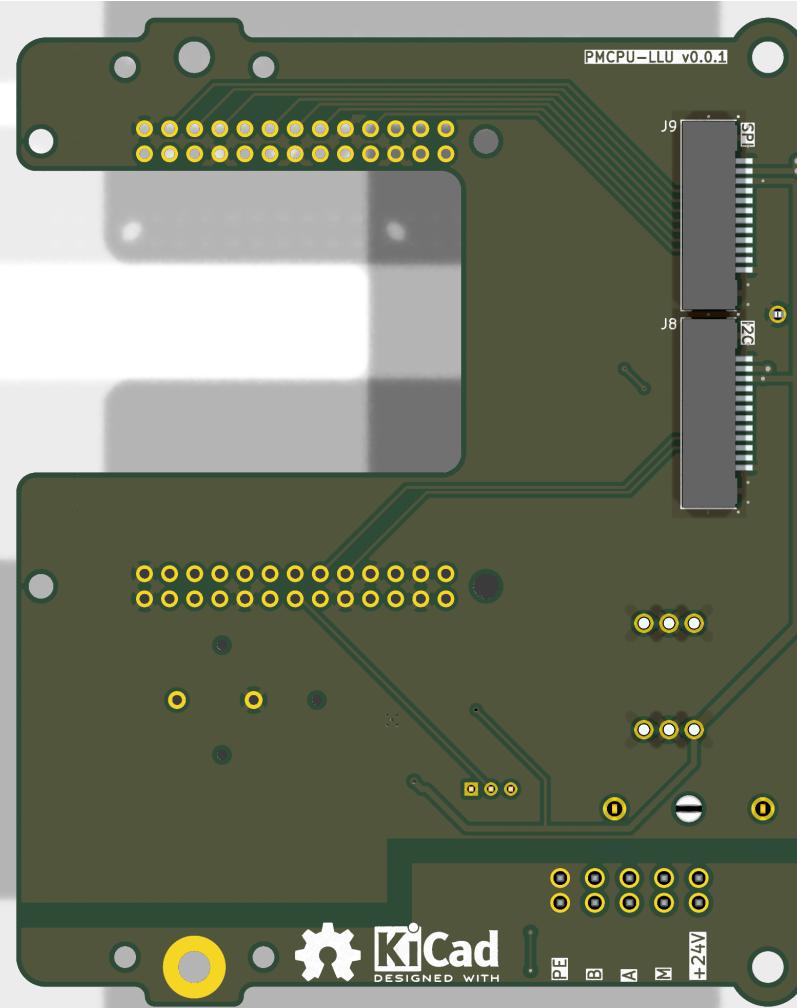
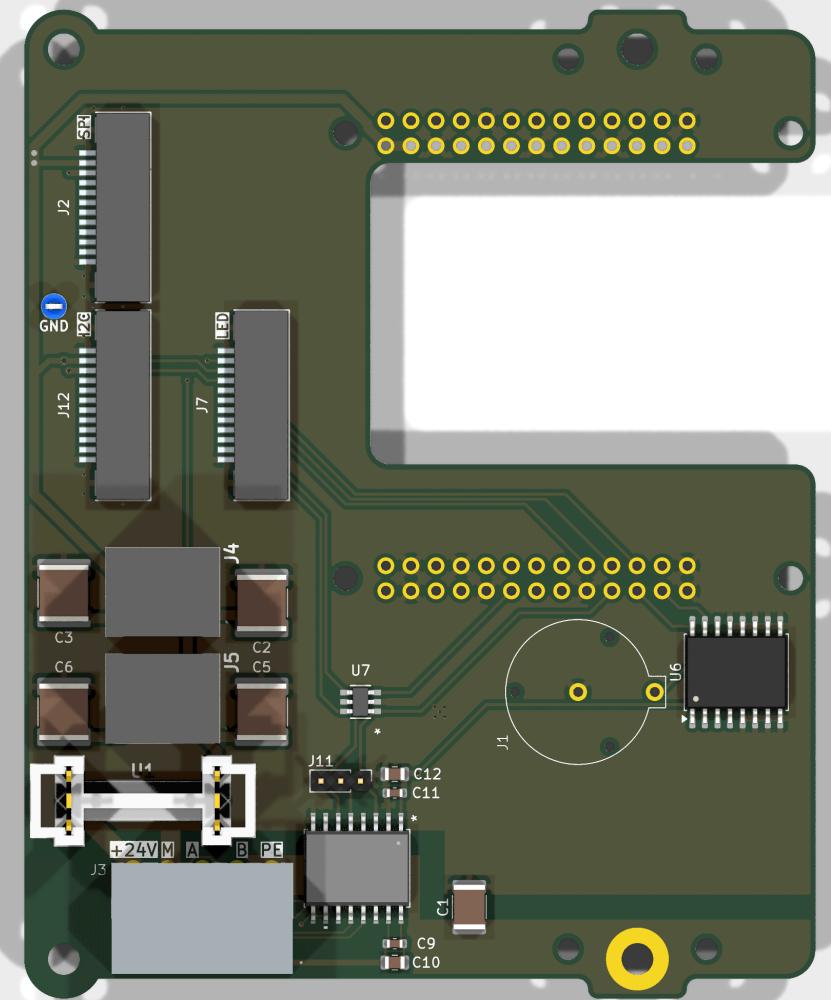


Рис. 21. Внешний вид платы PMCPU-llu

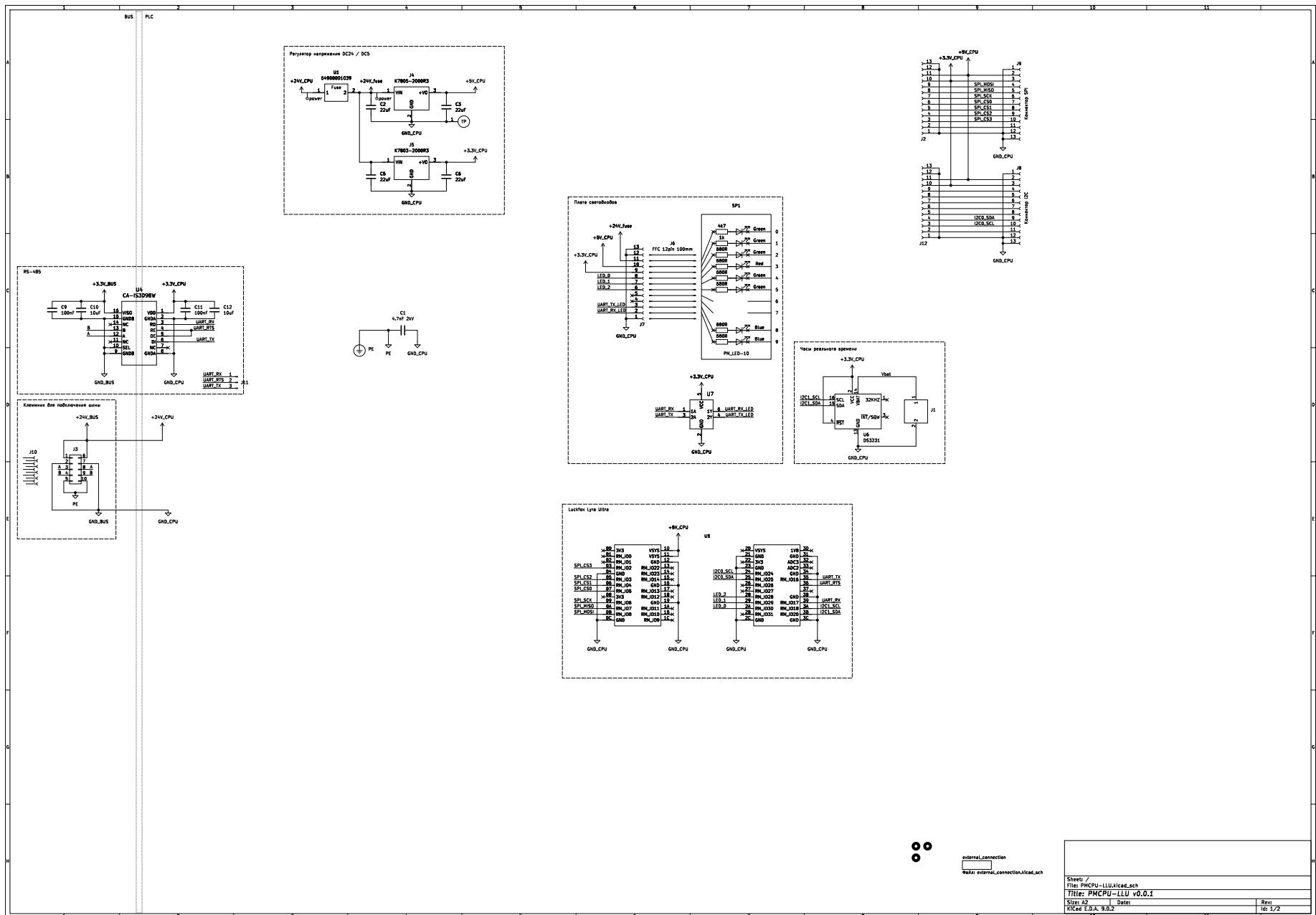


Рис. 22. Принципиальная электрическая схема платы PMCPU-LLU

Обозначение	Количе- ство	part_ipn
C1	1	C_4.7nF_2kV_1812_MLCC-X7R
C2, C3, C5, C6	4	C_22uF_50V_2220_MLCC-X7R
C9, C11	2	C_100nF_16V_0603_MLCC-X7R
C10, C12	2	C_10uF_16V_0805_MLCC-X7R
D2, D3, D4, D6, D7	5	XL-1606SYGC
D5	1	XL-1606SURC
D8, D9	2	XL-1606UBC
J1	1	BS-12-A1AJ002-F
J2, J7, J8, J9, J12	5	AFA07-S12FCC-00
J3	1	15EDGRHC-THR-3.5-10P
J4	1	K7805-2000R3
J5	1	K7803-2000R3
J6	1	FFC_12P_P1.0_100mm_straight
J10	1	15EDGKNH-3.5-10P
J11	1	PinHeader_01x03_P2.00_THT_straight
R1	1	R_1k_0603_1%
R2	1	R_4k7_0603_1%
R3, R4, R5, R6, R7, R8	6	R_680R_0603_1%
SP1	1	PM_LED-10-v0.0.1
U1	1	64900001039
U2	1	Keystone_5117
U4	1	CA-IS3098W
U5	1	
U6	1	DS3231SN
U7	1	SN74LVC2G14DBVR

Таблица 8. Перечень элементов платы PMCPU-LLU

8.4. PMMCU-ESP32C3 - микроконтроллер ESP32

Плата с микроконтроллером ESP32-C3 и регулятором напряжения.

Функциональная схема платы представлена на рисунке 23.

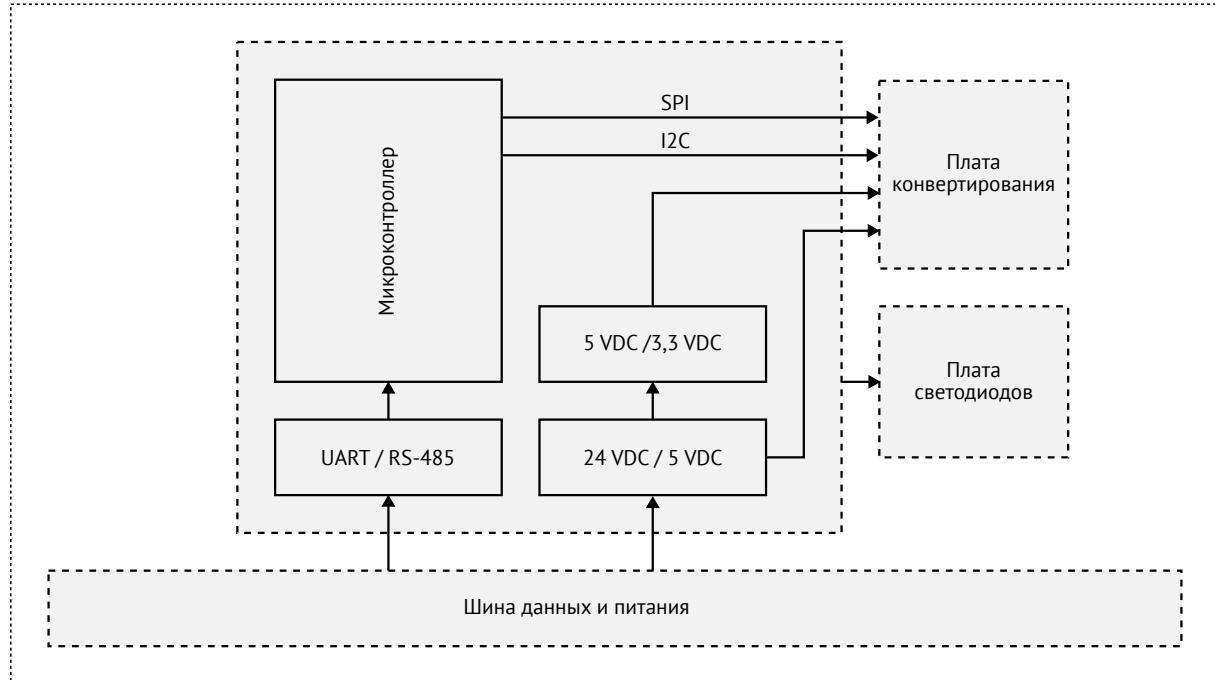


Рис. 23. Функциональная схема платы

Питание

По межмодульной шине поступает питание 24 В постоянного напряжения. Поэтому на плате устанавливается изолирующий DC / DC преобразователь 24 В / 5 В. В одно посадочное место можно установить один из трех преобразователей:

- B2405LS-1WR3 - мощность 1 Вт
- B2405S-2WR3 - мощность 2 Вт
- B2405S-3WR3 - мощность 3 Вт

Мощность преобразователя выбирается на основе количества и потребления плат конвертирования.

Для получения напряжения 3,3 В на плате установлен LDO регулятор с максимальным током 1 А.

Микроконтроллер

Используется модуль на базе микроконтроллера ESP32-C3 [8]. В посадочное место можно установить 2 вида модулей:

- ESP32-C3-WROOM-02 - со встроенной антенной.
- ESP32-C3-WROOM-02U - без встроенной антенны. Есть выход IPEX для подключения внешней антенны.

В остальном модули ESP идентичны. Предпочтительным является использование модуля без антенны. Все соединения между модулями выполняются по проводной связи. Если всё-таки беспроводное подключение необходимо, то нужно использовать внеш-

нюю антенну. Платы могут располагаться в металлическом корпусе, который будет экранировать беспроводную связь.

Плата микроконтроллера подключается к плате конвертирования через 2 12-пиновых разъема FFC. На разъемы выведены протоколы SPI (раздел 6.1) и I²C (раздел 6.2).

Также на оба коннектора выводится питание +5 В и +3,3 В.

Подключение к основной плате модуля и плате светодиодов выполняется через 12-пиновые кабели FFC.

Загрузка прошивки

Микроконтроллер программируется с помощью обычного кабеля Micro-USB. Поскольку выходы микроконтроллера GPIO18 и GPIO19, используемые для USB-подключения, можно переиспользовать, микроконтроллер может автоматически не перейти в режим загрузки новой прошивки. Поэтому на плату добавлены кнопки BOOT и EN, для перевода микроконтроллера в режим загрузки. Алгоритм для загрузки следующий:

- зажать кнопку BOOT
- не отпуская BOOT, нажать кнопку EN
- через 1 с отпустить EN, не отпуская BOOT
- отпустить кнопку BOOT

После этого микроконтроллер переходит в режим загрузки.

Подключение к шине RS-485

Микроконтроллер подключается к шине RS-485 через приемопередатчик UART - RS-485 с гальванической изоляцией. Подробнее о преобразователе описано в разделе 7.4.

Поскольку у каждого модуля на шине данных должен быть уникальный адрес, на плате есть трехпозиционный DIP-переключатель для задания адреса конкретного модуля. Таким образом, можно использовать до $2^3 = 8$ модулей одного типа.

Подключение к шине данных и питания выполняется через 10-пиновый коннектор (2 ряда по 5 пинов).

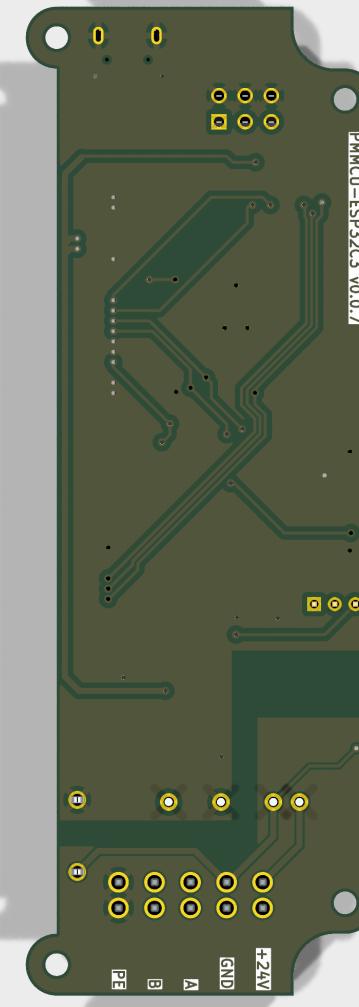
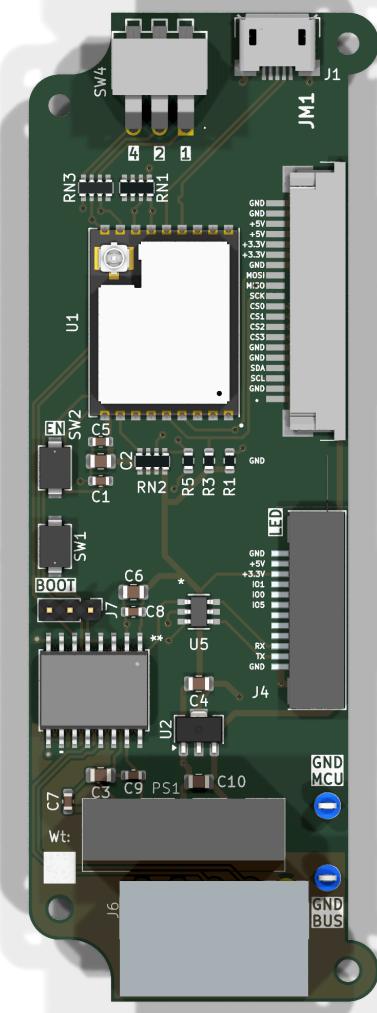


Рис. 24. Внешний вид платы PMMCU-ESP32C3

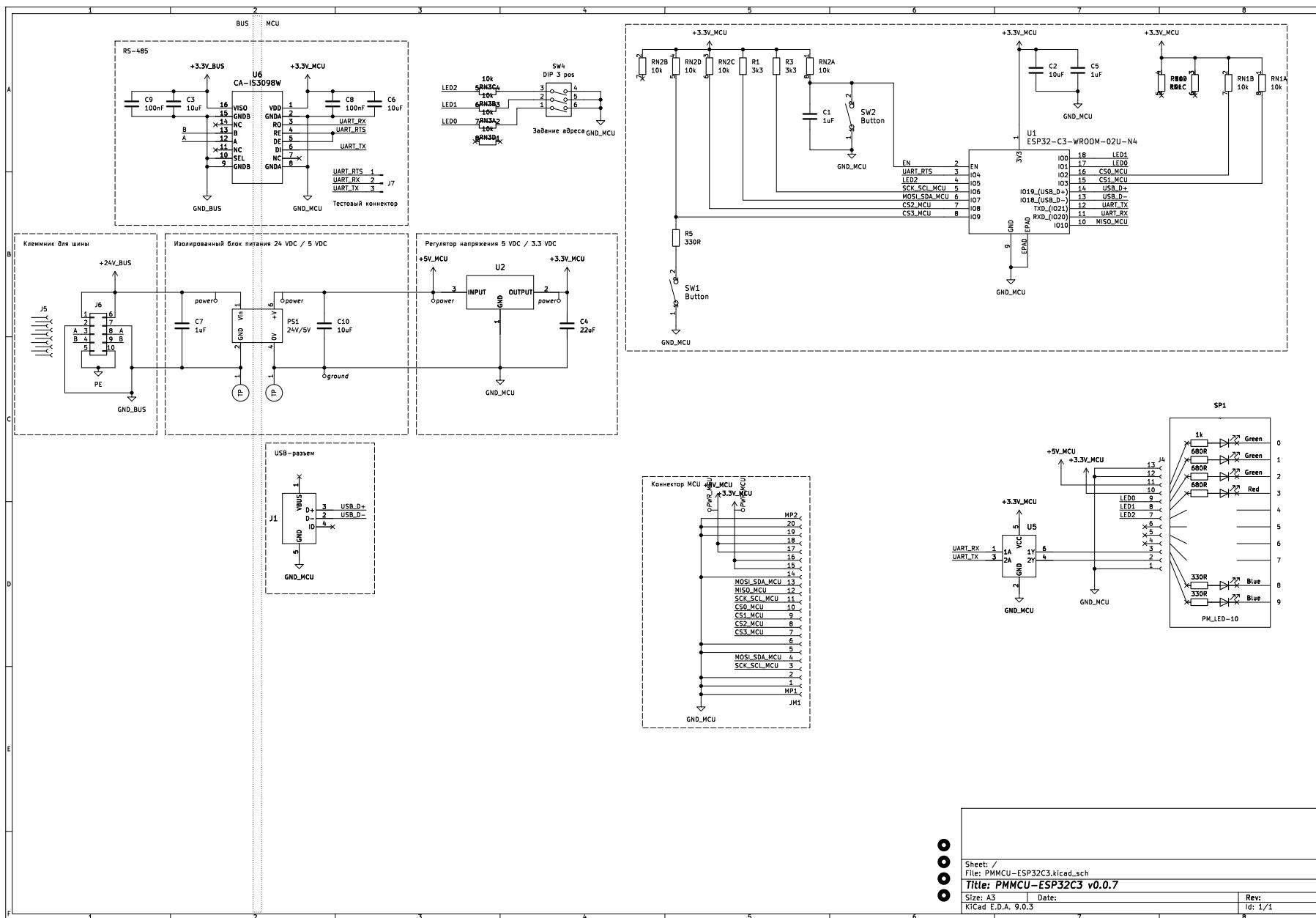


Рис. 25. Принципиальная электрическая схема платы PMMCU-ESP32C3

Обозначение	Количе- ство	part_ipn
C1, C5	2	C_1uF_16V_0603_MLCC-X7R
C2, C3, C6, C10	4	C_10uF_16V_0805_MLCC-X7R
C4	1	C_22uF_16V_0805_MLCC-X5R
C7	1	C_1uF_50V_0603_MLCC-X7R
C8, C9	2	C_100nF_16V_0603_MLCC-X7R
D1, D3, D5	3	XL-1606SYGC
D2, D4	2	XL-1606UBC
D6	1	XL-1606SURC
J1	1	U254-051T-4BH83-S1S
J4	1	AFA07-S12FCC-00
J5	1	15EDGKNH-3.5-10P
J6	1	15EDGRHC-THR-3.5-10P
J7	1	PinHeader_01x03_P2.00_THT_straight
JM1	1	AFA07-S20FCC-00
PS1	1	B2405LS-1WR3
R1, R3	2	R_3k3_0603_1%
R2	1	R_1k_0603_1%
R4, R8, R9	3	R_680R_0603_1%
R5, R6, R7	3	R_330R_0603_1%
RN1, RN2, RN3	3	R_10k_0603x4_1%
SP1	1	PM_LED-10-v0.0.1
SW1, SW2	2	TS-1088-AR02016
SW4	1	DA-03BLP
U1	1	ESP32-C3-WROOM-02U-N4
U2	1	CJA1117B-3.3
U3, U4	2	Keystone_5117
U5	1	SN74LVC2G14DBVR
U6	1	CA-IS3098W

Таблица 9. Перечень элементов платы PMMCU-ESP32C3

8.5. PM_LED-10 - 10 светодиодов

Плата для индикации состояния с помощью 10 светодиодов. Используются светодиоды бокового свечения с типоразмером посадочного места 0602 (раздел 7.11).

