

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 | 10 |
| 6. | Протоколы обмена данными между платами внутри модуля | 11 |
| 6.1. | Протокол SPI | 11 |
| 6.2. | Протокол I ² C | 11 |
| 7. | Основные микроэлектронные компоненты | 13 |
| 7.1. | AD7193 - 24-разрядный Σ - Δ АЦП | 13 |
| 7.2. | ADS8688 | 13 |
| 7.3. | B2405 - DC / DC преобразователи 24 В / 5 В | 13 |
| 7.4. | CA-IS3098W - приемопередатчик интерфейса RS-485 | 14 |
| 7.5. | CA-IS3105W - изоляция питания | 14 |
| 7.6. | CA-IS3741HW - изоляция SPI | 14 |
| 7.7. | CA-IS3980S - изоляция цифровых входов | 14 |
| 7.8. | DS3231 - часы реального времени | 16 |
| 7.9. | MCP23S17 - 16-битный расширитель входов / выходов | 16 |
| 7.10. | TBD62783AFG - матрица из 8 DMOS транзисторов | 16 |
| 7.11. | Светодиоды серии XL-1606 | 17 |
| 8. | Описание плат | 18 |
| 8.1. | PM_CPU-RP - контроллер на базе Raspberry Pi | 19 |
| 8.2. | PM_CPU-ESP32_C3 | 23 |
| 8.3. | PM MCU-ESP32_C3 - микроконтроллер ESP32 | 24 |
| 8.4. | PM_LED-10 - 10 светодиодов | 29 |
| 8.5. | PM_LED-18 - 18 светодиодов | 33 |
| 8.6. | PM_CNV-DI16_sink - 16 дискретных входов | 37 |
| 8.7. | PM_CNV-DQ16_src - 16 дискретных выходов | 42 |
| 8.8. | PM_CNV-RQ8 - 8 релейных выходов | 46 |
| 8.9. | PM_CNV-AI4_RTD - 4 аналоговых входа (термосопротивления) | 50 |
| 8.10. | PM_CNV-AI4_TC - 4 аналоговых входа (термопары) | 51 |
| 8.11. | PM_CNV-AI4_W - 4 аналоговых входа (тензодатчики) | 52 |
| 8.12. | PM_CNV-AI8_IU - 8 аналоговых входов (0..20 мА или 0..10 В) | 56 |
| 8.13. | PM_CNV-AQ - аналоговый выход | 60 |
| 8.14. | PM_HMI-Keyboard | 61 |
| 8.15. | PM_HMI-Touch | 65 |

| | |
|--|----|
| 8.16. PM_DBG-FFC | 69 |
| 9. Комбинирование плат в модули | 73 |
| 10. Габаритные размеры плат | 74 |
| Список использованных источников | 76 |

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

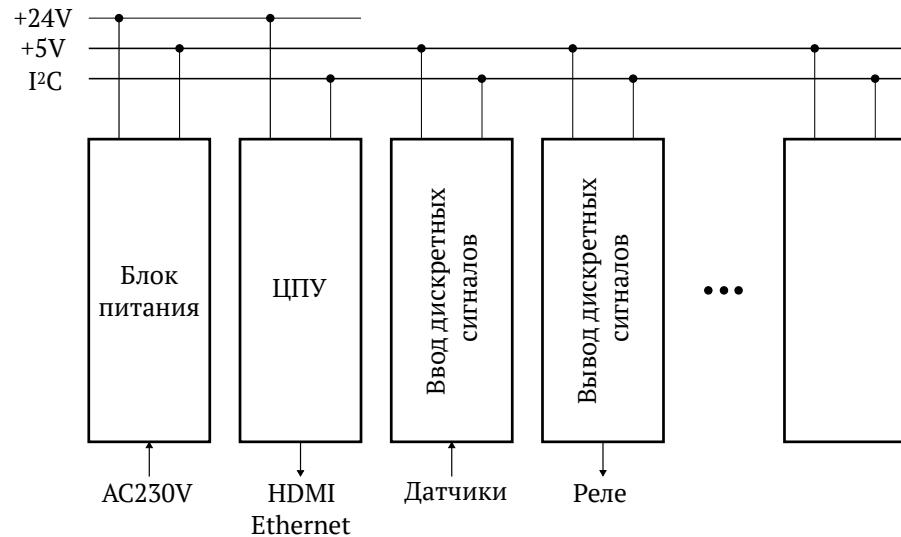


Рис. 1. Концепция модульной системы

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.