Цвет светодиодов и номинал токоограничивающих резисторов для разных плат различается; иногда не все посадочные места используются. Поэтому эти параметры указываются на схемах конкретных плат.

Сигналы управления светодиодами подключаются через 12-пиновый шлейф FFC. На плате 4 параллельных разъема J1..J4, устанавливать необходимо только один из 4. Какой именно - зависит от платы, к которой подключается данная плата.

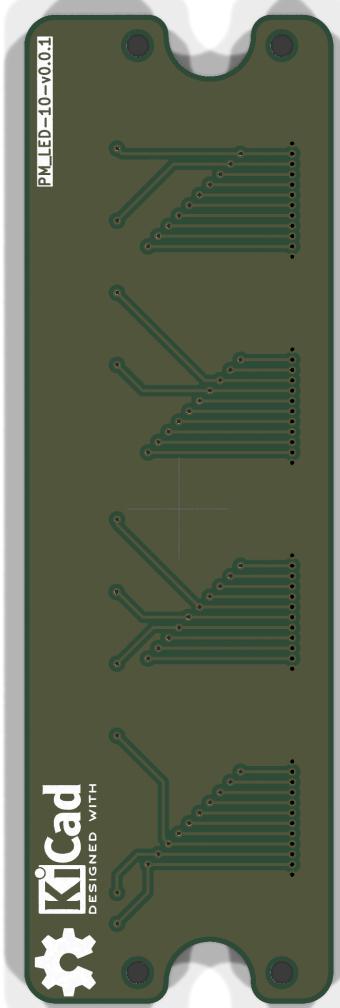
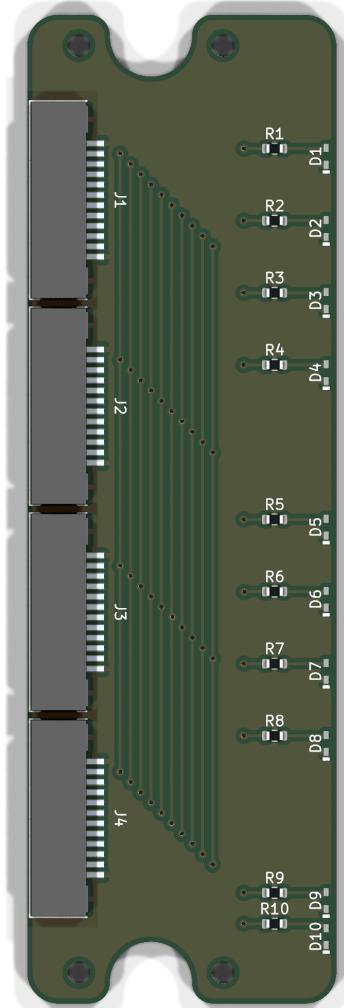


Рис. 26. Внешний вид платы PM_LED-10

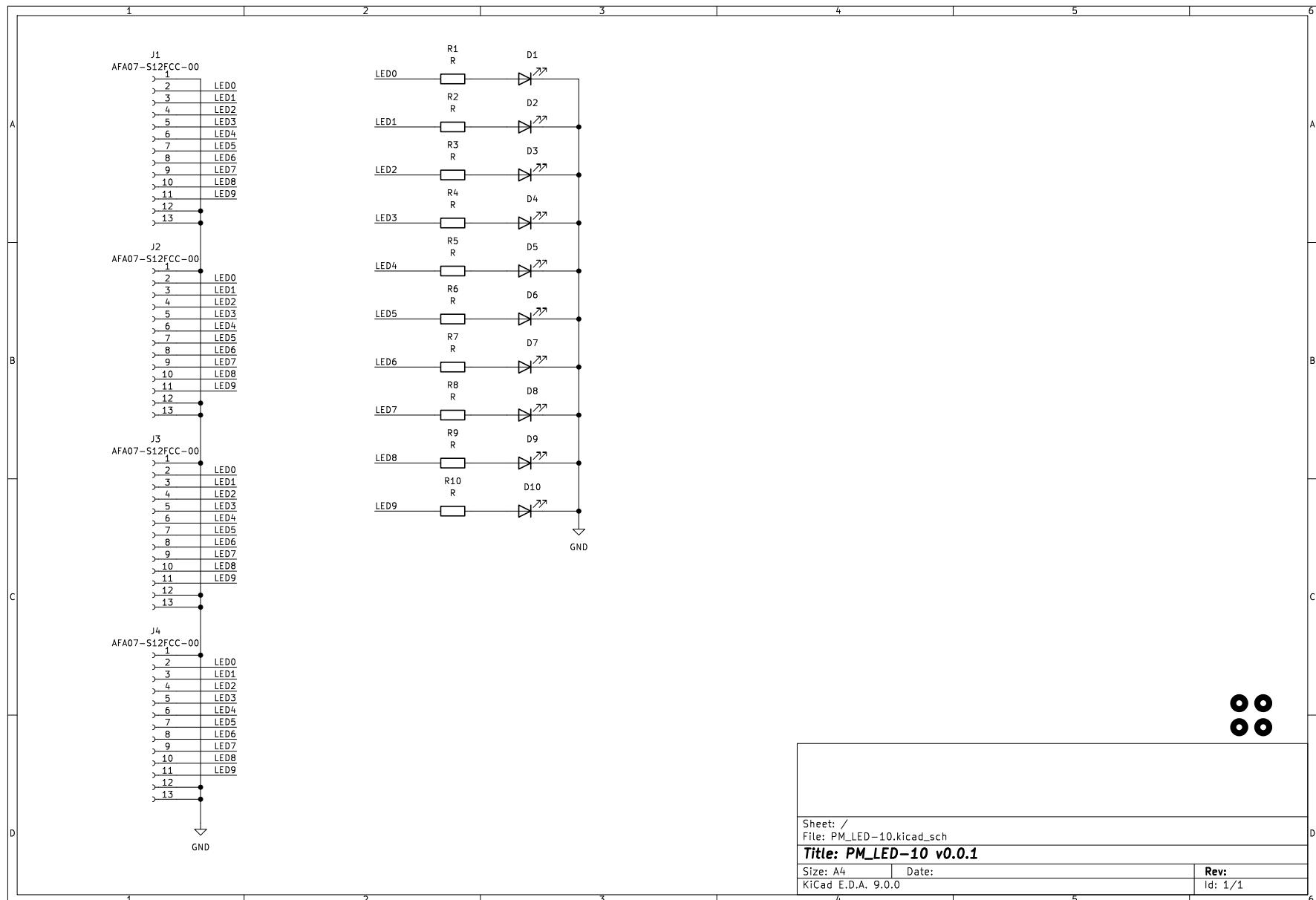


Рис. 27. Принципиальная электрическая схема платы PM_LED-10

Обозначение	Количе- ство	part_ipn
J1	1	AFA07-S12FCC-00

Таблица 10. Перечень элементов платы PM_LED-10

8.6. PM_LED-18 - 18 светодиодов

Плата для индикации состояния с помощью 18 светодиодов. Используются светодиоды бокового свечения с типоразмером посадочного места 0602 (раздел 7.11).

Цвет светодиодов и номинал токоограничивающих резисторов для разных плат различается; иногда не все посадочные места используются. Поэтому эти параметры указываются на схемах конкретных плат.

Сигналы управления светодиодами подключаются через два 12-пиновых шлейфа FFC. Каждый шлейф можно подключить в один из двух разъемов:

- верхние 8 светодиодов - через разъем J1 или J2
- нижние 10 светодиодов - через разъем J3 или J4

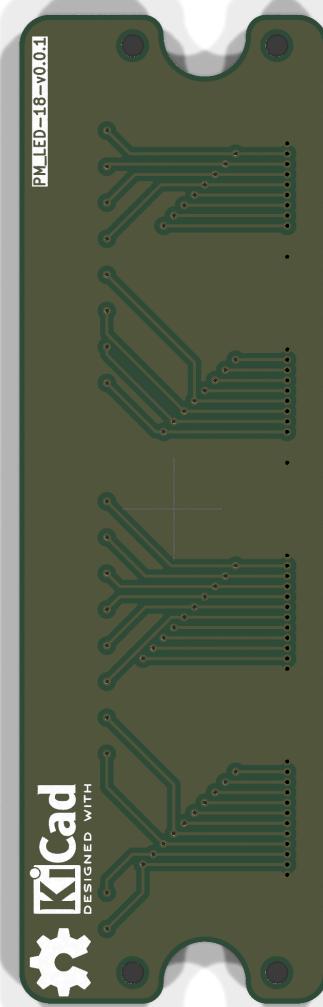
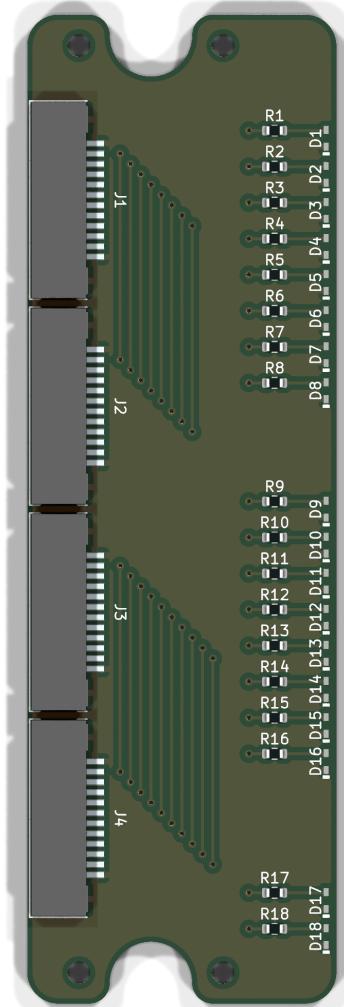


Рис. 28. Внешний вид платы PM_LED-18



Рис. 29. Принципиальная электрическая схема платы PM_LED-18

Обозначение	Количе- ство	part_ipn
J1, J3	2	AFA07-S12FCC-00

Таблица 11. Перечень элементов платы PM_LED-18

8.7. PMCNV-DI16sink - 16 дискретных входов (PNP)

Плата для подключения 16 дискретных входов. В схеме приведены компоненты для 24 В постоянного входного напряжения, но при изменении номиналов резисторов можно подключать датчики в диапазоне 5 .. 60 В.

Функциональная схема платы представлена на рисунке 30.

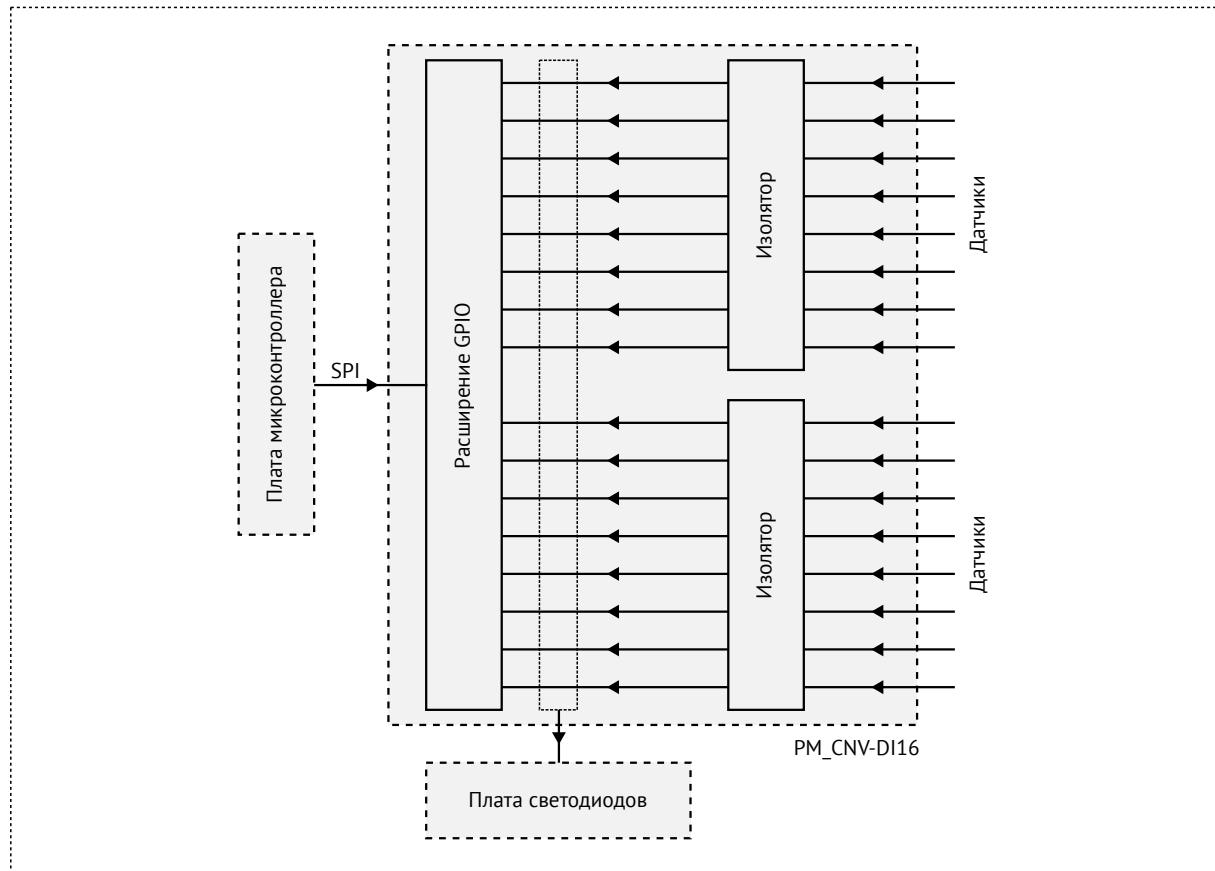


Рис. 30. Функциональная схема платы

Преобразование высокого входного напряжения в уровень напряжения микроконтроллера +3,3 В осуществляется с помощью чипа CA-IS3980S (раздел 7.7). Кроме понижения входного напряжения, чип также обеспечивает гальваническую изоляцию.

Схема подключения отдельного канала показана на рисунке 31.

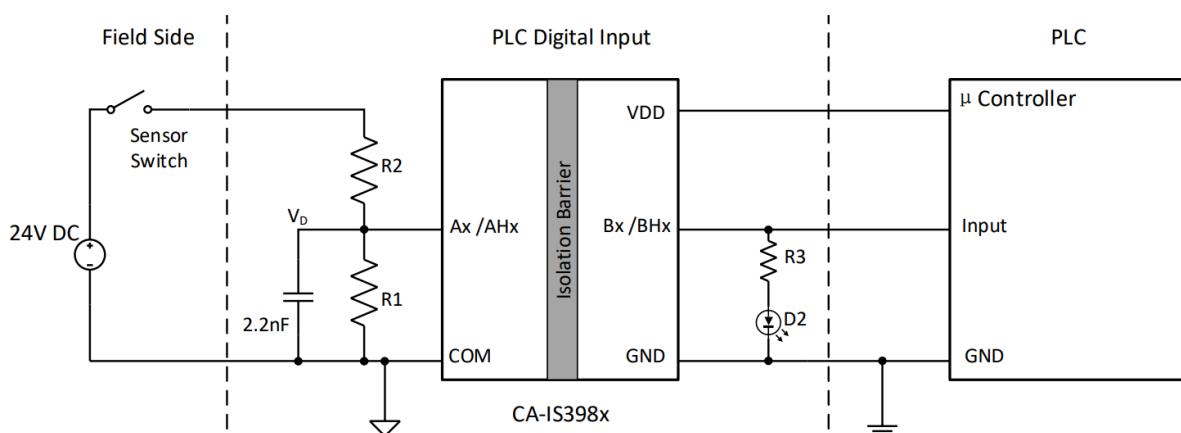


Рис. 31. Схема подключения отдельного канала

Номиналы выбираются исходя из напряжения и обеспечения требуемой характеристики. Рекомендуемые значения сопротивлений для напряжения 24 В приведены в таблице 12. Для подключения датчиков на другие уровни напряжения значения резисторов нужно корректировать.

Тип согласно IEC 61131-2	R_1	R_2
Тип 1	2,4 кОм	6,2 кОм
Тип 2	390 Ом	1,5 кОм
Тип 3	750 Ом	2,7 кОм

Таблица 12. Рекомендуемые значения сопротивлений для входного напряжения 24 В

После преобразования в напряжение 3,3 В цифровые сигналы поступают на вход расширителя входов MCP23S17 (раздел 7.9). Расширитель входов сохраняет состояние входов в двух 8-битных регистрах. Микроконтроллер с платы [PMMCU-ESP32C3](#) периодически опрашивает состояние регистров по шине SPI. Плата микроконтроллера подключается через разъем FFC.

С обратной стороны платы есть 4 перемычки - CS0, CS1, CS2, CS3. При сборке модуля необходимо замкнуть одну из 4. Также с обратной стороны платы есть коннектор FFC, который позволяет передавать шину данных на следующие платы. На каждой плате должны быть замкнуты разные перемычки CS. Таким образом, можно собрать модуль на 64 дискретных входа.

На плате есть два разъема FFC, через которые подключается плата светодиодов [PM-LED_18](#).

8.7.1. Выбор номиналов резисторов

8.7.1.1. Вывод формулы

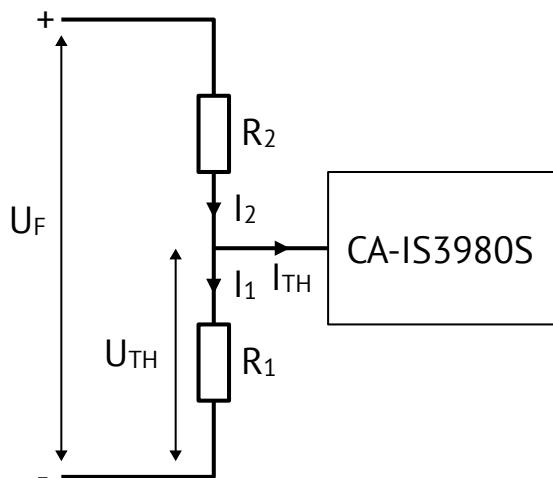


Рис. 32. Расчёт токов и напряжений

На рисунке 32 изображена схема для расчёта токов и напряжений, где:

- U_{TH} , I_{TH} - значения напряжения и тока, при которых цифровой изолятор переходит из состояния «0» в состояние «1». Сокращение от «threshold».

- U_F - желаемое входное напряжение для перехода из «0» в «1». Сокращение от «field».
- R_1, R_2 - сопротивления, которые необходимо подобрать.

По электрической схеме запишем уравнения 3.

$$\begin{cases} I_2 = I_1 + I_{TH} \\ U_F = I_2 \cdot R_2 + I_1 \cdot R_1 \\ U_{TH} = I_1 \cdot R_1 \end{cases} \quad (3)$$

$$U_F = (I_1 + I_{TH}) \cdot R_2 + I_1 \cdot R_1 \quad (4)$$

$$U_F = I_1 \cdot (R_1 + R_2) + I_{TH} \cdot R_2 \quad (5)$$

$$U_F = \frac{U_{TH}}{R_1} \cdot (R_1 + R_2) + I_{TH} \cdot R_2 \quad (6)$$

$$U_F = U_{TH} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) + I_{TH} \cdot R_2 \quad (7)$$

8.7.1.2. Проверочный расчет.

Возьмём рекомендуемые значения для 24 В, тип 3. $U_F = 7.9$ В, $U_{TH} = 1.38$ В, $I_{TH} = 0.6 \cdot 10^{-3}$ А, $R_1 = 750$ Ом, $R_2 = 2700$ Ом

$$7.9 = 1.38 \cdot \left(1 + \frac{2700}{750}\right) + 0.6 \cdot 10^{-3} \cdot 2700 \quad (8)$$

$$7.9 = 7.968 \quad (9)$$

Значения почти в уравнении 9 почти равны. Рассчитаем значения токов.

$$I_1 = \frac{1.38}{750} = 1.84 \cdot 10^{-3} \text{ А} \quad (10)$$

$$I_2 = 1.84 \cdot 10^{-3} + 0.6 \cdot 10^{-3} = 2.44 \cdot 10^{-3} \text{ А} \quad (11)$$

8.7.1.3. Принцип подбора номиналов резисторов

1. Принимаем $I_{TH} = 0.606 \cdot 10^{-3}$ А, из даташита.
2. Задаём желаемое значение входного напряжения U_F , при котором происходит переход из «0» в «1».
3. Подбираем такие R_1 и R_2 , чтобы U_{TH} было близко к 1.38 В.

Формула расчета U_{TH} :

$$U_{TH} = \frac{U_F - I_{TH} \cdot R_2}{1 + \frac{R_2}{R_1}} \quad (12)$$

8.7.1.4. Выбранные номиналы резисторов для разных уровней напряжения

Напряжение, [В]	Порог, [В]	R_1 , [Ом]	R_2 , [Ом]
5	2,5	430	300
9	4,5	300	560
12	6	510	1300
24	8	750	2700

Таблица 13. Номиналы резисторов для разных уровней напряжения

8.7.2. Расчёт потребления

Элемент	Кол-во	Потребление, мВт		Итого, мВт	
		3,3 В	5 В	3,3 В	5 В
CA-IS3980P	2	25,41	0	50,8	0
MCP23S17-E/SO	1	3,3	0	3,3	0
Светодиоды	18	9,9	0	178,2	0
Итого, мВт:				232,3	0
Итого, мА				70,4	0

Таблица 14. Расчёт потребления

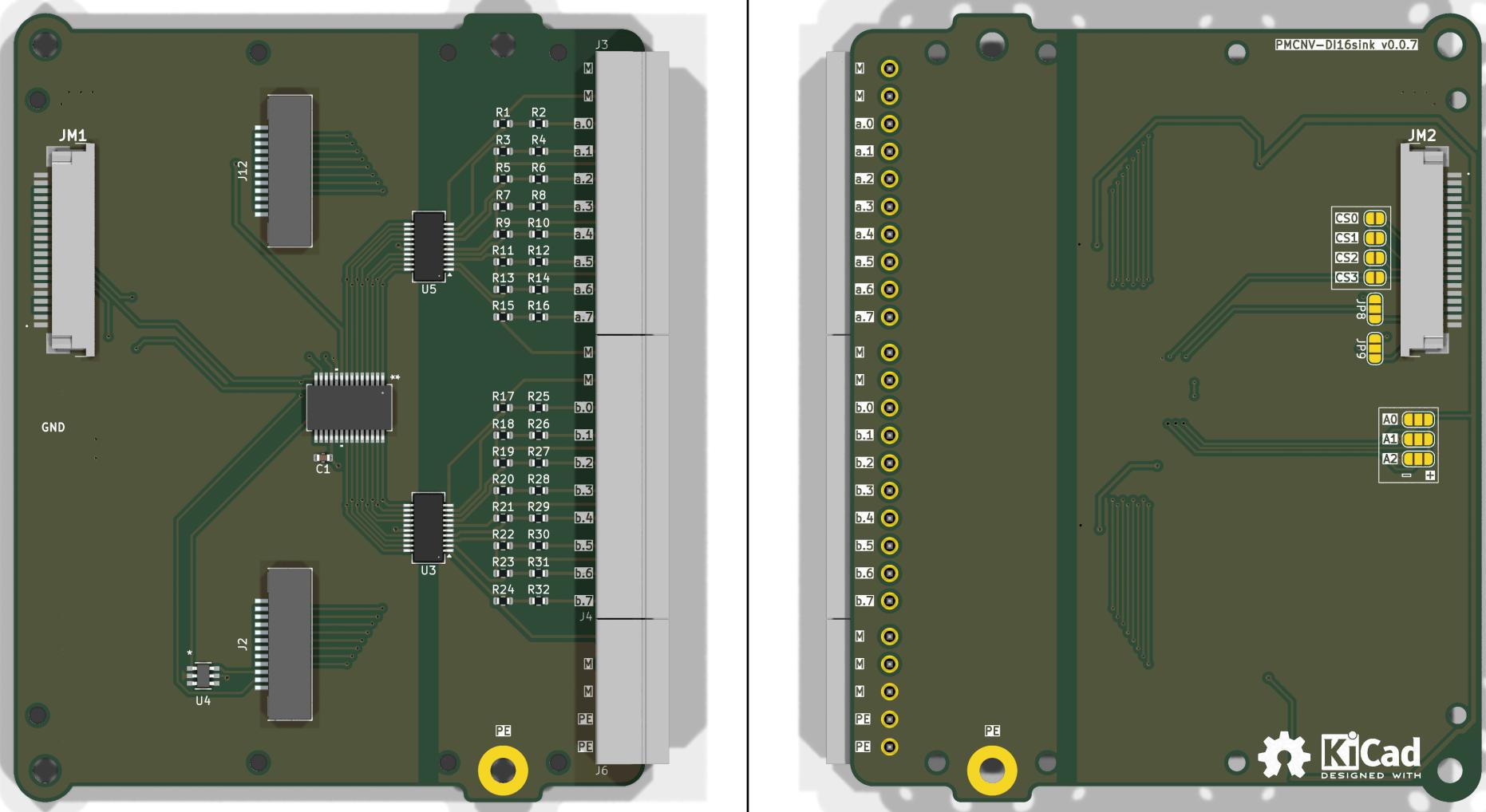


Рис. 33. Внешний вид платы PMC NV-DI16sink

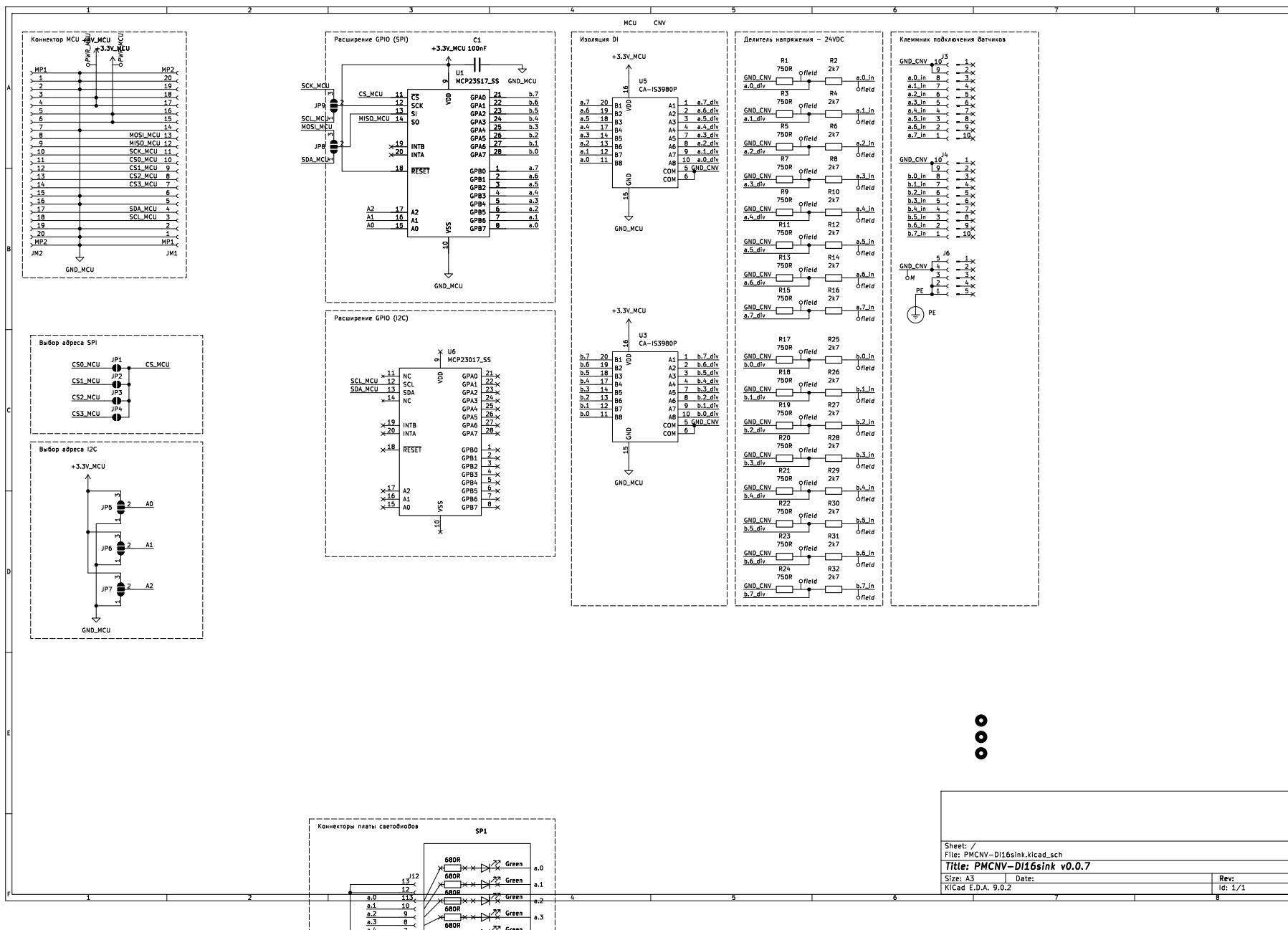


Рис. 34. Принципиальная электрическая схема платы PMCNV-DI16sink

Обозначение	Количе- ство	part_ipn
C1	1	C_100nF_16V_0603_MLCC-X7R
D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8, D9, D10, D11, D12, D13, D14, D15, D16	16	XL-1606SYGC
D17, D18	2	XL-1606UBC
J2, J12	2	AFA07-S12FCC-00
J3, J4	2	15EDGRC-3.5-10P
J6	1	15EDGRC-3.5-05P
J8, J9	2	15EDGK-3.5-10P
J10	1	15EDGK-3.5-05P
JM1, JM2	2	AFA07-S20FCC-00
R1, R3, R5, R7, R9, R11, R13, R15, R17, R18, R19, R20, R21, R22, R23, R24	16	R_750R_0603_1%
R2, R4, R6, R8, R10, R12, R14, R16, R25, R26, R27, R28, R29, R30, R31, R32	16	R_2k7_0603_1%
R34, R35, R36, R37, R38, R39, R40, R41, R42, R43, R44, R45, R46, R47, R48, R49, R50, R51	18	R_680R_0603_1%
SP1	1	PM_LED-18-v0.0.1
U1	1	MCP23S17-E/SS
U3, U5	2	CA-IS3980P
U4	1	SN74LVC2G14DBVR
U6	1	MCP23017-E/SO

Таблица 15. Перечень элементов платы PMCNV-DI16sink

8.8. PMCNV-DI16src - 16 дискретных входов (NPN)

8.9. PMCNV-DQ16src - 16 дискретных выходов

Модуль для управления 16 дискретными выходами. Питание выходов внешнее, до 50 В постоянного напряжения.

Функциональная схема платы представлена на рисунке 35.

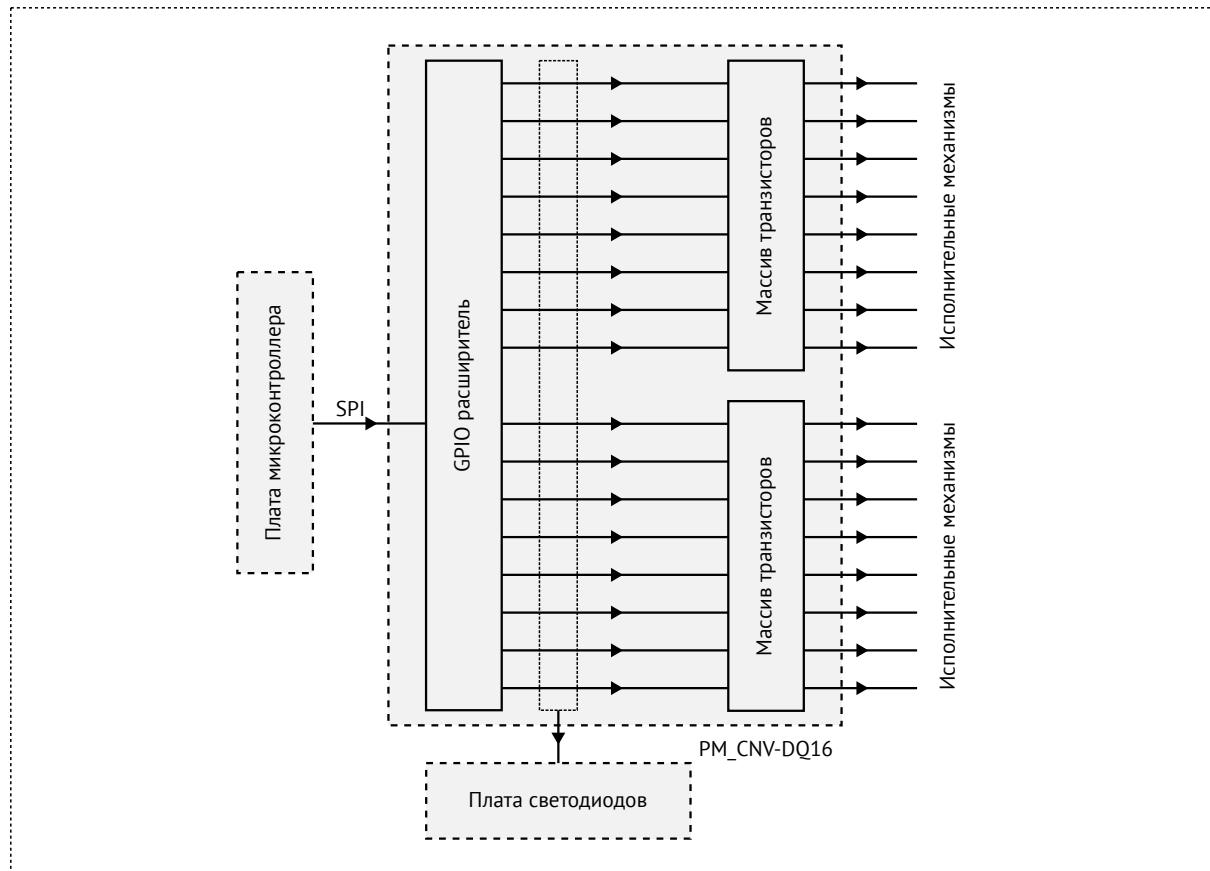


Рис. 35. Функциональная схема платы

Управляющие сигналы с платы микроконтроллера PMMCU-ESP32C3 поступают по протоколу SPI на GPIO расширитель MCP23S17 (раздел 7.9). Выходы с расширителя поступают на затворы двух транзисторных сборок (раздел 7.10). Транзисторы коммутируют напряжение, которое подается на клеммы модуля; получается две группы по 8 дискретных выходов. Максимальное напряжение - 50 В постоянного напряжения.

Параллельно все 16 сигналов идут на плату светодиодов PM-LED_18, для индикации состояния выходов.

8.9.1. Подключение по I²C

Проверка работы из консоли. Устройство с адресом 0x20.

```
# Проверить доступность
i2cdetect -y 0

# GPIOA устанавливаем в режим выхода
i2ctransfer -y 0 w2@0x20 0x00 0x00

# GPIOB устанавливаем в режим выхода
i2ctransfer -y 0 w2@0x20 0x01 0x00
```

```

# Включаем все выходы GPIOA
i2ctransfer -y 0 w2@0x20 0x12 0xFF

# Отключаем все выходы GPIOA
i2ctransfer -y 0 w2@0x20 0x12 0x00

# Включаем все выходы GPIOB
i2ctransfer -y 0 w2@0x20 0x13 0xFF

# Отключаем все выходы GPIOB
i2ctransfer -y 0 w2@0x20 0x13 0x00

```

Листинг 1. Проверка работы из консоли

8.9.2. Расчёт потребления

Элемент	Кол-во	Потребление, мВт		Итого, мВт	
		3,3 В	5 В	3,3 В	5 В
B0505LS-1W	1	0	400	0	400
CA-IS3741HW	1	22,77	70	22,8	70
MCP23S17-E/SO	1	0	5	0	5
TBD62783AFG	2	0	60	0	120
Светодиоды	18	0	22	0	396
Итого, мВт:				22,8	991
Итого, мА				6,9	198,2

Таблица 16. Расчёт потребления

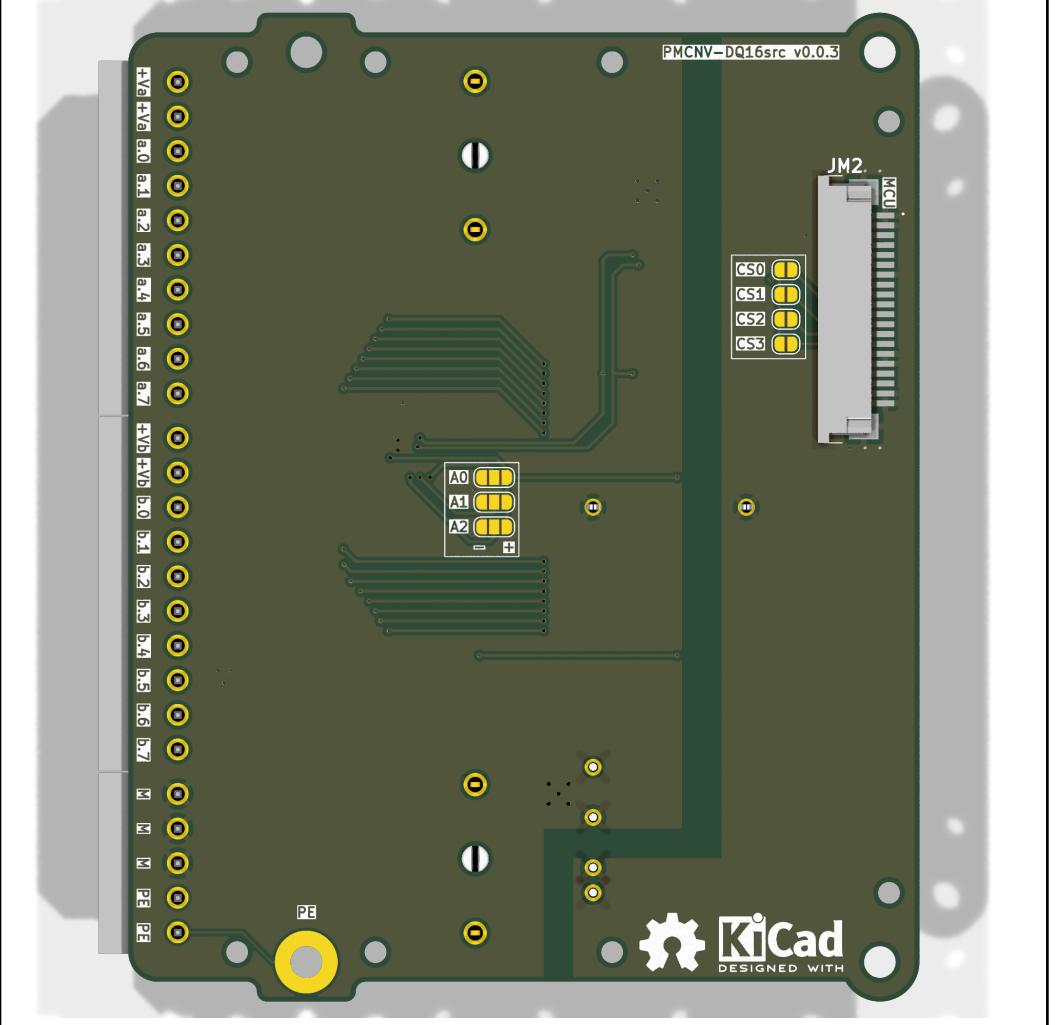
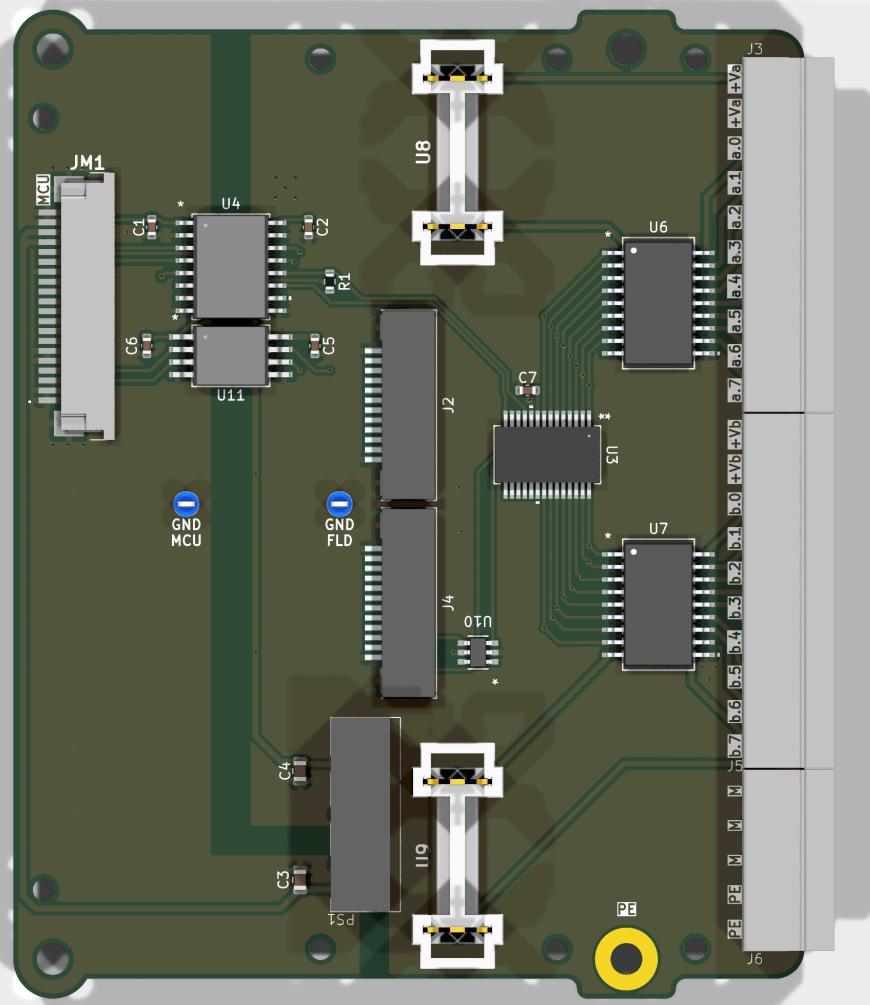


Рис. 36. Внешний вид платы PMCNV-DQ16src

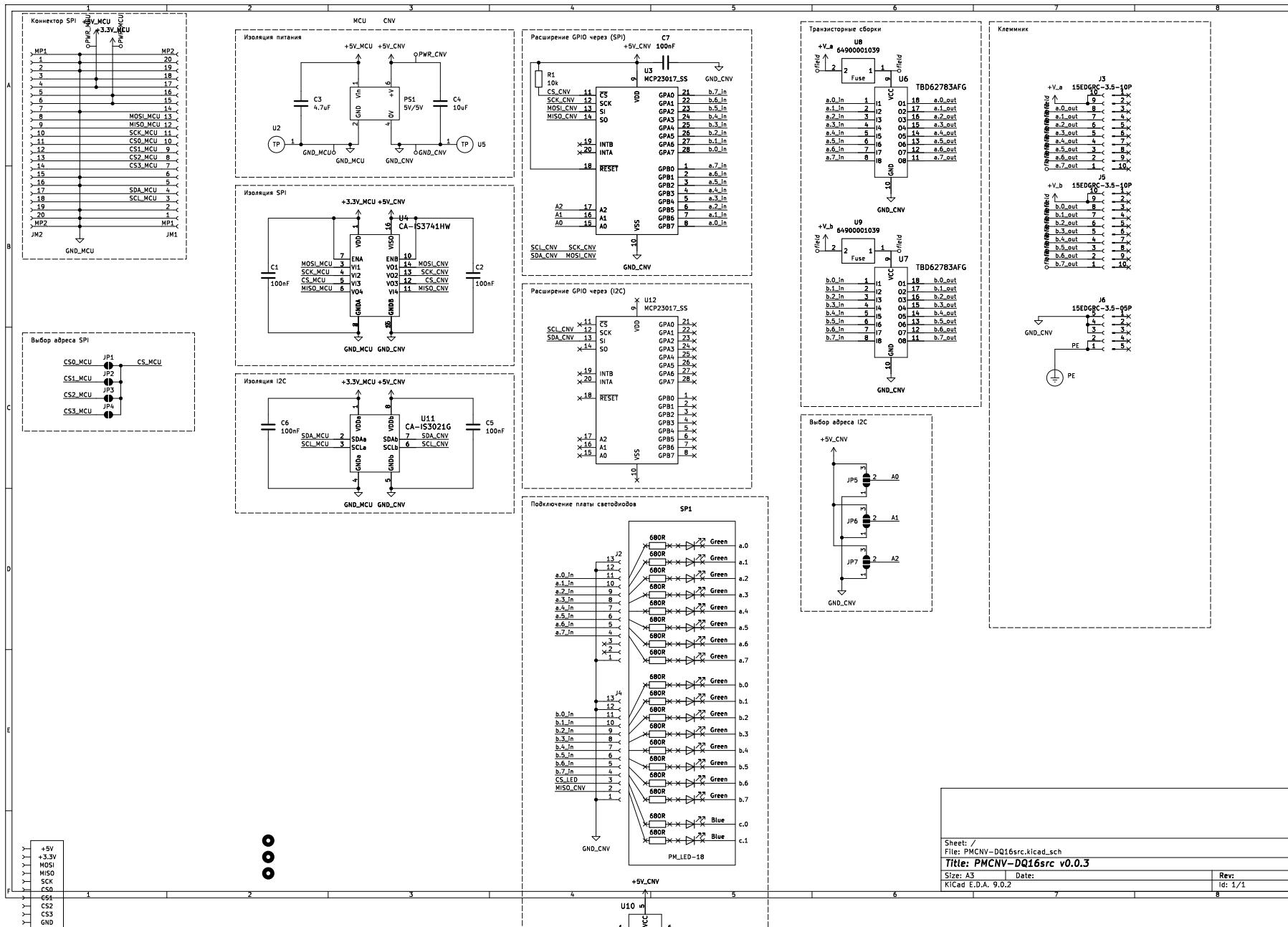


Рис. 37. Принципиальная электрическая схема платы PMCNV-DQ16src

Обозначение	Количе- ство	part_ipn
C1, C2, C5, C6, C7	5	C_100nF_16V_0603_MLCC-X7R
C3	1	C_4.7uF_16V_0805_MLCC-X7R
C4	1	C_10uF_16V_0805_MLCC-X7R
D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8, D9, D10, D11, D12, D13, D14, D15, D16	16	XL-1606SYGC
D17, D18	2	XL-1606UBC
J2, J4	2	AFA07-S12FCC-00
J3, J5	2	15EDGRC-3.5-10P
J6	1	15EDGRC-3.5-05P
J8, J9	2	15EDGK-3.5-10P
J10	1	15EDGK-3.5-05P
JM1, JM2	2	AFA07-S20FCC-00
PS1	1	B0505LS-1W
R1	1	R_10k_0603_1%
R2, R3, R4, R5, R6, R7, R8, R9, R10, R11, R12, R13, R14, R15, R16, R17, R18, R19	18	R_680R_0603_1%
SP1	1	PM_LED-18-v0.0.1
U2, U5	2	Keystone_5117
U3, U12	2	MCP23S17-E/SS
U4	1	CA-IS3741HW
U6, U7	2	TBD62783AFG
U8, U9	2	64900001039
U10	1	SN74LVC2G14DBVR
U11	1	CA-IS3021G

Таблица 17. Перечень элементов платы PMCNV-DQ16src

8.10. PMCNV-Count6 - подключение 6 сигналов быстрого счёта

8.10.1. Подключение энкодеров разных типов

Поддерживается подключение энкодеров разных следующих типов [9]:

- выход с открытым коллектором (Open Collector) - раздел 8.10.1.1
- двухтактный (каскадный, комплементарный) выход (Push–Pull, Totem Pole) - раздел 8.10.1.2
- выход по напряжению (Voltage Output) - раздел 8.10.1.3
- (TODO) дифференциальный выход (Line Driver, RS-422) - раздел 8.10.1.4

8.10.1.1. Выход с открытым коллектором (Open Collector)

На рисунке 38 отображена схема подключения энкодера с типом выхода «Открытый коллектор» по схеме PNP.