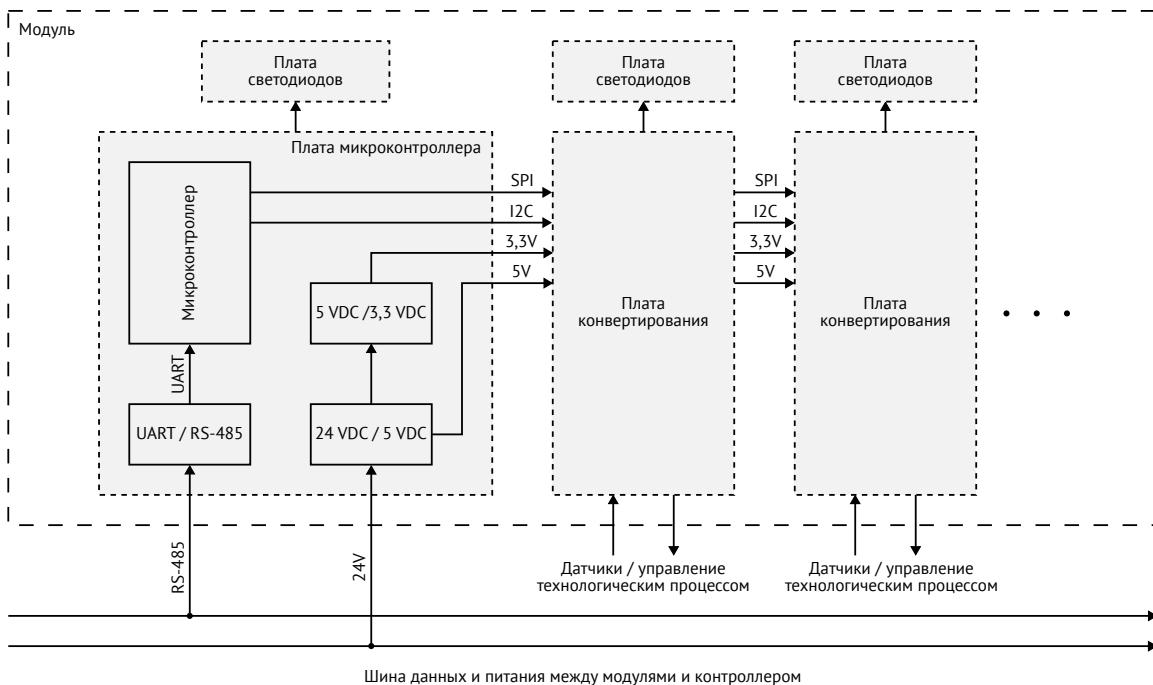


Рис. 2. Функциональная схема модуля ввода / вывода

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, PM_CNV-DI16_sink или PM_CNV-RQ8) такая микросхема одна. На более «сложных» может быть больше. Например, на плате PM_CNV-AI4_TC таких микросхем 3.
- Мощностью, потребляемой компонентами. Например, на плате PM_CNV-RQ8 установлены реле, которые потребляют значительный ток, поэтому количество таких плат ограничено 2.

Например, к плате PM_CNV-DI16_sink 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.

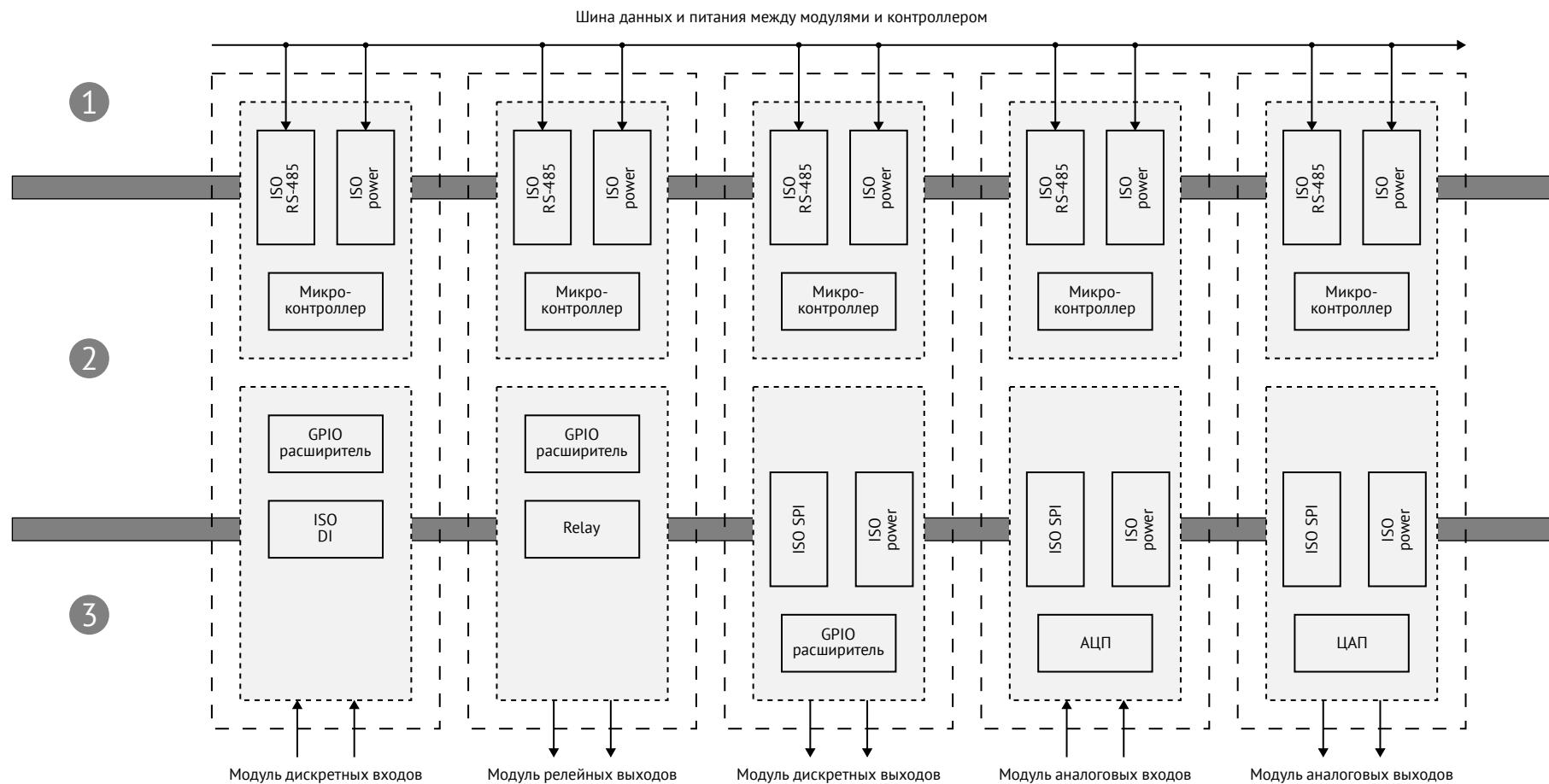


Рис. 3. Области гальванической изоляции

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

RS-485

Терминаторы

Выбор скорости - скрины с логанализатора

5.1.1. Формула расчета времени передачи для Raspberry.

TODO - задержка передачи с логанализатора.

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

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.
- stop_bits - 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]

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 PM_MCU-ESP32_C3 позволяет подключать платы конвертирования по обоим протоколам.

6.1. Протокол SPI

За основной протокол связи между платами внутри модуля принят SPI.

На рисунке 4 приведена распиновка разъема FFC для подключения платы микроконтроллера к платам конвертирования.

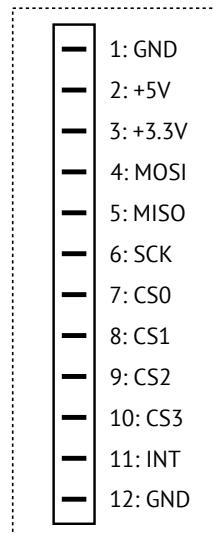


Рис. 4. Распиновка коннектора протокола SPI

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 5 приведена распиновка разъема FFC для подключения платы микроконтроллера к платам конвертирования.

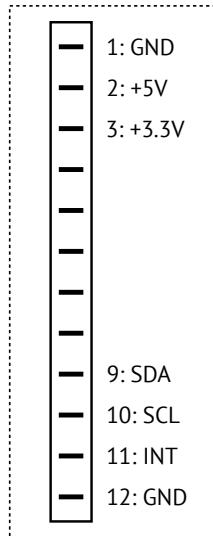


Рис. 5. Распиновка коннектора протокола I²C

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.

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 6.

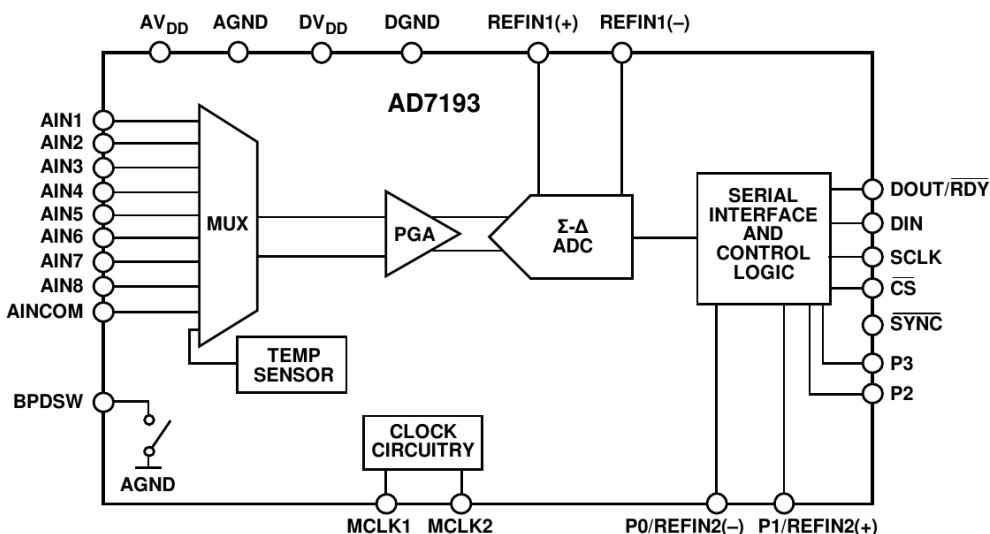


Рис. 6. Функциональная схема АЦП AD7193

Используется в платах:

- PM_CNV-AI4_W
- PM_CNV-AI4_RTD
- PM_CNV-AI4_TC

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:

- PM MCU-ESP32_C3

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 [5] 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 7 показана функциональная схема передатчика.

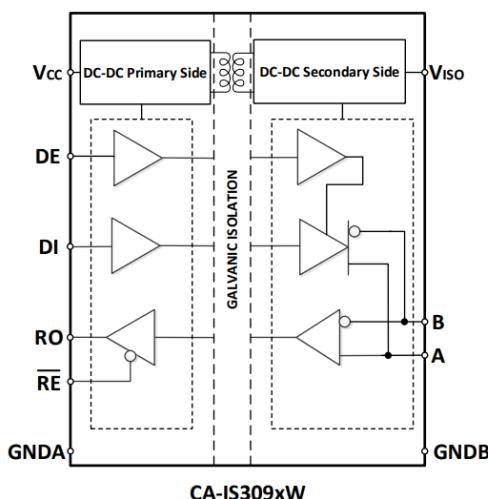


Рис. 7. Функциональная схема передатчика RS-485

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
- PM MCU-ESP32_C3

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 [6]. Функциональная схема показана на рисунке 8.