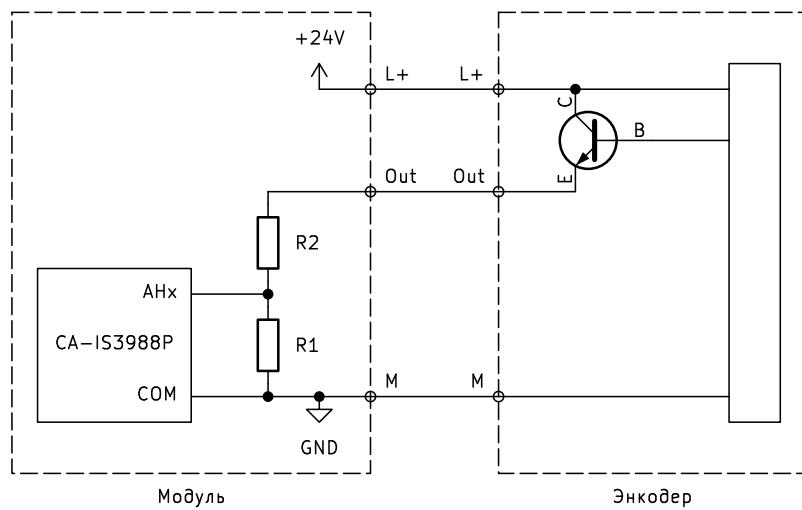


Рис. 38. Подключение энкодера с выходом открытый коллектор, по схеме PNP

На рисунке 39 отображена схема подключения энкодера с типом выхода «Открытый коллектор» по схеме NPN.

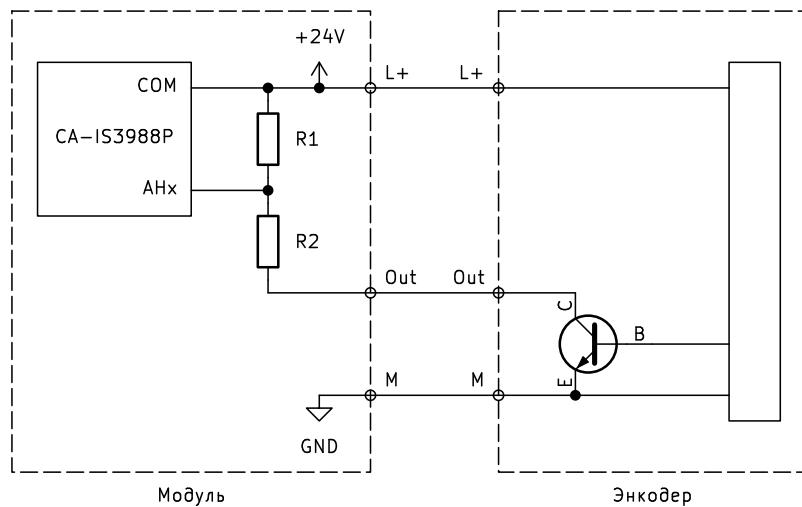


Рис. 39. Подключение энкодера с выходом открытый коллектор, по схеме NPN

8.10.1.2. Двухтактный (каскадный, комплементарный) выход (Push–Pull, Totem Pole)

На рисунке 40 отображена схема подключения энкодера с типом выхода «Открытый коллектор» по схеме NPN.

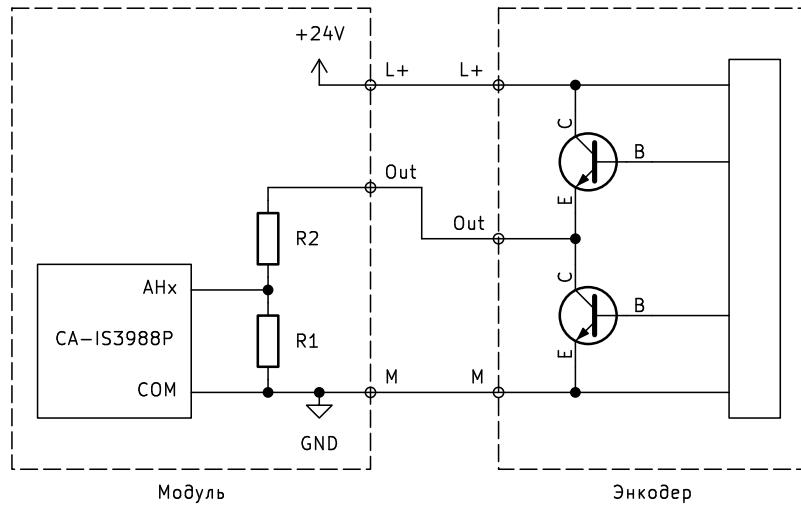


Рис. 40. Подключение энкодера с двухтактным выходом, по схеме PNP

8.10.1.3. Выход по напряжению (Voltage Output)

На рисунке 41 отображена схема подключения энкодера с типом выхода «Выход по напряжению».

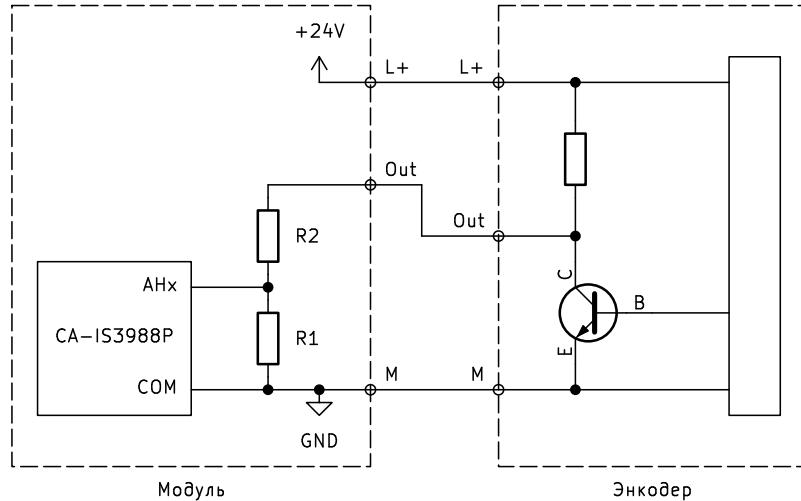


Рис. 41. Подключение энкодера с выходом по напряжению

8.10.1.4. (TODO) Дифференциальный выход (Line Driver, RS-422)

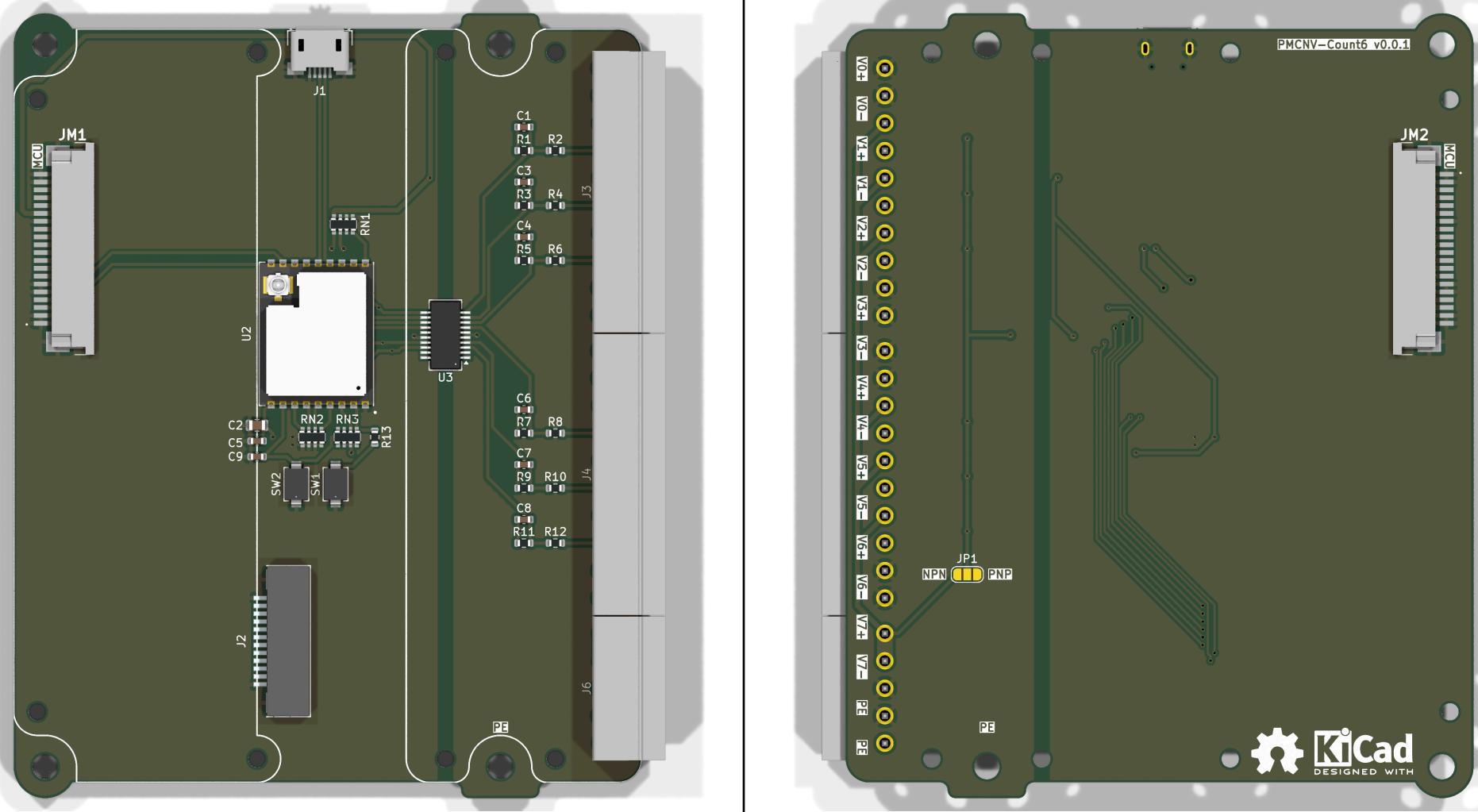


Рис. 42. Внешний вид платы PMC NV-Count6

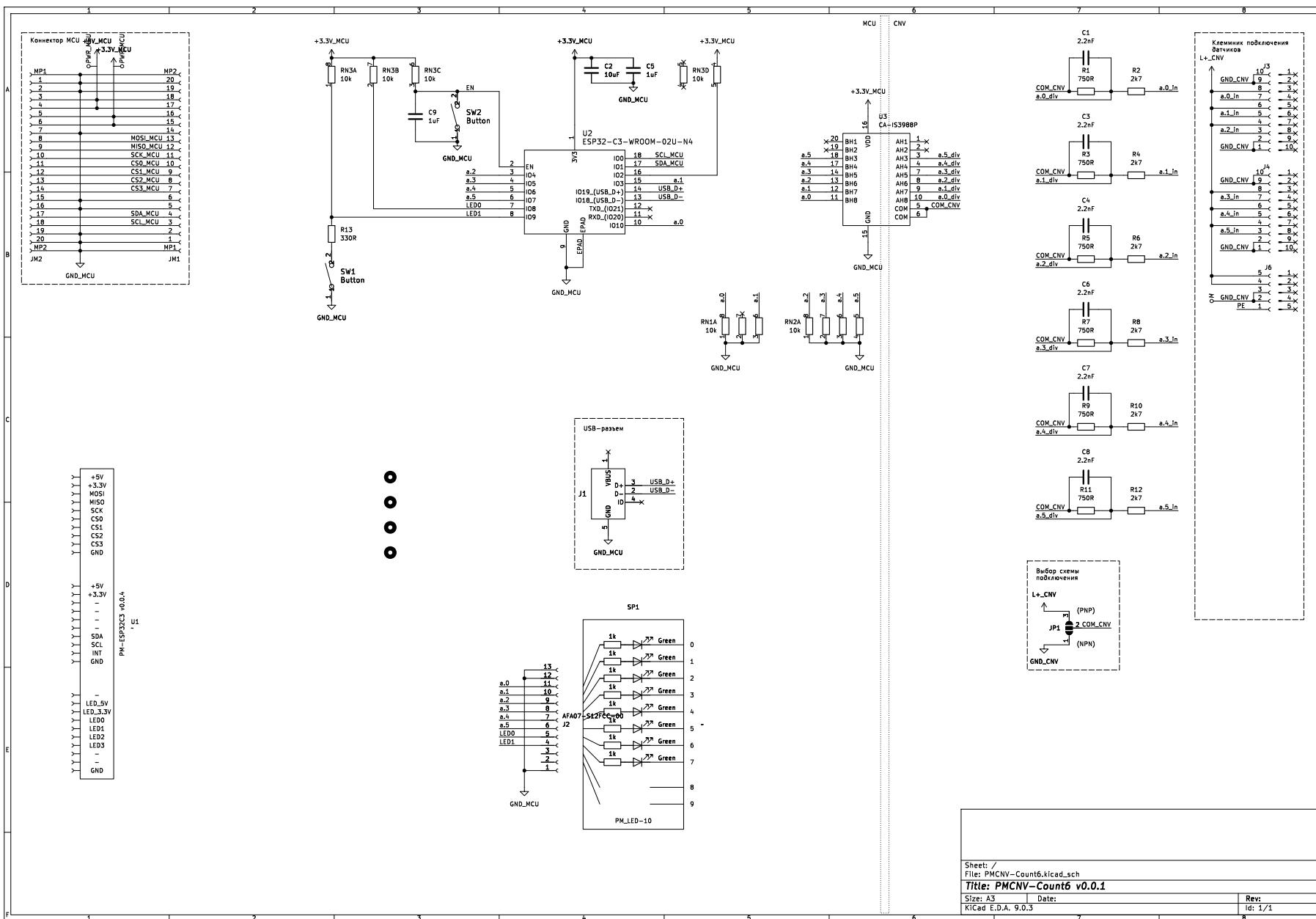


Рис. 43. Принципиальная электрическая схема платы PMCNV-Count6

Обозначение	Количе- ство	part_ipn
C1, C3, C4, C6, C7, C8	6	C_2.2nF_50V_0603_MLCC-X7R
C2	1	C_10uF_16V_0805_MLCC-X7R
C5, C9	2	C_1uF_16V_0603_MLCC-X7R
D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8	8	XL-1606SYGC
J1	1	U254-051T-4BH83-S1S
J2	1	AFA07-S12FCC-00
J3, J4	2	15EDGRC-3.5-10P
J6	1	15EDGRC-3.5-05P
J8, J9	2	15EDGK-3.5-10P
J10	1	15EDGK-3.5-05P
JM1, JM2	2	AFA07-S20FCC-00
R1, R3, R5, R7, R9, R11	6	R_750R_0603_1%
R2, R4, R6, R8, R10, R12	6	R_2k7_0603_1%
R13	1	R_330R_0603_1%
R14, R15, R16, R17, R18, R19, R20, R21	8	R_1k_0603_1%
RN1, RN2, RN3	3	R_10k_0603x4_1%
SP1	1	PM_LED-10-v0.0.1
SW1, SW2	2	TS-1088-AR02016
U2	1	ESP32-C3-WROOM-02U-N4
U3	1	CA-IS3988P

Таблица 18. Перечень элементов платы PMCNV-Count6

8.11. PMCNV-RQ8 - 8 релейных выходов

Модуль для подключения 8 релейных выходов. Допустимая подключаемая нагрузка на канал 2А. Контакты реле подключаются независимо, что позволяет подключать нагрузку от разных источников.

Функциональная схема платы представлена на рисунке 44.

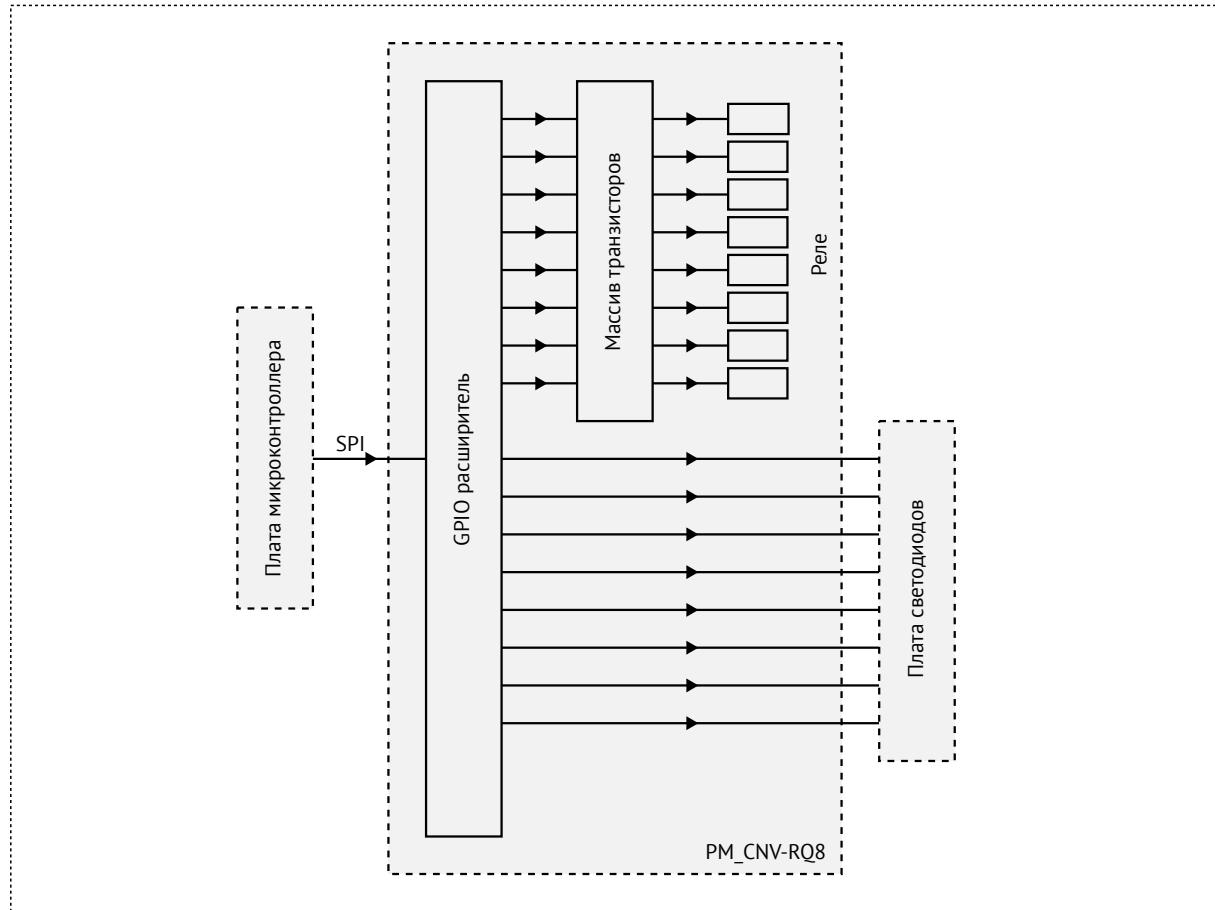


Рис. 44. Функциональная схема платы

Управляющие сигналы с платы микроконтроллера PMMCU-ESP32C3 поступают по протоколу SPI на GPIO расширитель MCP23S17 (раздел 7.9). Поскольку катушки реле потребляют значительную по меркам микроэлектроники мощность, сигналы с расширителя управляют только транзисторами (раздел 7.10), а уже с транзисторов идет питание на катушки реле. С расширителя также выходит параллельно 8 сигналов на плату светодиодов PM-LED_10, для индикации состояния реле.

Использованы реле G5NB-1A-E-DC5 компании Omron. Основные характеристики:

- Напряжение катушки 5 В постоянного напряжения.
- Ток потребления катушки 40 мА.
- Номинальная нагрузка:
 - 5 А 230 В переменного напряжения.
 - 3 А 30 В постоянного напряжения.
- 100000 операций при коммутации 5 А 230 В переменного напряжения.

8.11.1. Коммуникация с микроконтроллером

Для связи с микроконтроллером можно использовать интерфейс SPI или I²C.

Для использования интерфейса SPI:

- установить коннекторы JM1 и JM2;
- выбрать сигнал CS, установив одну из перемычек CS0..CS3;
- замкнуть сигналы A0..A2 на «-»;
- установить в посадочное место U1 микросхему MCP23S17/SS (раздел 7.9).