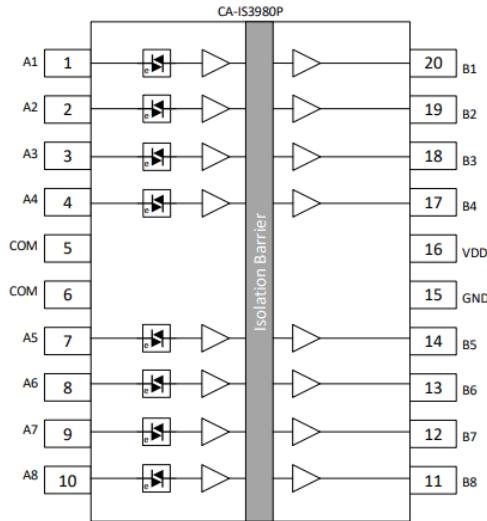


Рис. 8. Функциональная схема изолятора цифровых входов

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 9 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.

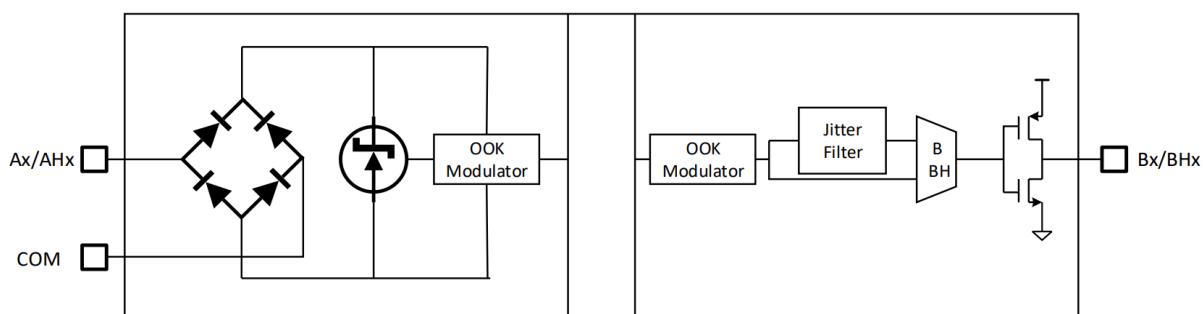


Рис. 9. Упрощенная схема для отдельного канала

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:

- PM_CNV-DI16_sink.

7.8. DS3231 - часы реального времени

7.9. MCP23S17 - 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. Есть аналогичная версия с поддержкой протокола I²C.
- Выходы с прерываниями по событию срабатывания входов.

Функциональная схема показана на рисунке 10.

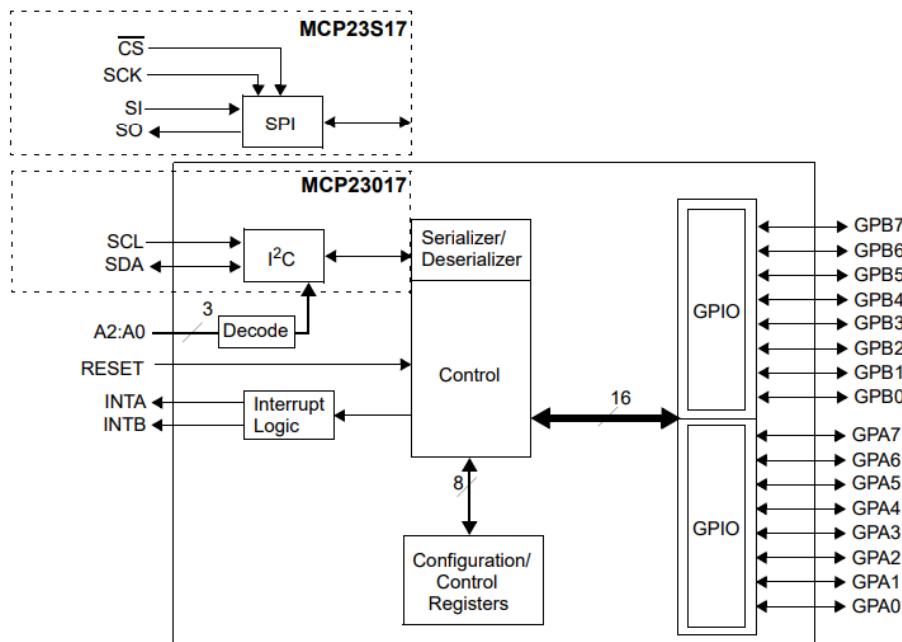


Рис. 10. Упрощенная схема для отдельного канала

Используется в платах:

- PM_CNV-DI16_sink
- PM_CNV-DQ16_src
- PM_CNV-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 11 показана эквивалентная схема для отдельного канала.

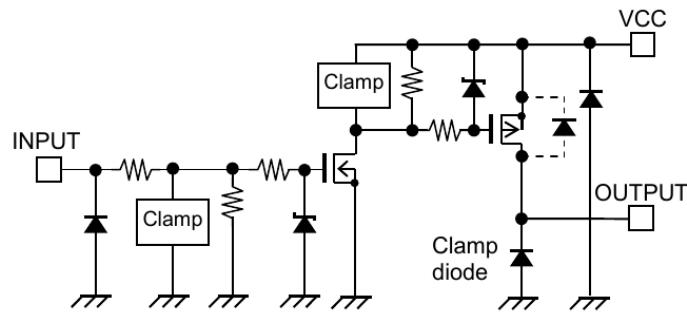


Рис. 11. Эквивалентная схема для отдельного канала

Используется в платах:

- PM_CNV-DQ16_src
- PM_CNV-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

| ЦПУ | |
|---|---|
| <u>PM_CPU-RP</u> | ЦПУ на базе мини-компьютера Raspberry Pi или совместимого с ним |
| <u>PM_CPU-ESP32</u> | ЦПУ на базе микроконтроллера ESP32 |
| Платы микроконтроллеров | |
| <u>PM MCU-ESP32_C3</u> | Плата на базе микроконтроллера ES32-C3 для работы плат конвертирования и передачи данных на ЦПУ |
| Платы светодиодов | |
| <u>PM_LED-10</u> | Плата на 10 светодиодов |
| <u>PM_LED-18</u> | Плата на 18 светодиодов |
| Платы конвертирования цифровых и электрических сигналов | |
| <u>PM_CNV-DI16_sink</u> | Подключение 16 дискретных входов постоянного напряжения |
| <u>PM_CNV-DQ16_src</u> | Подключение 16 дискретных выходов постоянного напряжения |
| <u>PM_CNV-RQ8</u> | Подключение 8 релейных выходов |
| <u>PM_CNV-AI4_RTD</u> | Подключение 4 термосопротивлений |
| <u>PM_CNV-AI4_TC</u> | Подключение 4 термопар |
| <u>PM_CNV-AI4_W</u> | Подключение 4 тензодатчиков |
| <u>PM_CNV-AI8_IU</u> | Подключение 8 датчиков 4 .. 20 мА или 0 .. 10 В |
| <u>PM_CNV-AQ</u> | Подключение аналоговых выходов |
| Платы для создания интерфейса оператора | |
| <u>PM_HMI-Keyboard</u> | Клавиатура 7x7 |
| <u>PM_HMI-Touch</u> | Подключение touch-контроллера дисплея |
| Платы для отладки | |
| <u>PM_DBG-FFC</u> | Для подключения осциллографа в разрыв кабеля FFC |

Таблица 2. 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.

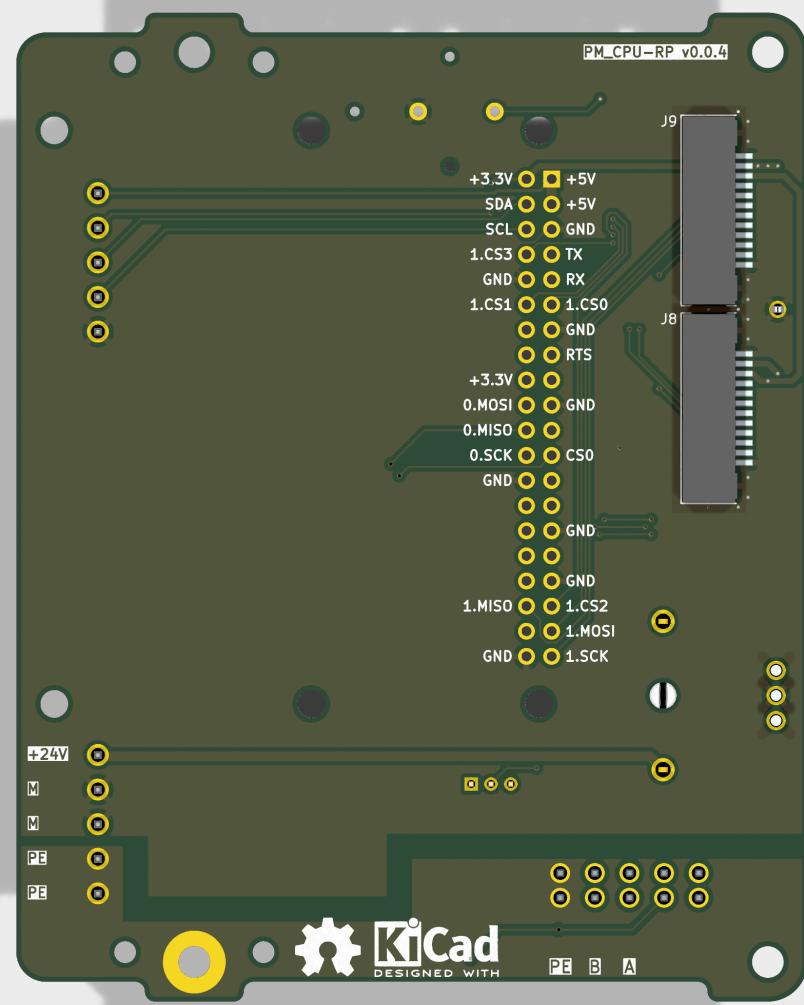
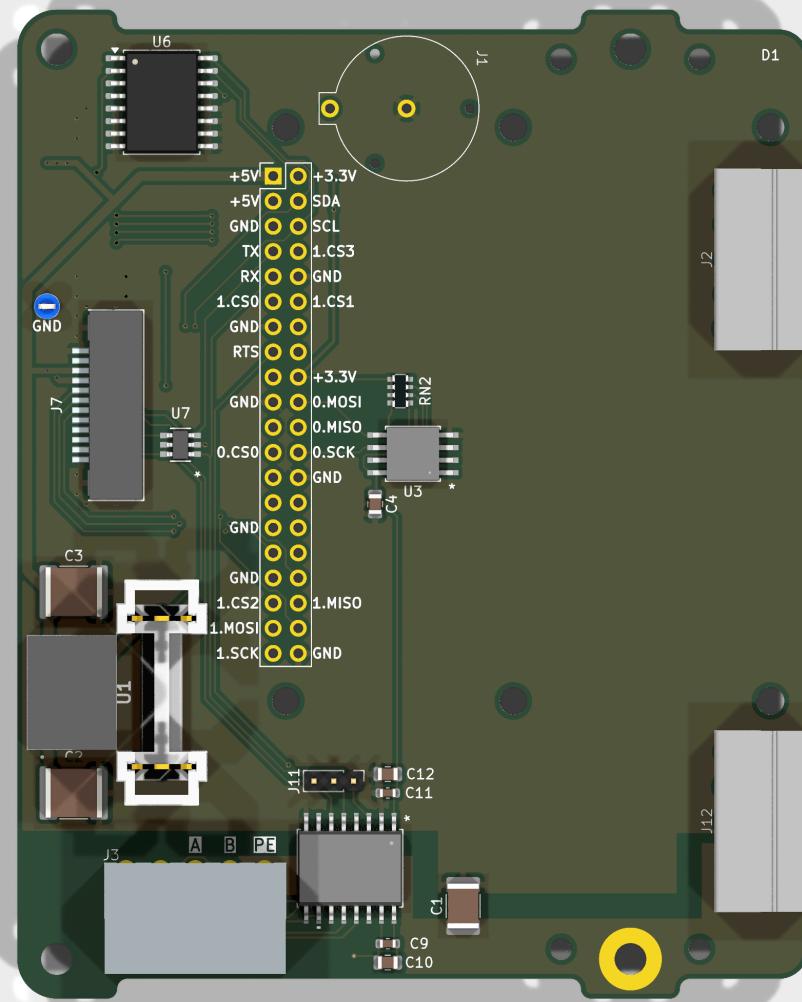


Рис. 12. Внешний вид платы PM_CPU-RP

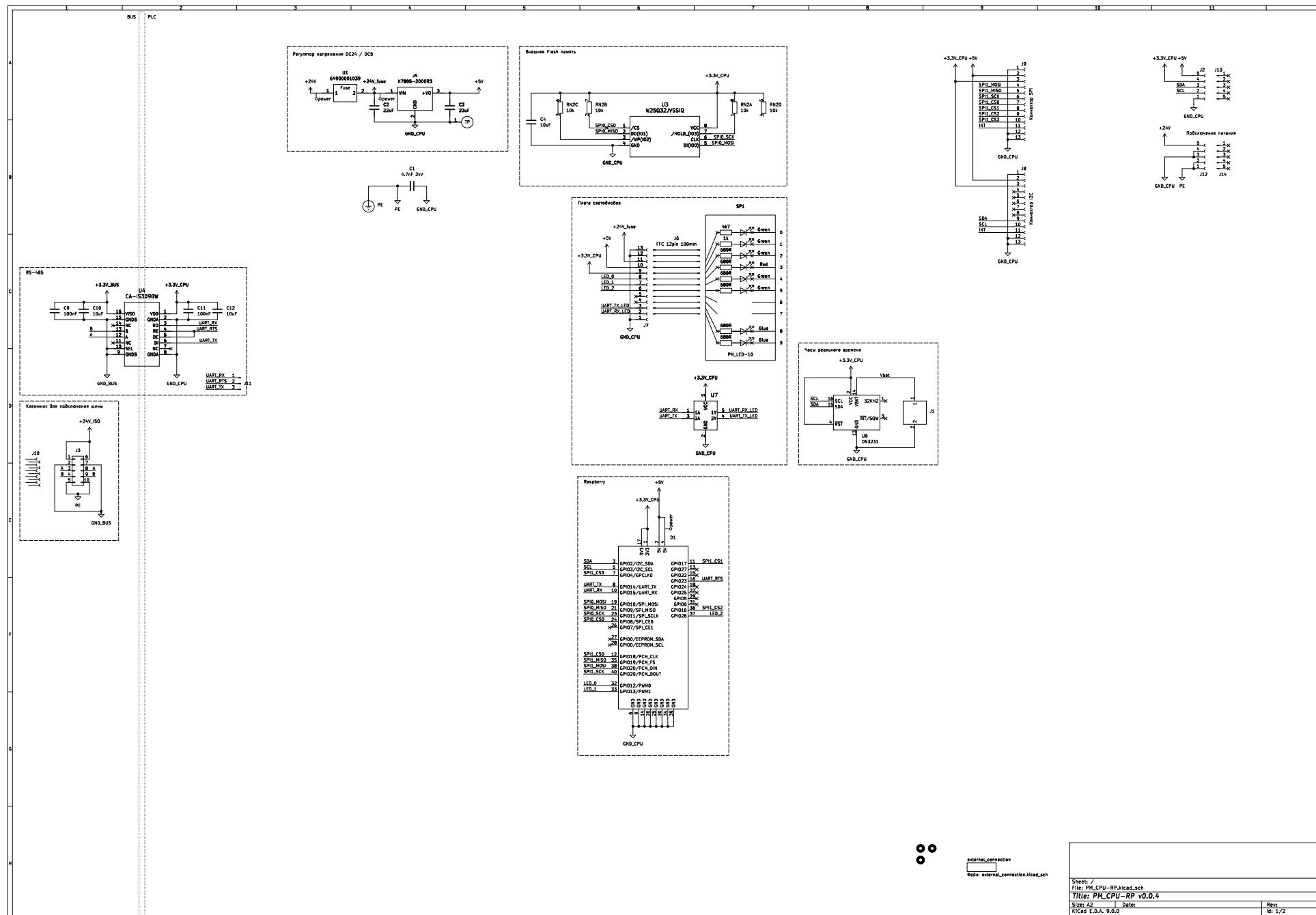


Рис. 13. Принципиальная электрическая схема платы PM_CPU-RP

| Обозначение | Количе- ство | part_ipn |
|------------------------|-------------------------|------------------------------------|
| C1 | 1 | C_4.7nF_2kV_1812 |
| C2, C3 | 2 | C_22uF_50V_2220 |
| 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, J12 | 2 | 15EDGRC-3.5-05P |
| J3 | 1 | 15EDGRHC-THR-3.5-10P |
| J4 | 1 | K7805-2000R3 |
| 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, J14 | 2 | 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 3. Перечень элементов платы PM_CPU-RP