Для использования интерфейса I²C:

- установить коннекторы JM3 и JM4;
- замкнуть сигналы A0..A2 на «-» или «+». Адрес устройства определяется по таблице 1;
- установить в посадочное место U1 микросхему MCP23017/SS (раздел 7.9)

8.11.2. Подключение по I²C

Проверка работы из консоли. Устройство с адресом 0x20.

```
# Проверить доступность
i2cdetect -y 0

# GPIOA устанавливаем в режим выхода
i2ctransfer -y 0 w2@0x20 0x00 0x00

# GPIOB устанавливаем в режим выхода
i2ctransfer -y 0 w2@0x20 0x01 0x00

# Включаем все реле
i2ctransfer -y 0 w2@0x20 0x12 0xFF

# Включаем реле R0, R1 .. R7
i2ctransfer -y 0 w2@0x20 0x12 0x80
i2ctransfer -y 0 w2@0x20 0x12 0x40
i2ctransfer -y 0 w2@0x20 0x12 0x20
i2ctransfer -y 0 w2@0x20 0x12 0x10
i2ctransfer -y 0 w2@0x20 0x12 0x08
i2ctransfer -y 0 w2@0x20 0x12 0x04
i2ctransfer -y 0 w2@0x20 0x12 0x02
i2ctransfer -y 0 w2@0x20 0x12 0x01

# Отключаем все реле
i2ctransfer -y 0 w2@0x20 0x12 0x00
```

Листинг 2. Проверка работы из консоли

8.11.3. Расчёт потребления

Элемент	Кол-во	Потребление, мВт		Итого, мВт	
		3,3 В	5 В	3,3 В	5 В
G5NB-1A-E-DC5	8	0	200	0	1600
MCP23S17-E/SO	1	3,3	0	3,3	0
TBD62783AFG	2	0	60	0	120

Светодиоды	10	9,9	0	99	0
Итого, мВт:				102,3	1720
Итого, мА				31	344

Таблица 19. Расчёт потребления

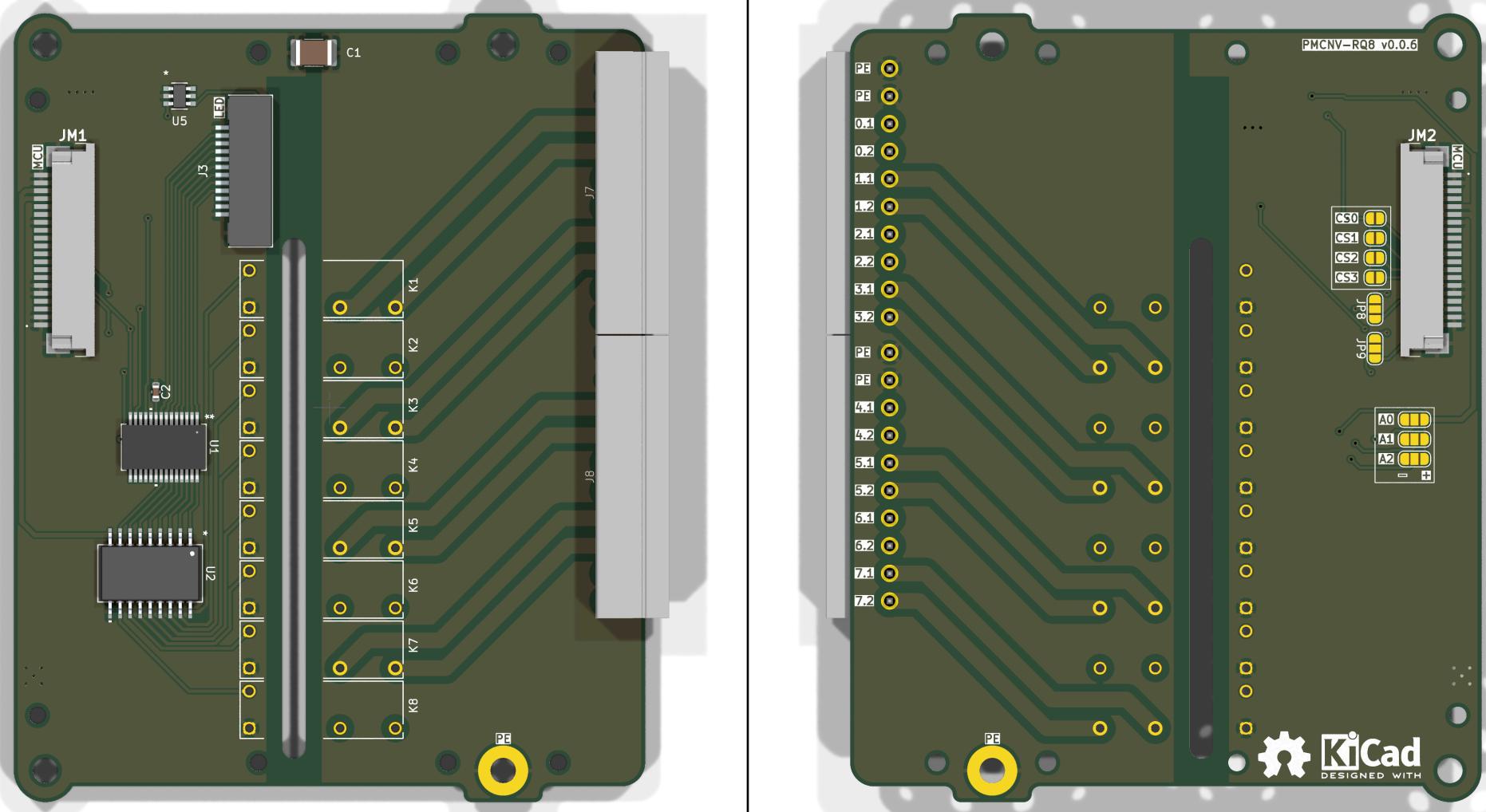


Рис. 45. Внешний вид платы PMCNV-RQ8

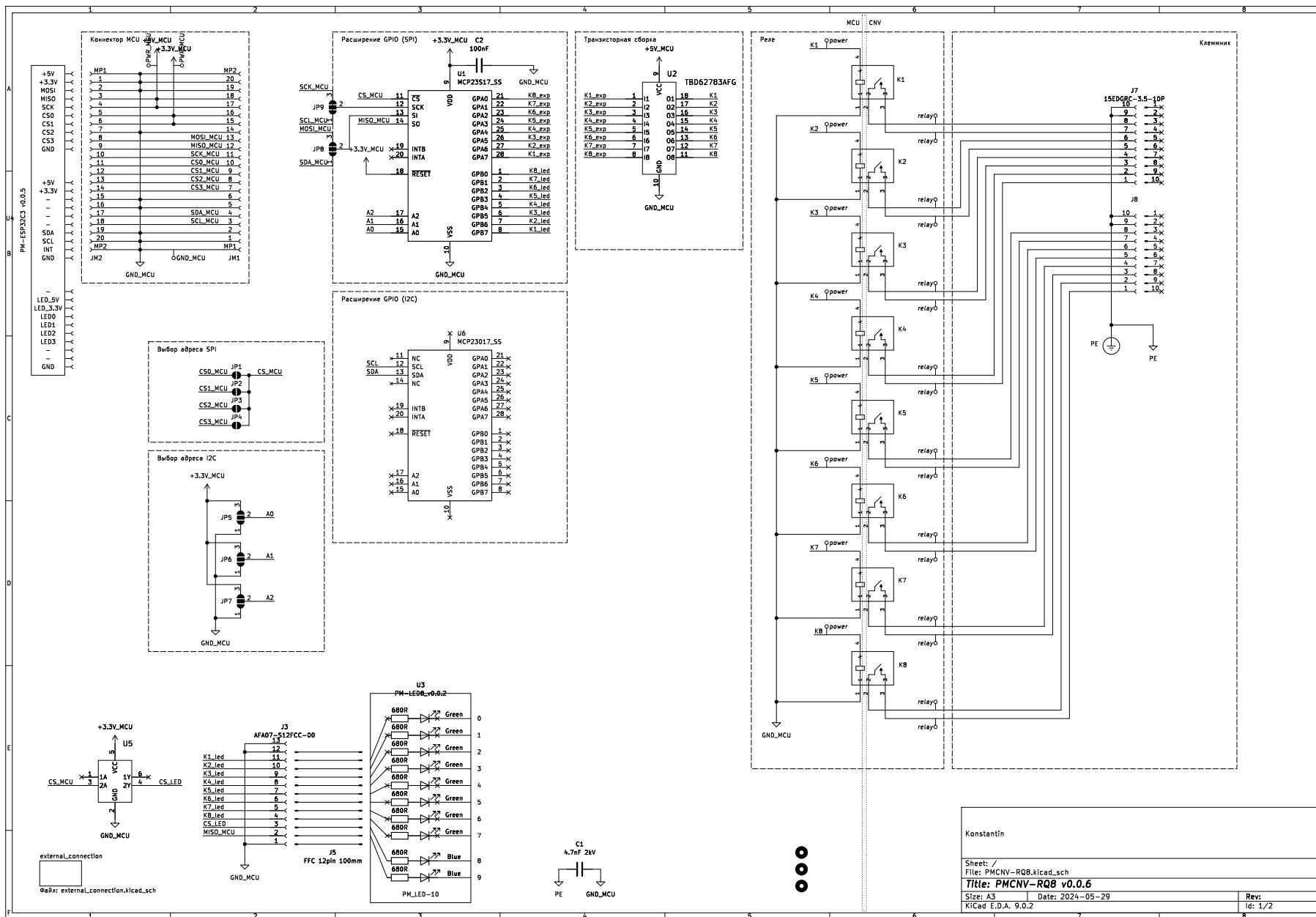


Рис. 46. Принципиальная электрическая схема платы PMCNV-RQ8

Обозначение	Количе- ство	part_ipn
C1	1	C_4.7nF_2kV_1812
C2	1	C_100nF_16V_0603_MLCC-X7R
D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8	8	XL-1606SYGC
D9, D10	2	XL-1606UBC
J1, J9	2	15EDGK-3.5-10P
J3	1	AFA07-S12FCC-00
J5	1	FFC_12P_P1.0_100mm_straight
J7, J8	2	15EDGRC-3.5-10P
JM1, JM2	2	AFA07-S20FCC-00
K1, K2, K3, K4, K5, K6, K7, K8	8	G5NB-1A-E-DC5
R1, R2, R34, R35, R36, R37, R38, R39, R40, R41	10	R_680R_0603_1%
U1	1	MCP23S17-E/SO
U2	1	TBD62783AFG
U3	1	PM_LED-10-v0.0.1
U5	1	SN74LVC2G14DBVR
U6	1	MCP23017-E/SO

Таблица 20. Перечень элементов платы PMCNV-RQ8

8.12. РМСНВ-AI8IU - 8 аналоговых входов (0..20 мА или 0..10 В)

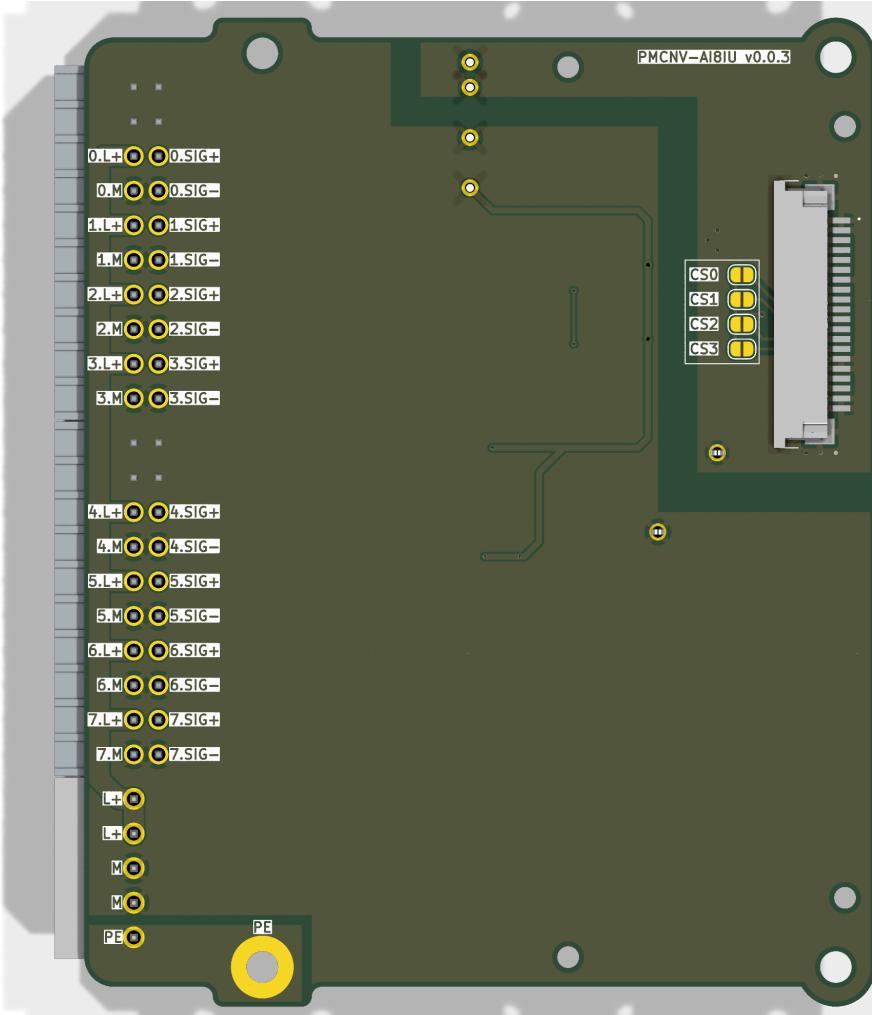
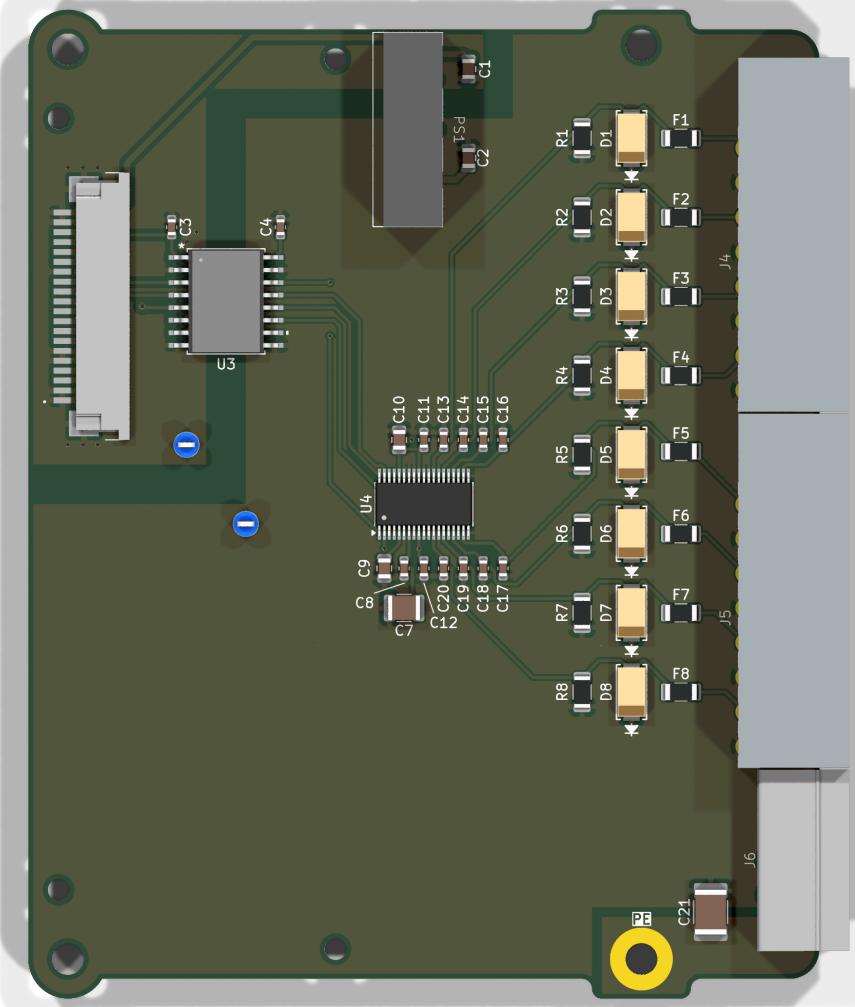


Рис. 47. Внешний вид платы PMCNV-AI8IU

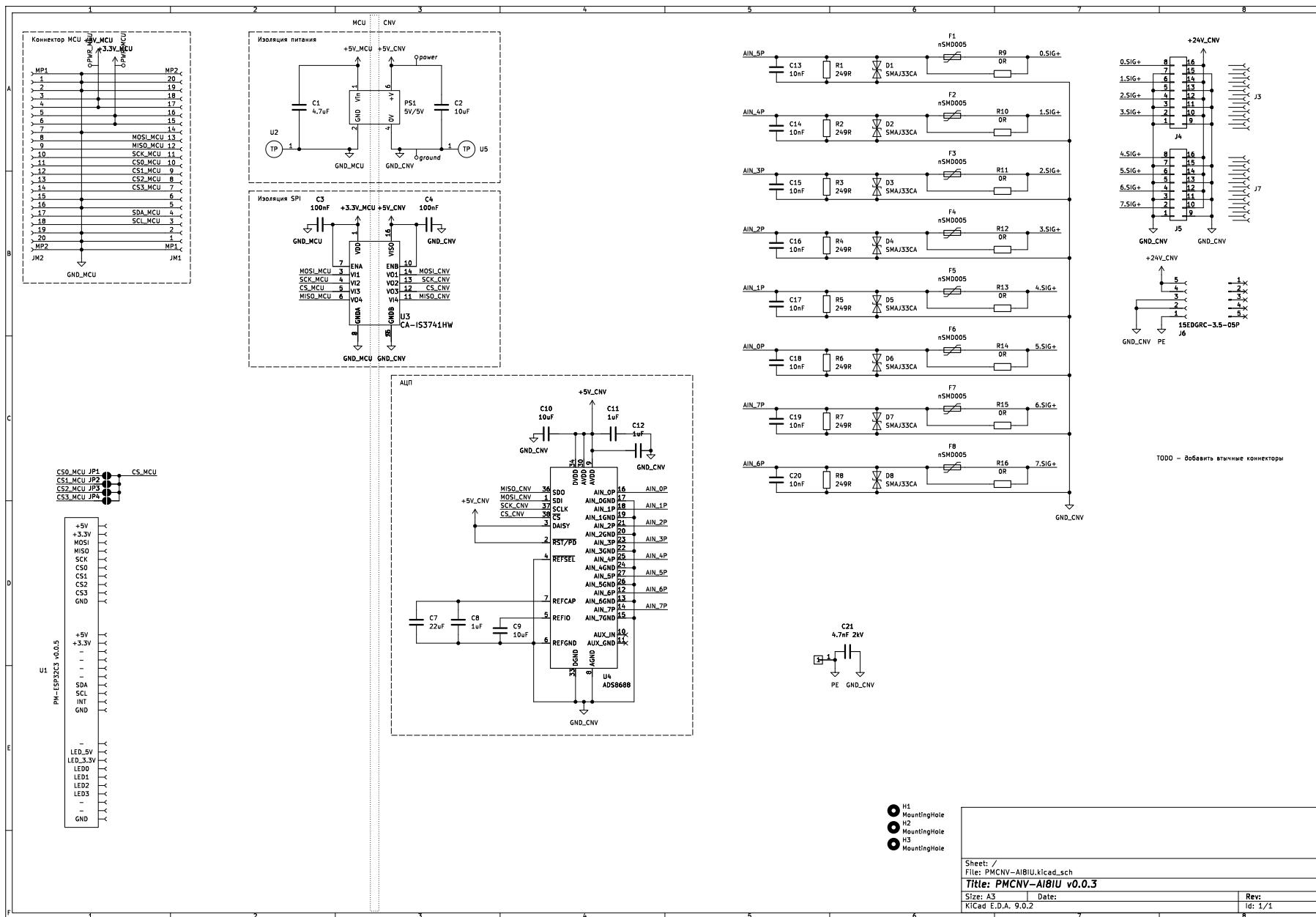


Рис. 48. Принципиальная электрическая схема платы PMCNV-AI8IU

Обозначение	Количе- ство	part_ipn
C1	1	C_4.7uF_16V_0805_MLCC-X7R
C2, C9, C10	3	C_10uF_16V_0805_MLCC-X7R
C3, C4	2	C_100nF_16V_0603_MLCC-X7R
C7	1	C_22uF_16V_1210_MLCC-X7R
C8, C11, C12	3	C_1uF_16V_0603_MLCC-X7R
C13, C14, C15, C16, C17, C18, C19, C20	8	C_10nF_50V_0603_MLCC-C0G
C21	1	C_4.7nF_2kV_1812
D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8	8	SMAJ33CA
F1, F2, F3, F4, F5, F6, F7, F8	8	nSMD005
J3, J7	2	15EDGKNH-3.5-16P
J4, J5	2	15EDGRHC-THR-3.5-16P
J6	1	15EDGRC-3.5-05P
J10	1	15EDGK-3.5-05P
JM1, JM2	2	AFA07-S20FCC-00
PS1	1	B0505LS-1W
R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7, R8	8	R_249R_1206_0.1%_25ppm
R9, R10, R11, R12, R13, R14, R15, R16	8	R_0R_1206_1%
U2, U5	2	Keystone_5117
U3	1	CA-IS3741HW
U4	1	ADS8688

Таблица 21. Перечень элементов платы PMCNV-AI8IU

8.13. РМСНВ-AI4R - 4 аналоговых входа (термосопротивления)

8.14. РМСНВ-А14Т - 4 аналоговых входа (термопары)

Измерение построено на базе АЦП AD7193. Производитель разработал пример для измерения температуры с помощью термопар - CN0287 [10].

8.14.1. Преобразование измеренного напряжения в температуру

Значение температуры можно получить по градиуровочным таблицам ГОСТ 8.585-2001 [11].

8.14.2. Компенсация холодного спая

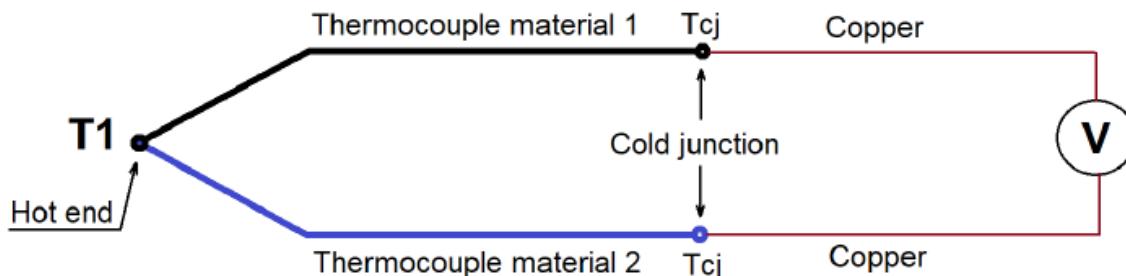


Рис. 49. Компенсация холодного спая

As shown in Figure 1, the thermocouple has a “hot” (measuring) end and two “cold” connections. During the measuring process, both “hot” and “cold” contacts generate voltage. So, to accurately measure the temperature at the “hot” end, the cold junction voltage must be considered.

The cold junction voltage is generated in two points of contact: metal 1 with copper and metal 2 with copper. Instead of copper any metal or alloy can be used, the thermocouple’s cold ends can be connected to the voltmeter via gold-plated contacts or soldered directly to the PCB. It doesn’t matter, as long as both contacts are made of the same metal, they can be eliminated thus cold junction voltage is the same as between metal 1 and metal 2.