8.2. PM_CPU-ESP32_C3

8.3. PM_MCU-ESP32_C3 - микроконтроллер ESP32

Плата с микроконтроллером ESP32-C3 и регулятором напряжения.

Функциональная схема платы представлена на рисунке 14.

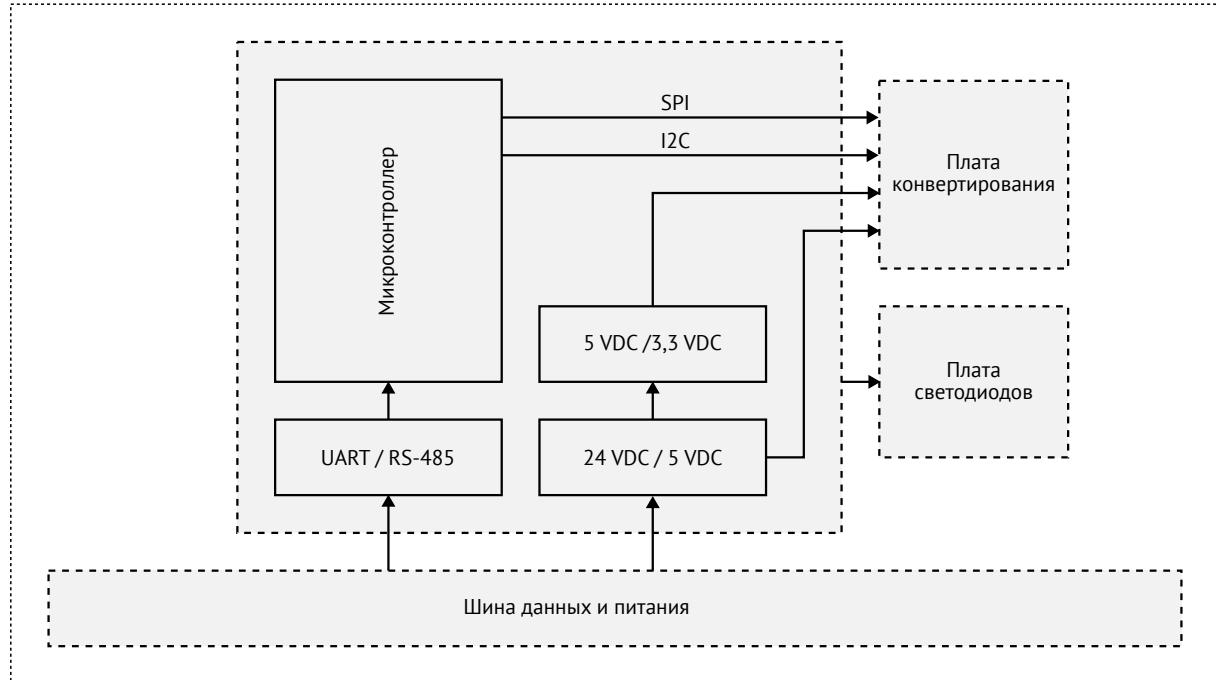


Рис. 14. Функциональная схема платы

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 [7]. 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).

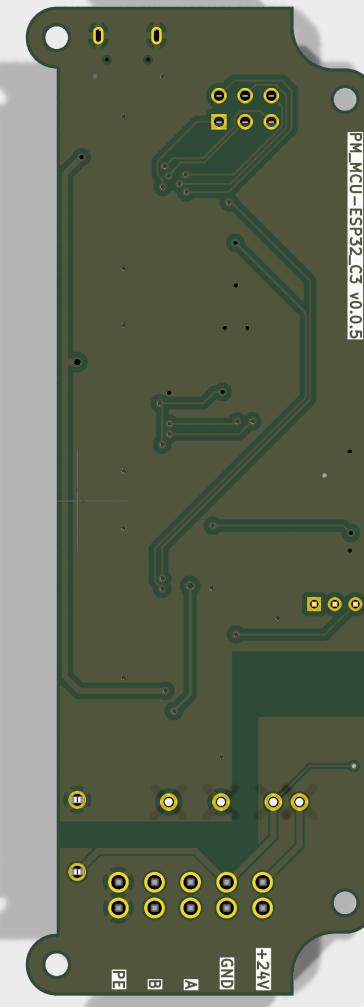
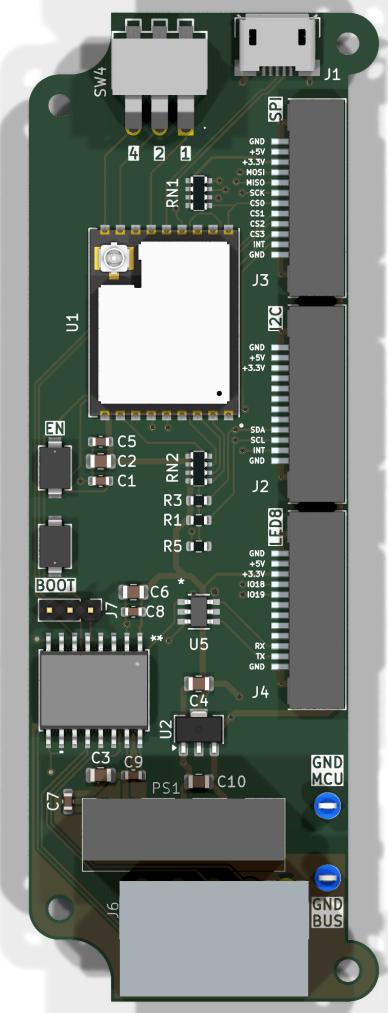