By its nature, a thermocouple junction does not generate any thermovoltage when it is at 0°C temperature, see Figure 2. So, if the cold junction is placed in an electrically isolated ice bath or an accurate temperature block of 0°C, no compensation is needed. But this is not practical. The best way to compensate for the thermocouple cold junction is by measuring the temperature of the cold contacts (using a separate temp sensor), and converting that temperature into the thermocouple voltage, then using this value and the voltmeter readings to calculate the temperature at the hot end. See the example below

[12]

Напряжение, которое создается на термпаре (горячий спай):

$$E_h = E_{ADC} + E_c \quad (13)$$

где:

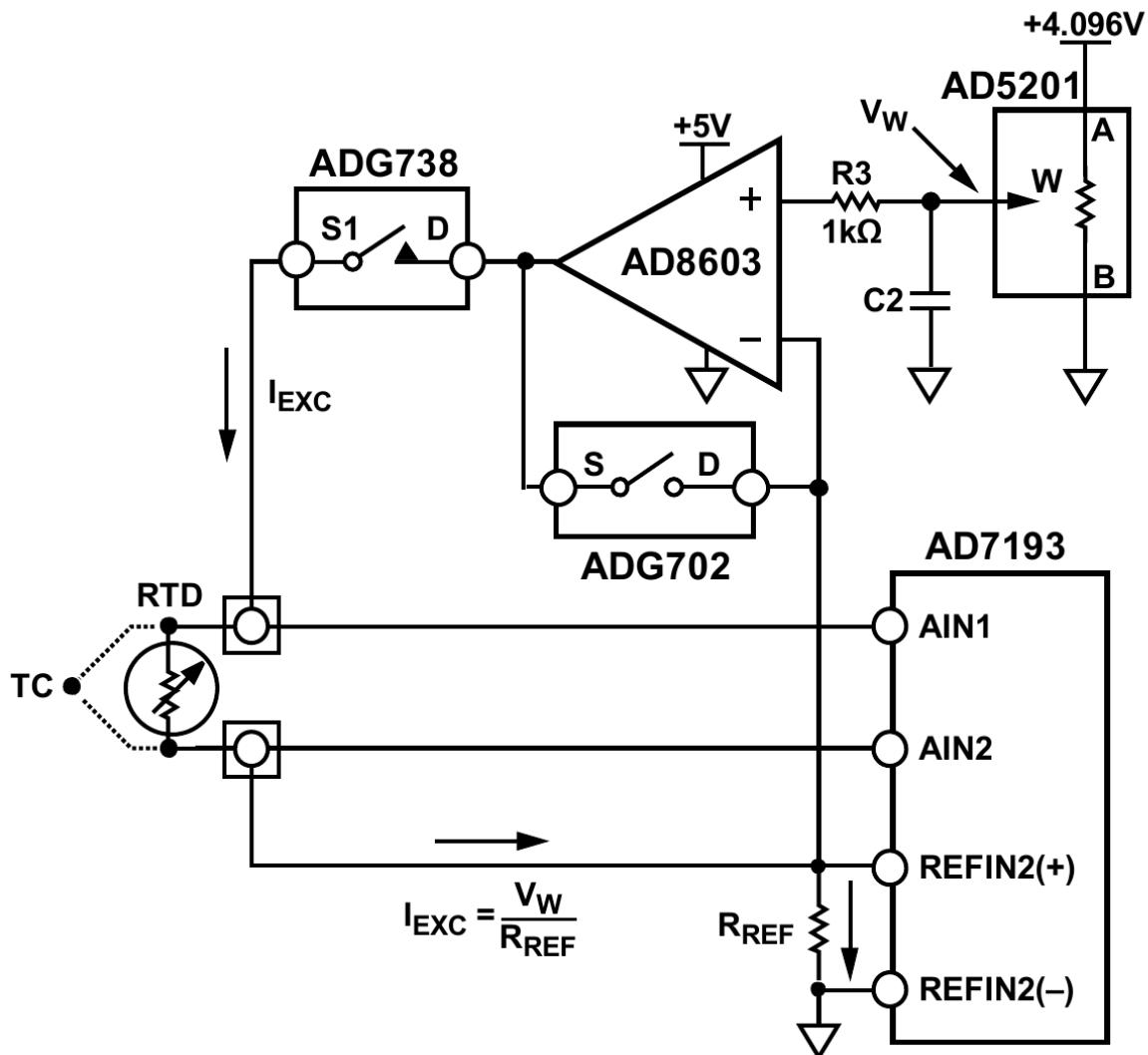
- E_h - напряжение, создаваемое горячим спаем («hot»)
- E_c - напряжение, создаваемое холодным спаем («cold»)
- E_{ADC} - напряжение, которое измеряет АЦП

Например:

1. АЦП измерил напряжение $E_{ADC} = 19792$ мкВ

2. Без компенсации по таблицам [11] температура горячего спая: 480°C
3. Показания датчика температуры холодного спая: $E_c = 20^\circ\text{C}$
4. По таблицам [11] определям $E_c = 798 \mu\text{V}$
5. Определяем напряжение горячего спая $E_h = 19792 + 798 = 20590 \mu\text{V}$
6. По таблицам [11] определяем температуру горячего спая с компенсацией: 498°C.

8.14.3. Напряжение смещения



10926-002

Рис. 50. Напряжение смещения

8.14.4. Цепи защиты

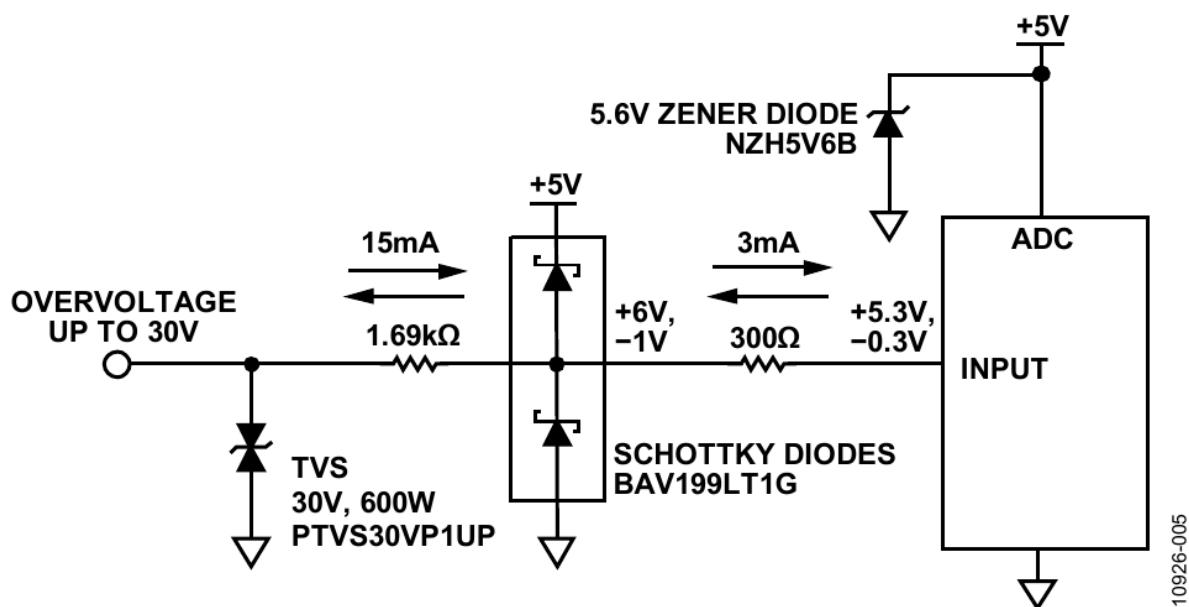


Figure 5. Transient and Overvoltage Protection Circuit

Рис. 51. Цепи защиты

10926-005

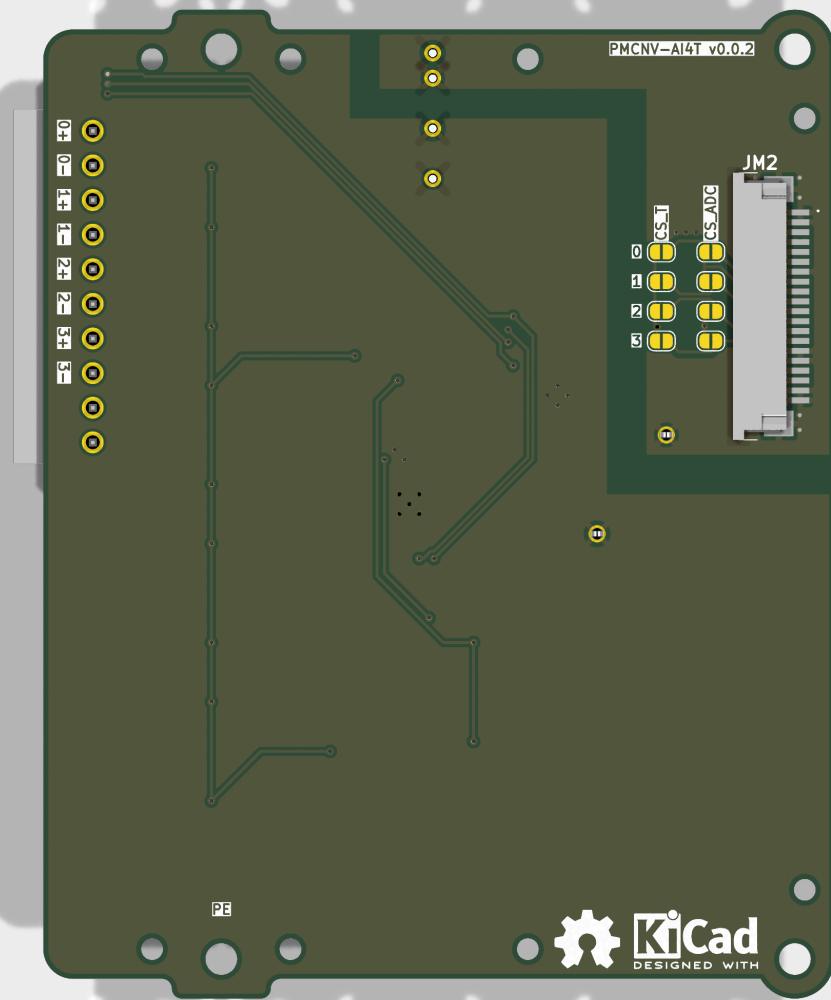
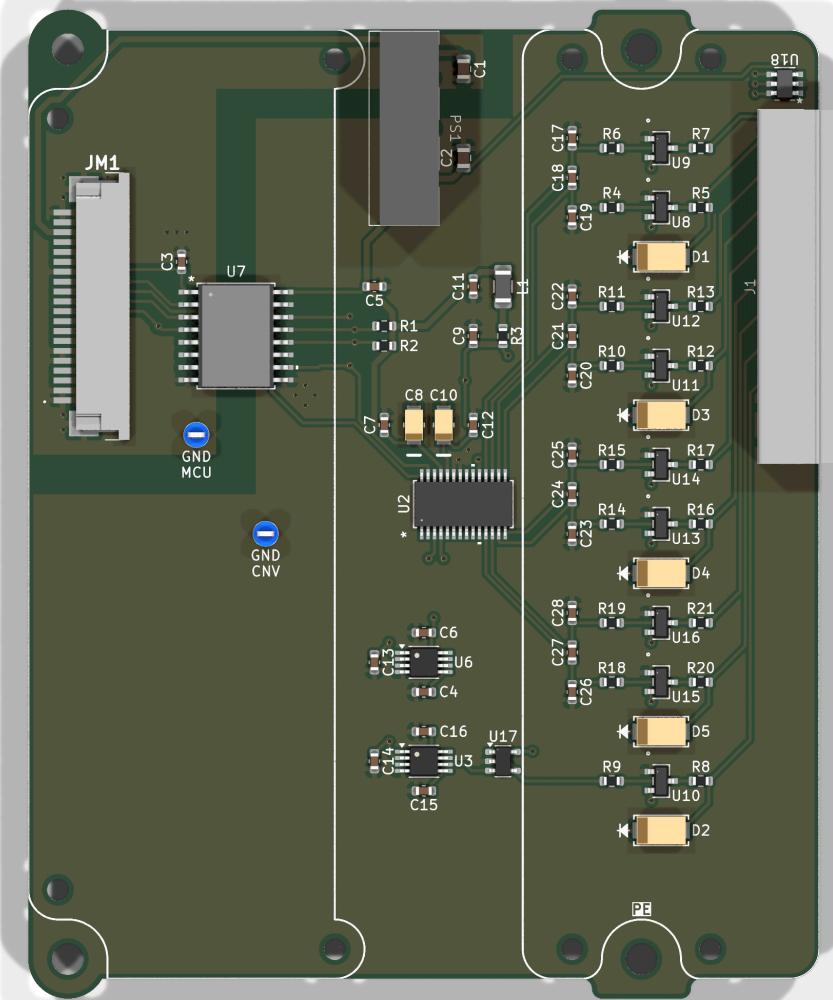


Рис. 52. Внешний вид платы PMCNV-AI4T

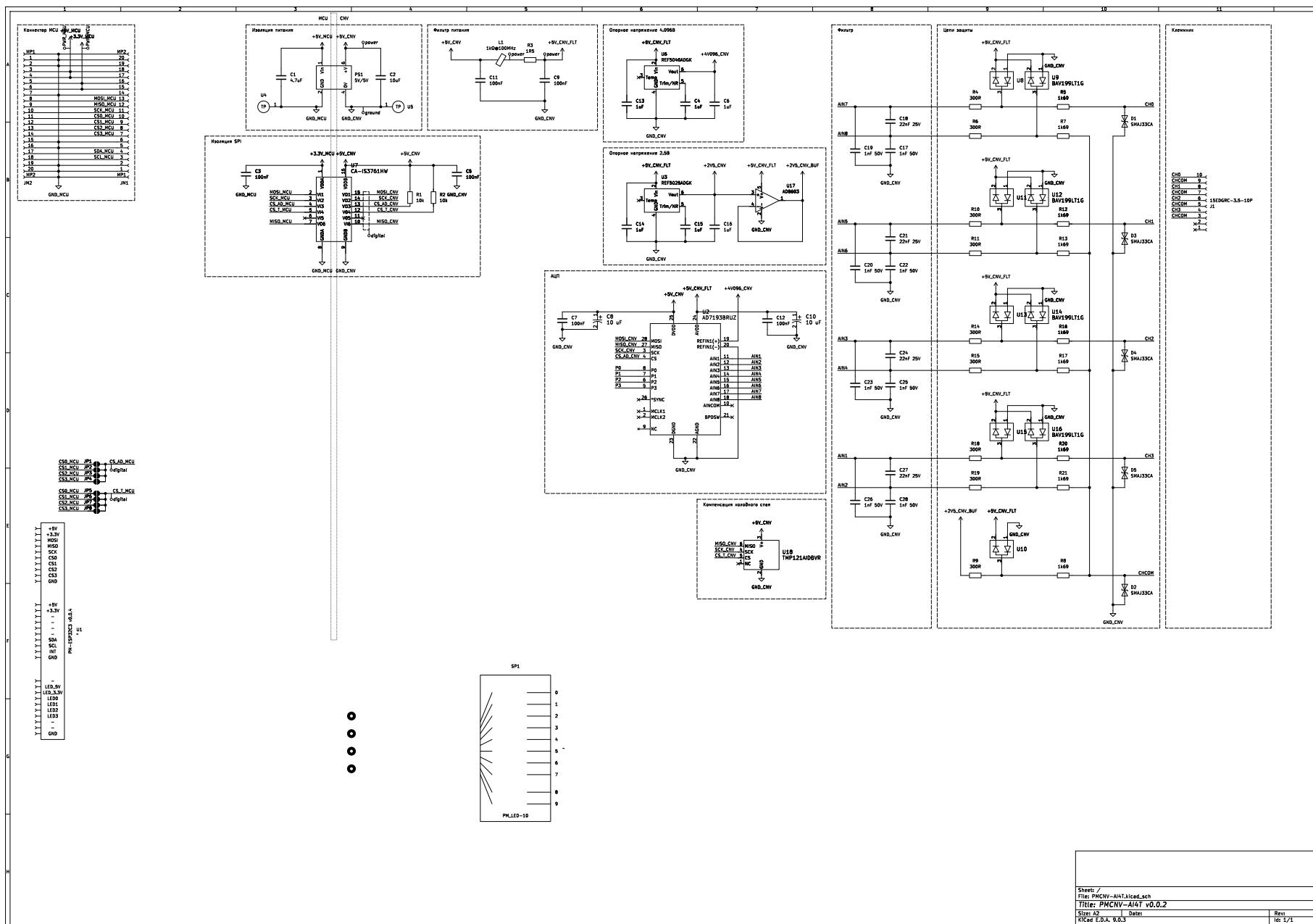


Рис. 53. Принципиальная электрическая схема платы PMC NV-AI4T

Обозначение	Количе- ство	part_ipn
C1	1	C_4.7uF_16V_0805_MLCC-X7R
C2	1	C_10uF_16V_0805_MLCC-X7R
C3, C5, C7, C9, C11, C12	6	C_100nF_16V_0603_MLCC-X7R
C4, C6, C13, C14, C15, C16	6	C_1uF_16V_0603_MLCC-X7R
C8, C10	2	TAJA106M016RNJ
C17, C19, C20, C22, C23, C25, C26, C28	8	C_1nF_50V_0603_MLCC-X7R
C18, C21, C24, C27	4	C_22nF_25V_0603_MLCC-X7R
D1, D2, D3, D4, D5	5	SMAJ33CA
J1	1	15EDGRC-3.5-10P
JM1, JM2	2	AFA07-S20FCC-00
L1	1	FB_300mΩ_1kΩ@100MHz_1206
PS1	1	B0505LS-1W
R1, R2	2	R_10k_0603_1%
R3	1	R_1R5_0603_1%
R4, R6, R9, R10, R11, R14, R15, R18, R19	9	R_300R_0603_1%
R5, R7, R8, R12, R13, R16, R17, R20, R21	9	R_1k69_0603_1%
SP1	1	PM_LED-10-v0.0.1
U2	1	AD7193BRUZ
U3, U6, U8, U9, U10, U11, U12, U13, U14, U15, U16, U17, U18	13	
U4, U5	2	Keystone_5117
U7	1	CA-IS3761HW

Таблица 22. Перечень элементов платы PMCNV-AI4T

8.15. РМСНВ-AI4W - 4 аналоговых входа (тензодатчики)

Плата аналогового ввода для опроса сигналов тензодатчиков. Можно подключить до 4 тензодатчиков.

Гальваническая изоляция от микроконтроллера реализована с помощью 2 микросхем:

- CA-IS3105W - DC / DC преобразователь для цепей питания.
- CA-IS3741HW - преобразователь сигналов.

Схемотехника платы разработана на основе примера отладочной платы от производителя - [13].

8.15.1. Расчёт потребления

Элемент	Кол-во	Потребление, мВт		Итого, мВт	
		3,3 В	5 В	3,3 В	5 В
AD7193	1	0	24	0	24
Светодиоды	7	0	22	0	154
Итого, мВт:				0	178
Итого, мА				0	35,6

Таблица 23. Расчёт потребления

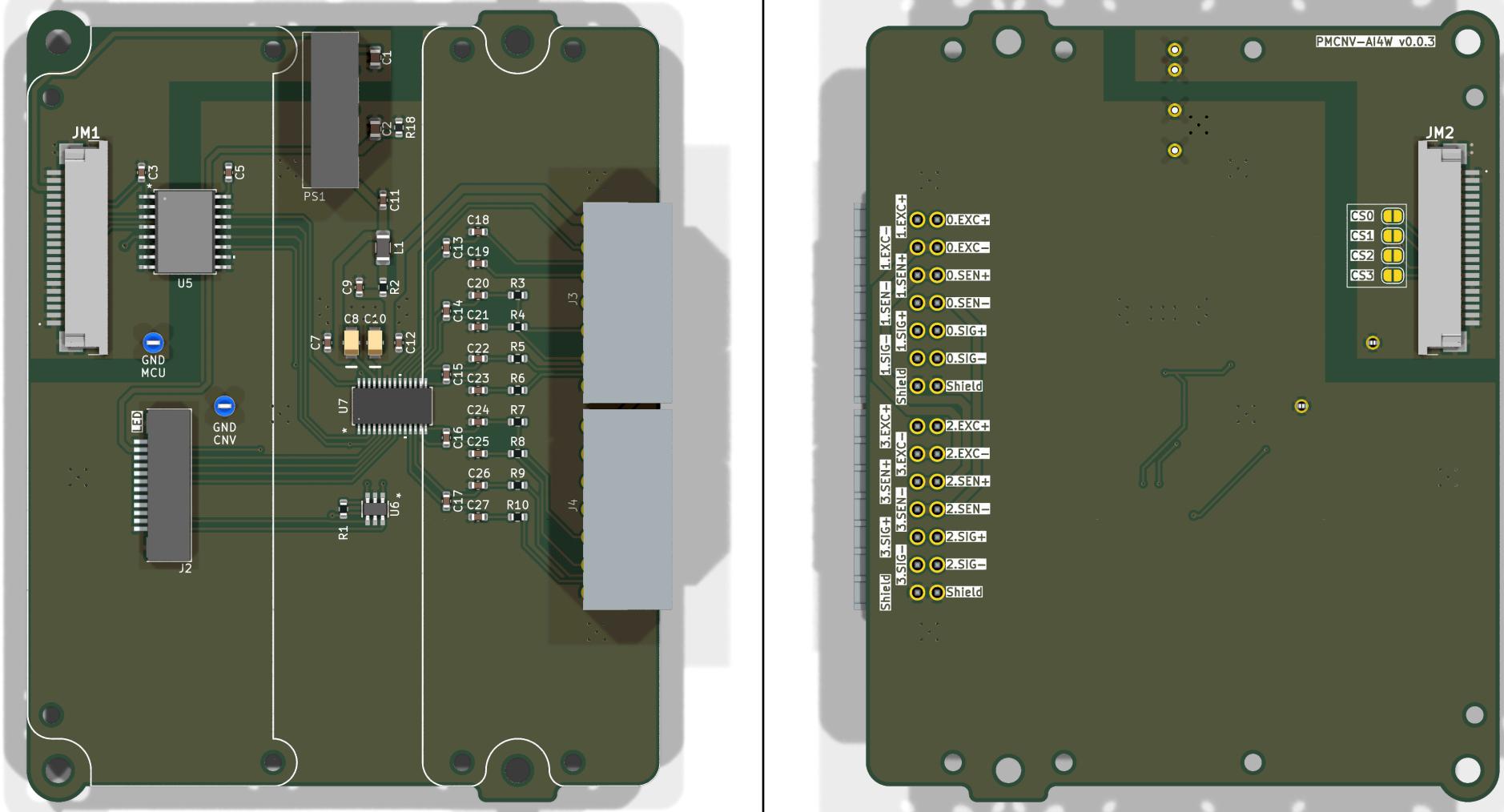


Рис. 54. Внешний вид платы PMC NV-AI4W

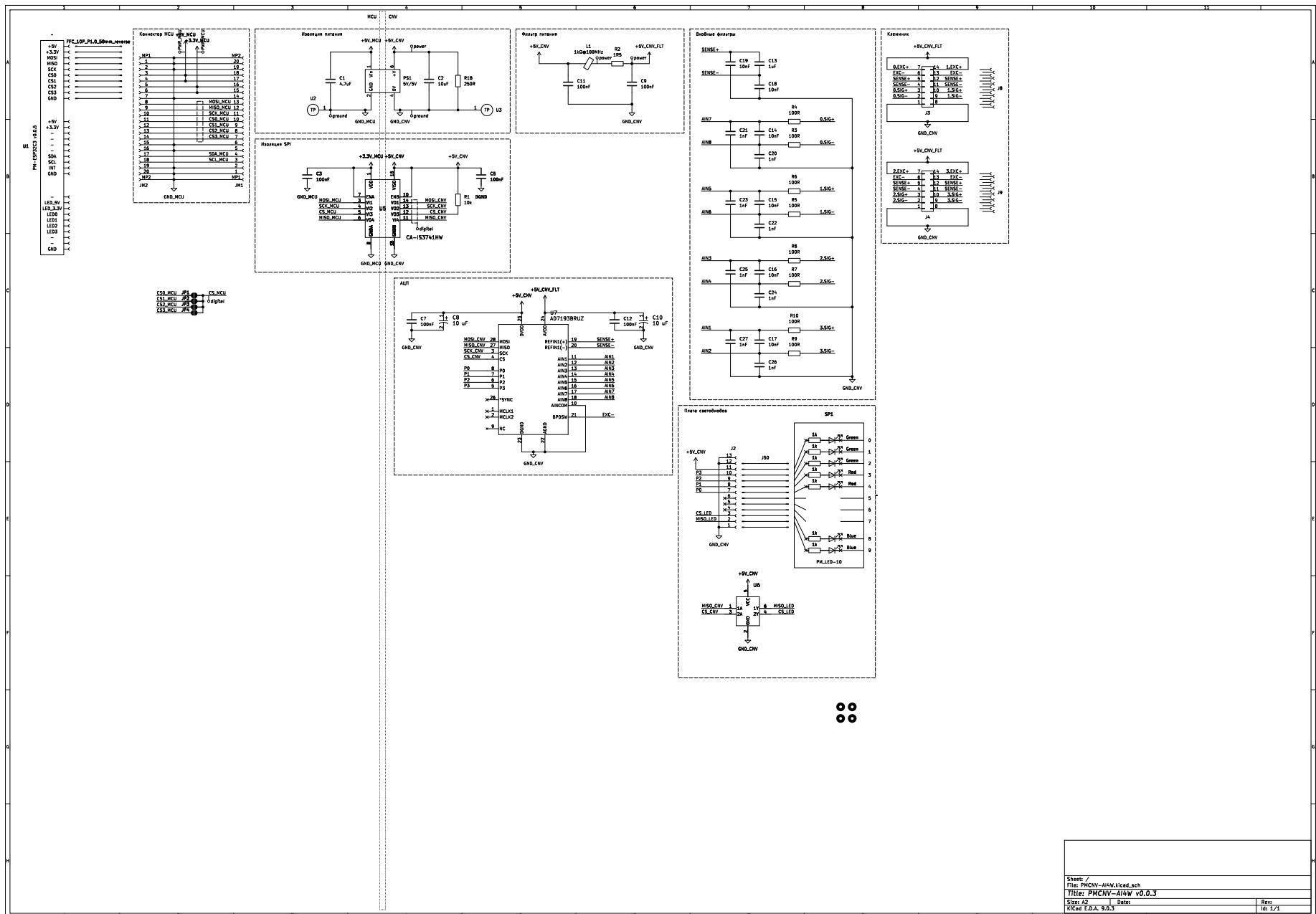


Рис. 55. Принципиальная электрическая схема платы PMCNV-AI4W

Обозначение	Количе- ство	part_ipn
C1	1	C_4.7uF_16V_0805_MLCC-X7R
C2	1	C_10uF_16V_0805_MLCC-X7R
C3, C5, C7, C9, C11, C12	6	C_100nF_16V_0603_MLCC-X7R
C8, C10	2	TAJA106M016RNJ
C13	1	C_1uF_16V_0603_MLCC-X7R
C14, C15, C16, C17, C18, C19	6	C_10nF_16V_0603_MLCC-X7R
C20, C21, C22, C23, C24, C25, C26, C27	8	C_1nF_16V_0603_MLCC-X7R
D1, D2, D3	3	XL-1606SYGC
D4, D5	2	XL-1606SURC
D6, D7	2	XL-1606UBC
J2	1	AFA07-S12FCC-00
J3, J4	2	15EDGRHC-THR-3.5-14P
J8, J9	2	15EDGKNH-3.5-14P
J10	1	FFC_10P_P1.0_50mm_reverse
J50	1	FFC_12P_P1.0_100mm_straight
JM1, JM2	2	AFA07-S20FCC-00
L1	1	FB_300mΩ_1kΩ@100MHz_1206
PS1	1	B0505LS-1W
R1	1	R_10k_0603_1%
R2	1	R_1R5_0603_1%
R3, R4, R5, R6, R7, R8, R9, R10	8	R_100R_0603_1%
R11, R12, R13, R14, R15, R16, R17	7	R_1k_0603_1%
R18	1	R_250R_0603_1%
SP1	1	PM_LED-10-v0.0.1
U2, U3	2	Keystone_5117
U5	1	CA-IS3741HW
U6	1	SN74LVC2G14DBVR
U7	1	AD7193BRUZ

Таблица 24. Перечень элементов платы PMCNV-AI4W

8.16. РМСНВ-АQ - аналоговый выход

8.17. PMCNV-EnMon - контроль параметров сети 400В

[14]

ADE9078

<https://www.analog.com/en/product-category/energy-metering-ics.html#category-detail>

8.18. PM_HMI-Keyboard

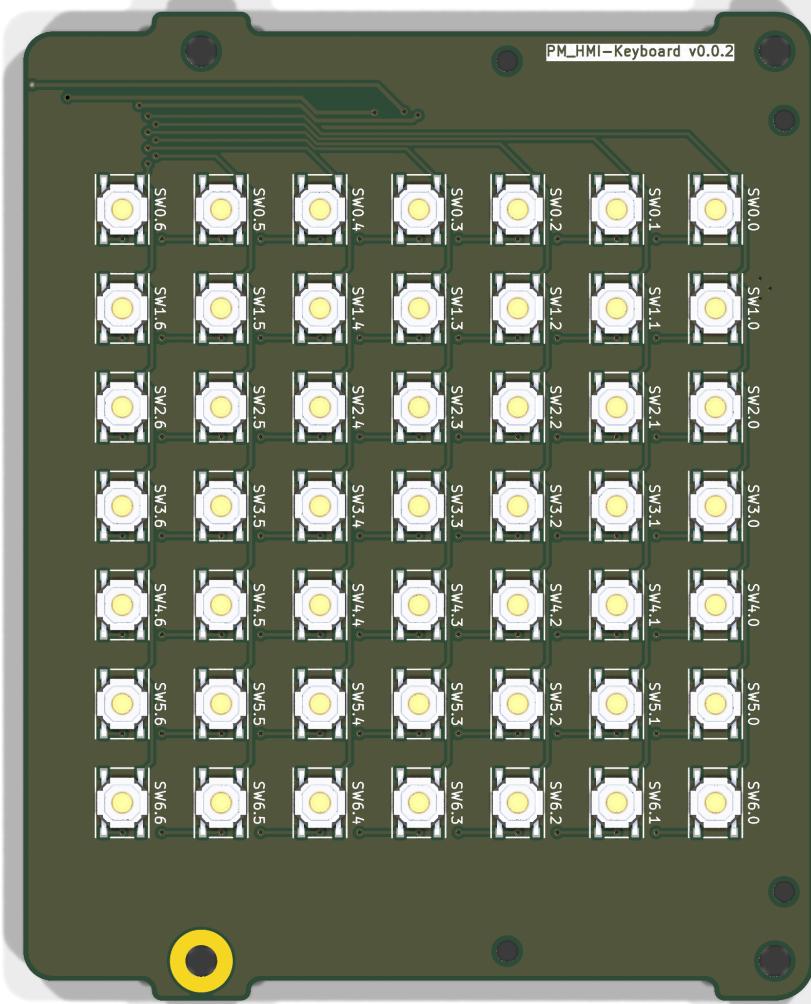
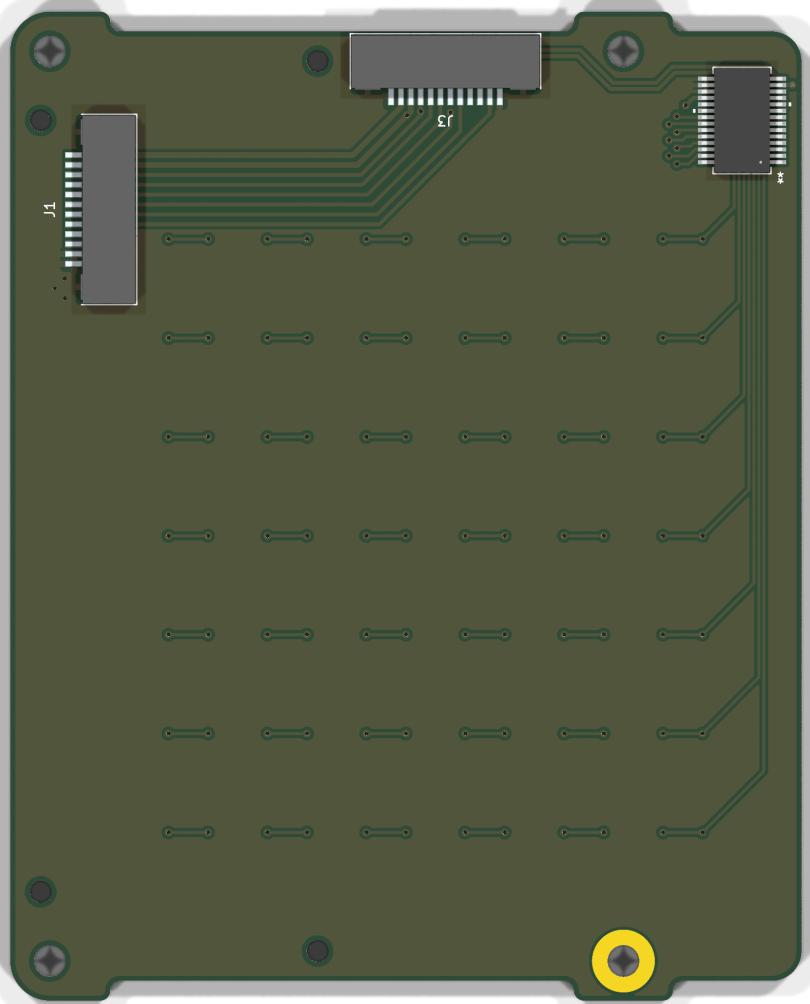


Рис. 56. Внешний вид платы PM_HMI-Keyboard

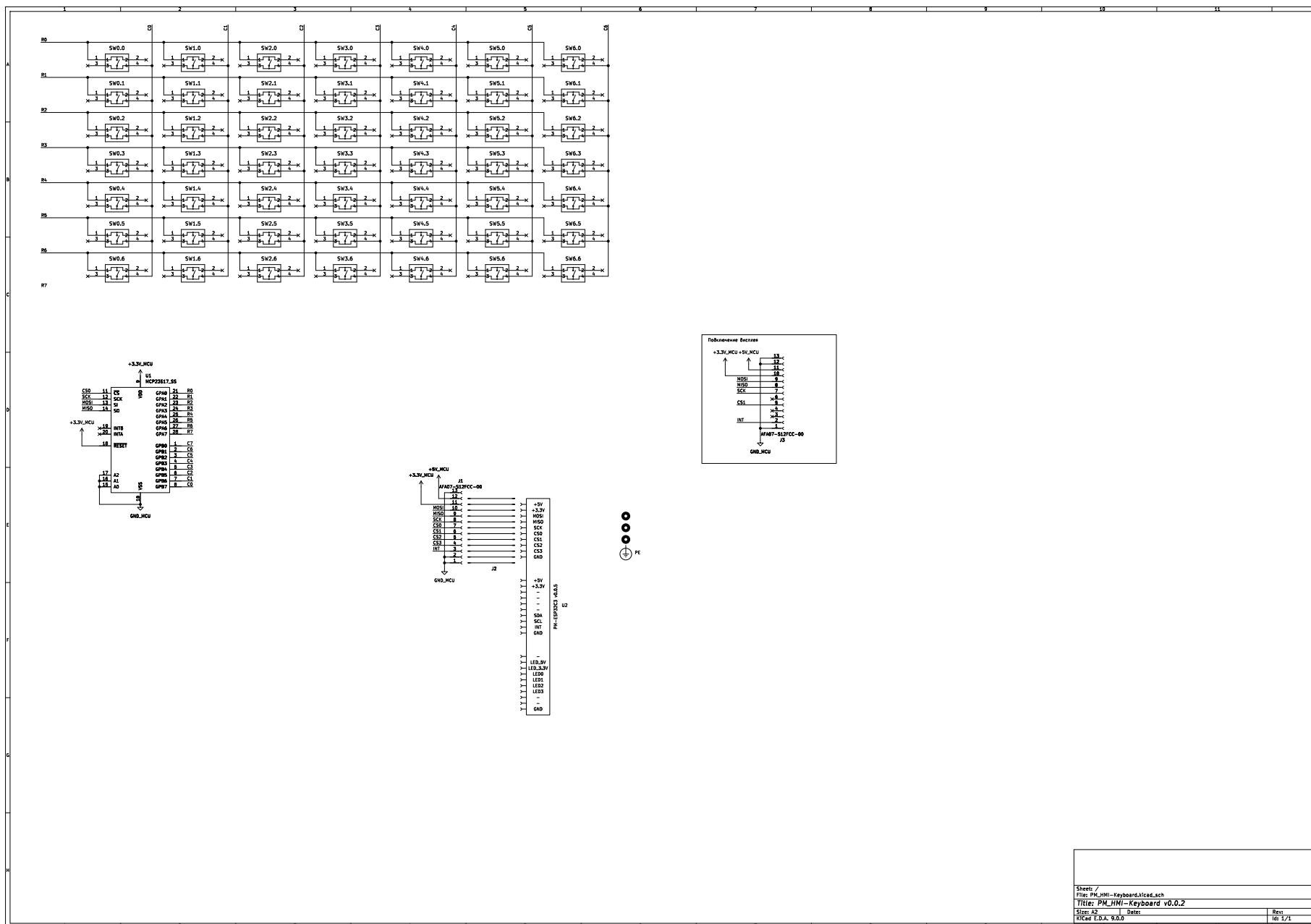


Рис. 57. Принципиальная электрическая схема платы PM_HMI-Keyboard

Обозначение	Количе- ство	part_ipn
J1, J3	2	AFA07-S12FCC-00
J2	1	FFC_12P_P1.0_100mm_straight
SW0.0, SW0.1, SW0.2, SW0.3, SW0.4, SW0.5, SW0.6, SW1.0, SW1.1, SW1.2, SW1.3, SW1.4, SW1.5, SW1.6, SW2.0, SW2.1, SW2.2, SW2.3, SW2.4, SW2.5, SW2.6, SW3.0, SW3.1, SW3.2, SW3.3, SW3.4, SW3.5, SW3.6, SW4.0, SW4.1, SW4.2, SW4.3, SW4.4, SW4.5, SW4.6, SW5.0, SW5.1, SW5.2, SW5.3, SW5.4, SW5.5, SW5.6, SW6.0, SW6.1, SW6.2, SW6.3, SW6.4, SW6.5, SW6.6	49	TS-1187A-B-A-B
U1	1	MCP23S17-E/SS

Таблица 25. Перечень элементов платы PM_HMI-Keyboard

8.19. PM_HMI-Touch

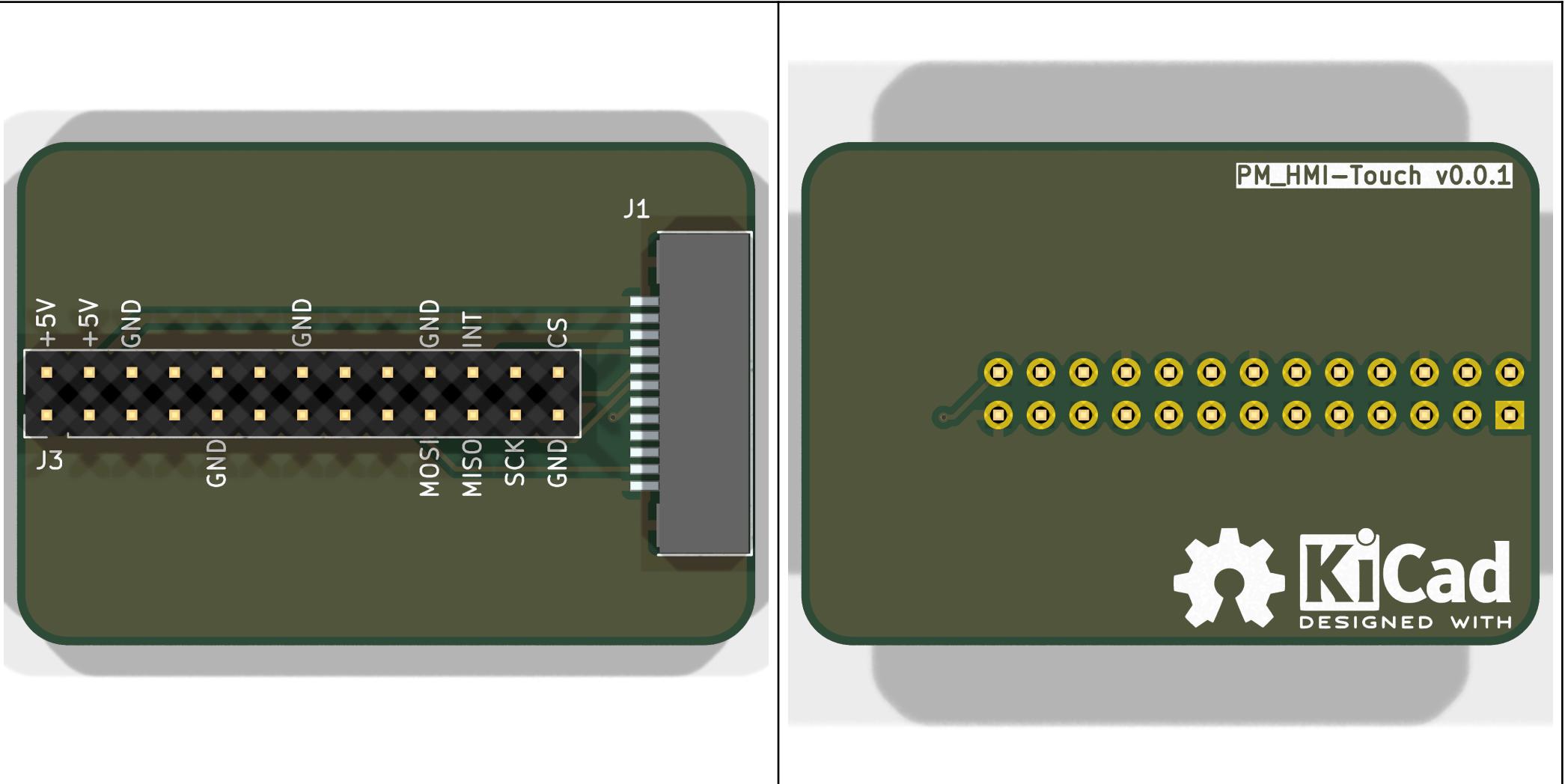


Рис. 58. Внешний вид платы PM_HMI-Touch

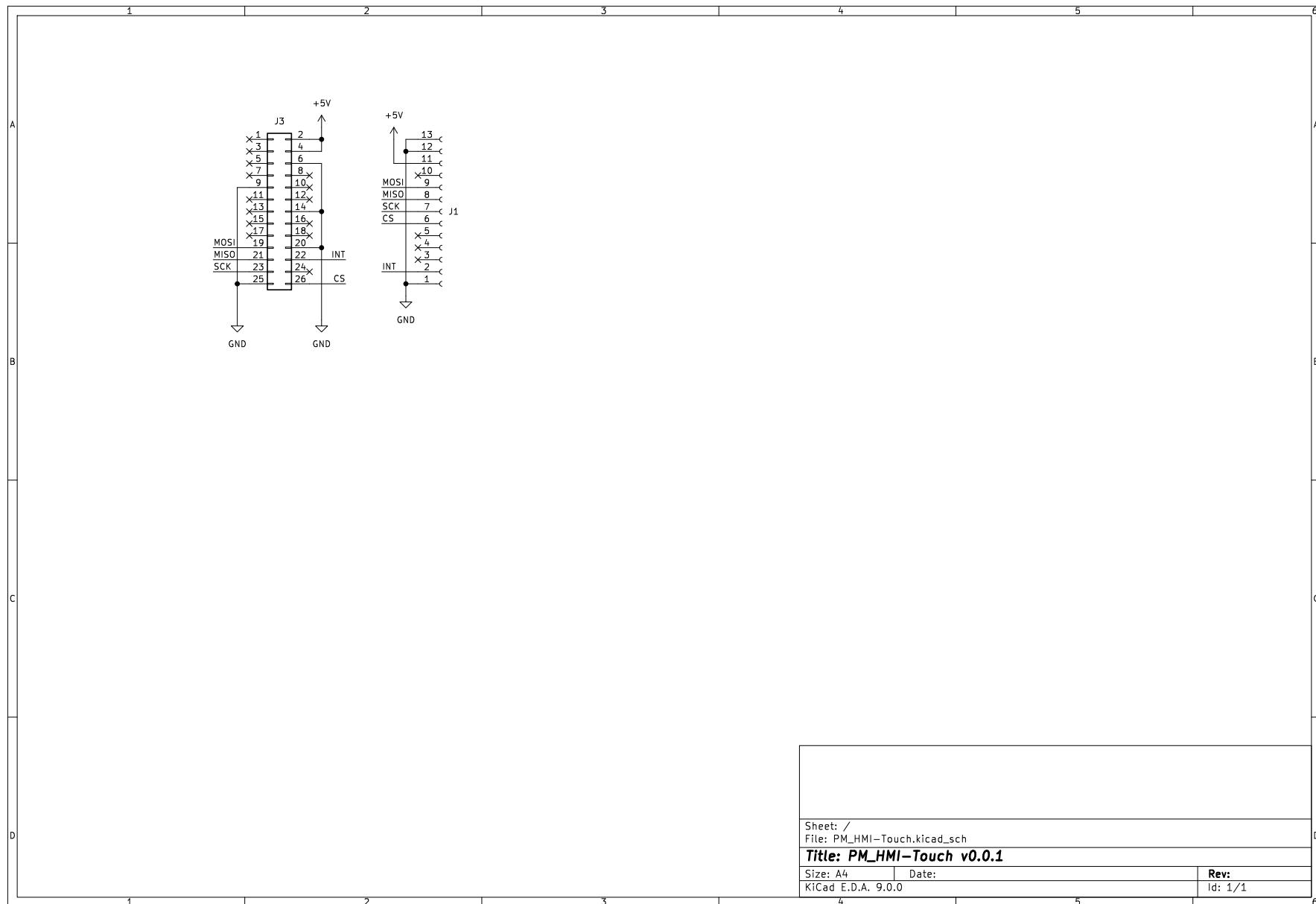


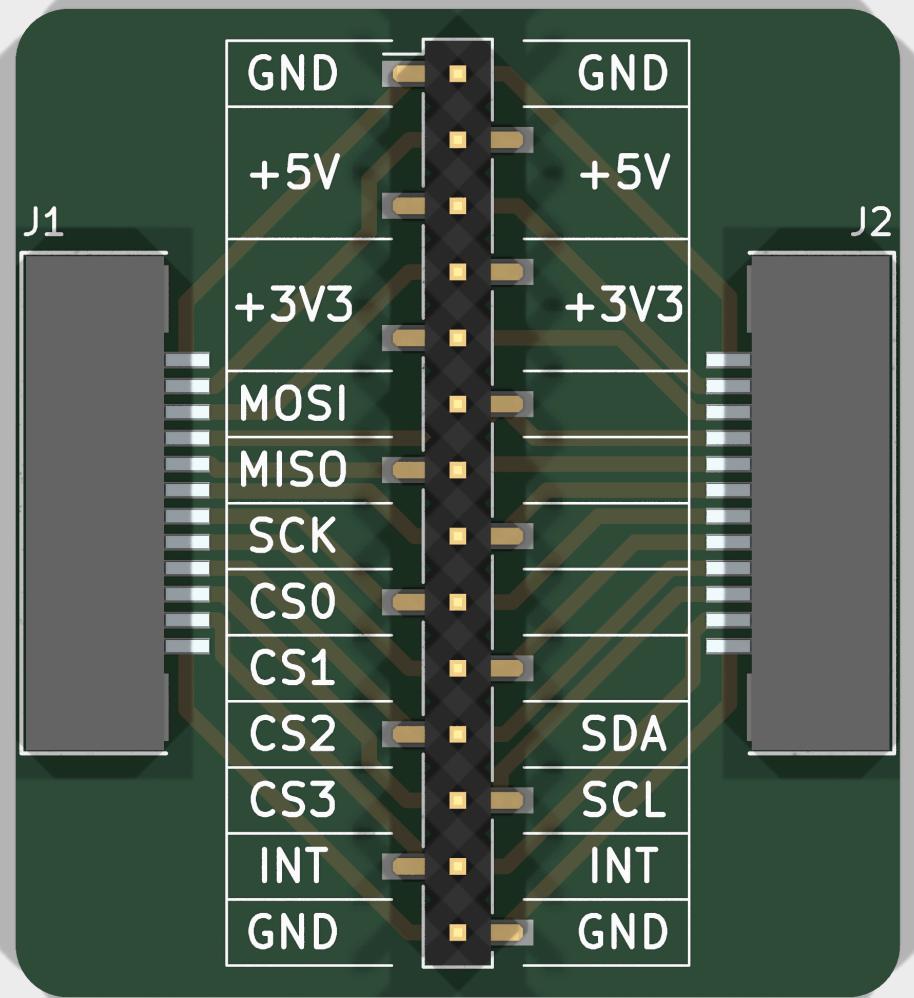
Рис. 59. Принципиальная электрическая схема платы PM_HMI-Touch

Обозначение	Количе- ство	part_ipn
J1	1	AFA07-S12FCC-00
J3	1	PinHeader_02x13_P2.54_THT_straight

Таблица 26. Перечень элементов платы PM_HMI-Touch

8.20. PM_DBG-FFC

Плата для упрощения отладки. Вставляется в разрыв кабеля FFC между платами. На плате только разъем для подключения осциллографа. Также есть две перемычки (+5V и +3.3V) для возможности измерения потребляемой мощности.



PM_DBG-FFC v0.0.2

Рис. 60. Внешний вид платы PM_DBG-FFC

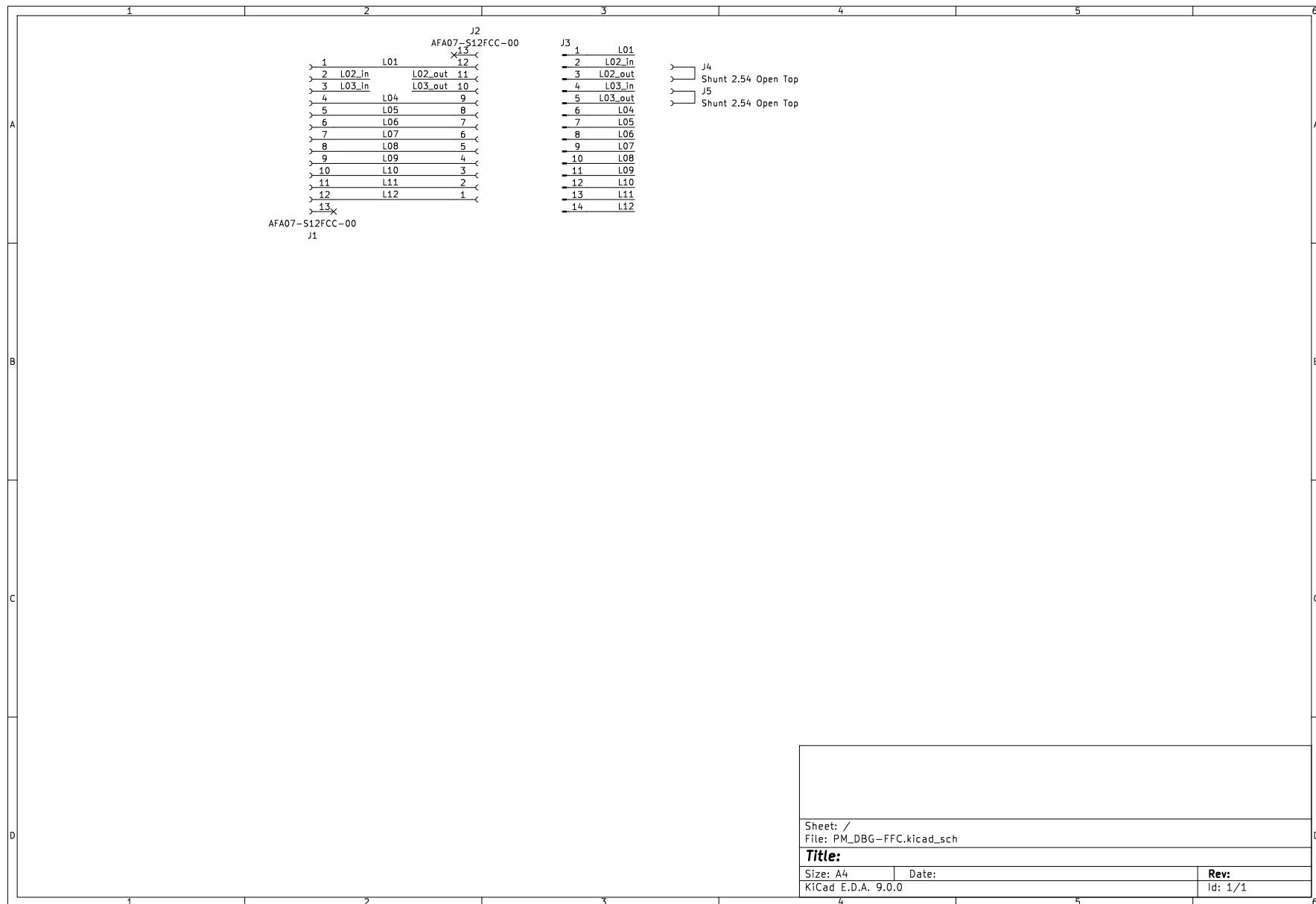


Рис. 61. Принципиальная электрическая схема платы PM_DBG-FFC

Обозначение	Количе- ство	part_ipn
J1, J2	2	AFA07-S12FCC-00
J3	1	PinHeader_01x14_P2.54_SMD_straight
J4, J5	2	Shunt 2.54 Open Top

Таблица 27. Перечень элементов платы PM_DBG-FFC

8.21. PMDBG-FFC20

Плата для упрощения отладки. Вставляется в разрыв кабеля FFC между платами. На плате только разъем для подключения осциллографа. Также есть две перемычки (+5V и +3.3V) для возможности измерения потребляемой мощности.

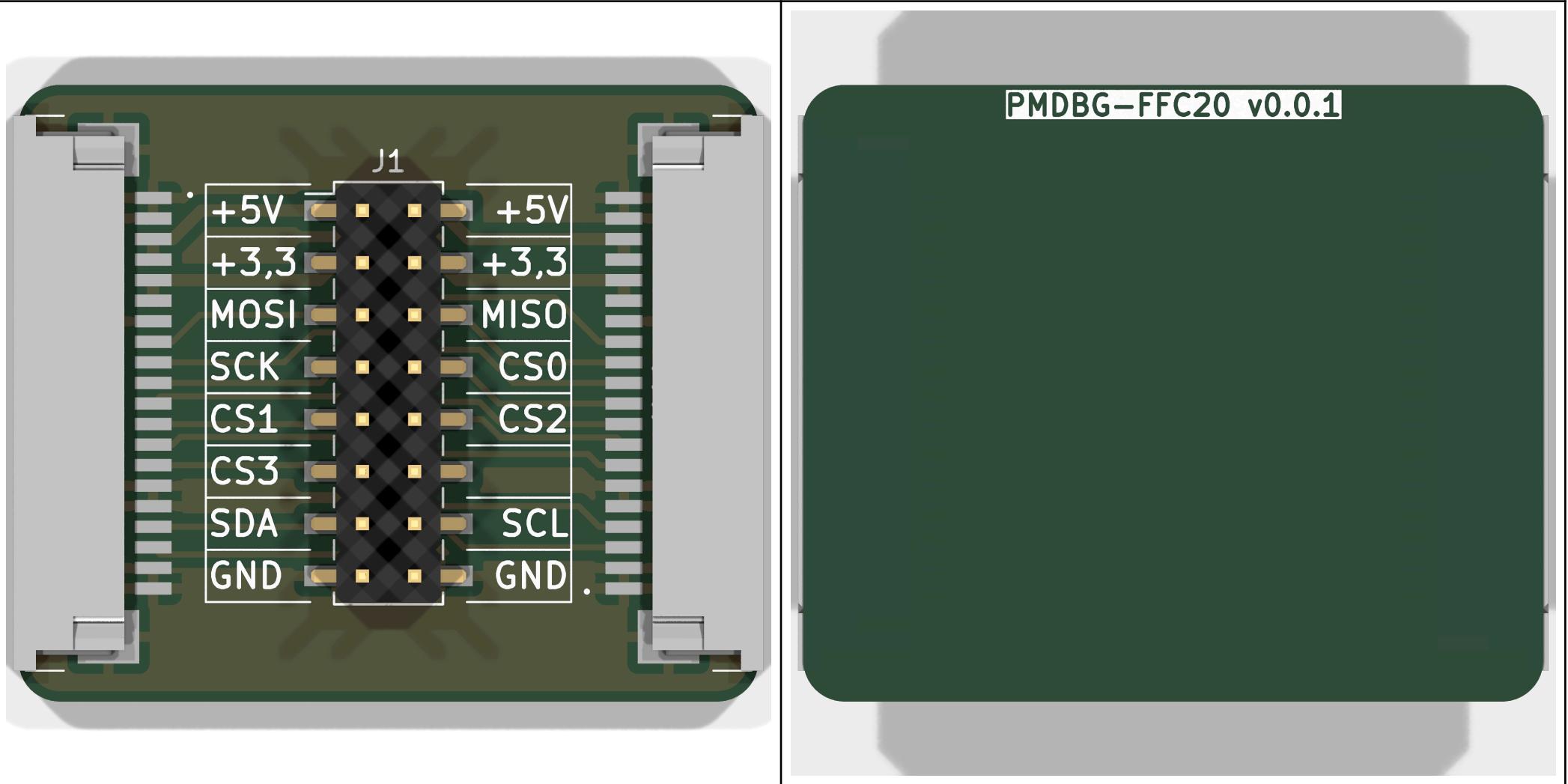


Рис. 62. Внешний вид платы PMDBG-FFC20

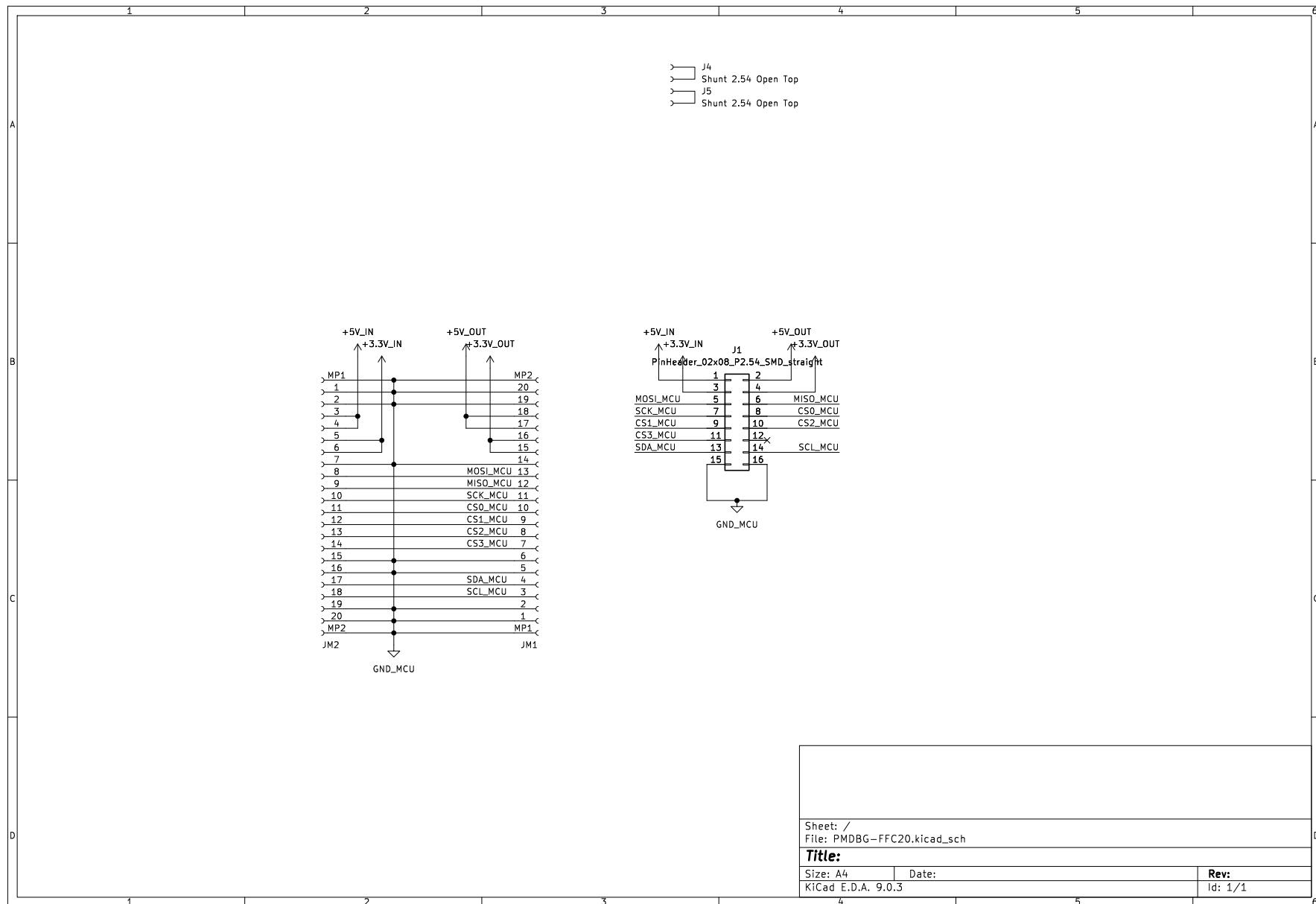


Рис. 63. Принципиальная электрическая схема платы PMDBG-FFC20

Обозначение	Количе- ство	part_ipn
J1	1	
J4, J5	2	Shunt 2.54 Open Top
JM1, JM2	2	AFA07-S20FCC-00

Таблица 28. Перечень элементов платы PMDBG-FFC20

9. Комбинирование плат в модули

10. Габаритные размеры плат

На рисунке 64 показаны габаритные размеры и отверстия для крепления основных плат. Плату можно крепить к корпусу двумя способами:

- используя 4 отверстия диаметром 3.2 мм
- используя 4 выступа по краям сверху и снизу платы

На рисунке 65 показаны габаритные размеры плат светодиодов PM-LED_10 и PM-LED_18. Плата крепится к основной плате с помощью стоек диаметром 2 мм.

На рисунке 66 показаны габаритные размеры платы микроконтроллера PMMCUESP32C3. Плата крепится к основной плате с помощью стоек диаметром 2 мм.

TODO - нанести диаметры отверстий

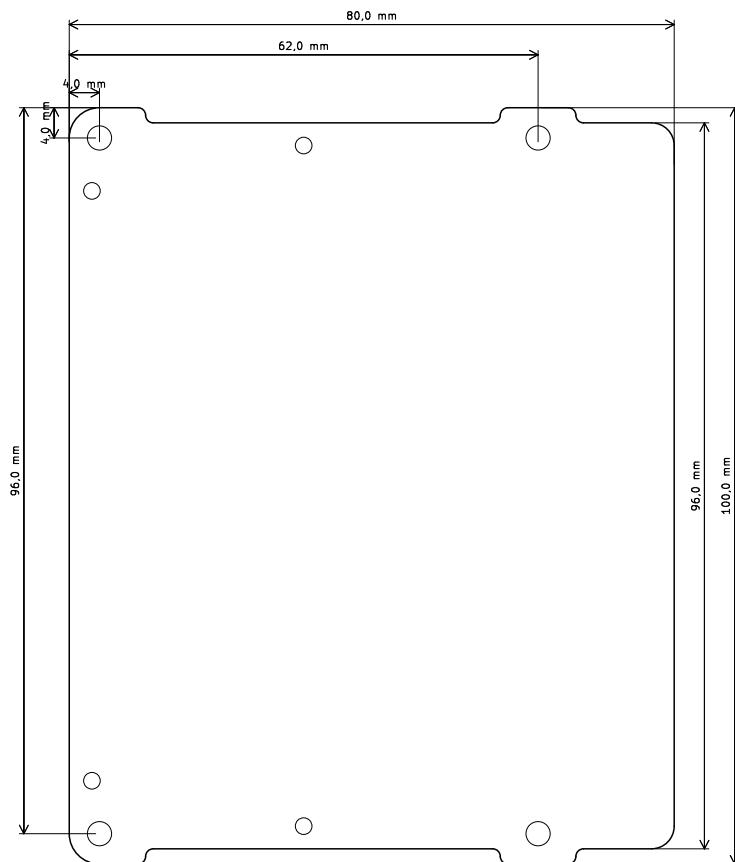


Рис. 64. Размеры основной печатной платы

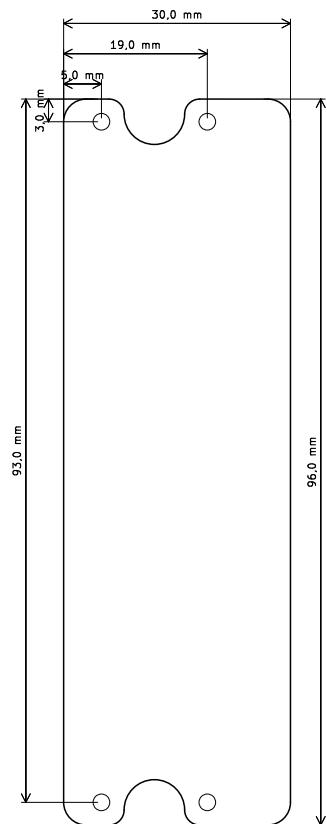


Рис. 65. Размеры платы светодиодов

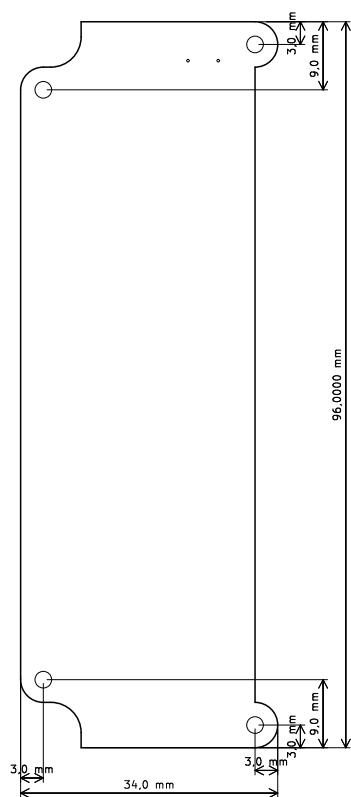


Рис. 66. Размеры платы микроконтроллера

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1] Anant Kamath, «Signal and Power Isolation Considerations for Compact, Efficient Analog Input Modules», окт. 2020. [Онлайн]. Доступно на: <https://www.ti.com/lit/wp/slla529/slla529.pdf>
- [2] Anant Kamath, «How to use isolation to improve ESD, EFT and surge immunity in industrial systems», сен. 2017. [Онлайн]. Доступно на: <https://www.ti.com/lit/an/slyt725/slyt725.pdf>
- [3] Texas Instruments, «How to Isolate Signal and Power for an RS-485 System», май 2021. [Онлайн]. Доступно на: <https://www.ti.com/lit/ab/slla416c/slla416c.pdf>
- [4] Texas Instruments, «Isolated Power Topologies for PLC I/O Modules and Other Low-Power Applications», ноя. 2022. [Онлайн]. Доступно на: <https://www.ti.com/lit/po/sloa327a/sloa327a.pdf>
- [5] Steve Corrigan, «Controller Area Network Physical Layer Requirements», янв. 2008. [Онлайн]. Доступно на: <https://www.ti.com/lit/an/slla270/slla270.pdf>
- [6] Shanghai Chipanalog Microelectronics Co., «CA-IS309x 5kVRMS Isolated RS-485 Transceivers with Integrated DC-DC Converter», 2020. [Онлайн]. Доступно на: <https://e.chipanalog.com/Public/Uploads/uploadfile/files/20250305/CAIS30923098datasheetVersion1.13en20241216.pdf>
- [7] Shanghai Chipanalog Microelectronics Co., «CA-IS398x Isolated Octal Industrial Digital Input», 2020. [Онлайн]. Доступно на: <https://e.chipanalog.com/Public/Uploads/uploadfile/files/20240611/CAIS398XdatasheetVersion1.09en.pdf>
- [8] Espressif Systems, «ESP32-C3-WROOM-02/02U», 2024. [Онлайн]. Доступно на: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-c3-wroom-02_datasheet_en.pdf
- [9] Аль-Тибби Висам и Поздняков Александр, «Подключение инкрементного энкодера к ПЛИК». [Онлайн]. Доступно на: <https://www.cta.ru/articles/cta/oborudovanie/datchiki/124620/>
- [10] Analog Devices, «Isolated 4-Channel, Thermocouple/RTD Temperature Measurement System with 0.5°C Accuracy». [Онлайн]. Доступно на: <https://www.analog.com/en/resources/reference-designs/circuits-from-the-lab/cn0287.html>
- [11] «ГОСТ 8.585-2001. Термопары. Номинальные статические характеристики преобразования».
- [12] Renesas, «Thermocouple Cold Junction Compensation». [Онлайн]. Доступно на: <https://www.renesas.com/en/document/apn/cm-389-thermocouple-cold-junction-compensation>
- [13] Analog Devices, «Precision Weigh Scale Design Using the AD7190 24-Bit Sigma-Delta ADC with Internal PGA». [Онлайн]. Доступно на: <https://www.analog.com/en/resources/reference-designs/circuits-from-the-lab/cn0102.html#rd-overview>
- [14] Silicon Labs, «AC LINE MONITORING USING THE Si890X FAMILY OF ISOLATED ADCS». [Онлайн]. Доступно на: <https://www.all-electronics.de/wp-content/uploads/migrated/article-pdf/123772/an638.pdf>