Рис. 15. Внешний вид платы PM_MCU-ESP32_C3

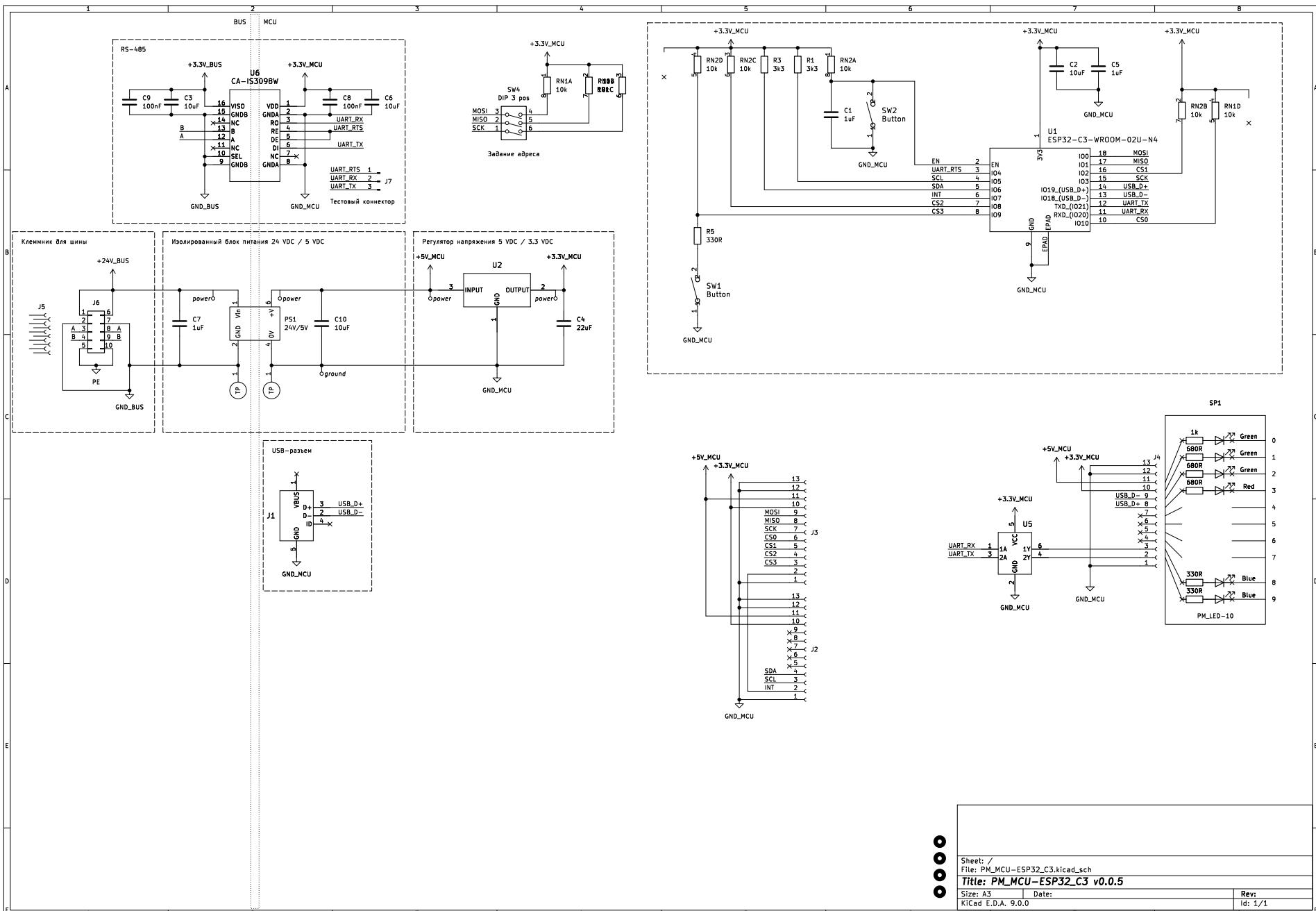


Рис. 16. Принципиальная электрическая схема платы PM_MCU-ESP32_C3

| Обозначение | Количе- ство | part_ipn |
|--------------------|-------------------------|------------------------------------|
| C1, C5 | 2 | C_1uF_16V_0603_MLCC-X7R |
| C2, C3, C6, C10 | 4 | C_10uF_16V_0805_MLCC-X5R |
| 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 |
| J2, J3, J4 | 3 | AFA07-S12FCC-00 |
| J5 | 1 | 15EDGKNH-3.5-10P |
| J6 | 1 | 15EDGRHC-THR-3.5-10P |
| J7 | 1 | PinHeader_01x03_P2.00_THT_straight |
| 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 | 2 | 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 4. Перечень элементов платы PM MCU-ESP32_C3

8.4. 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.

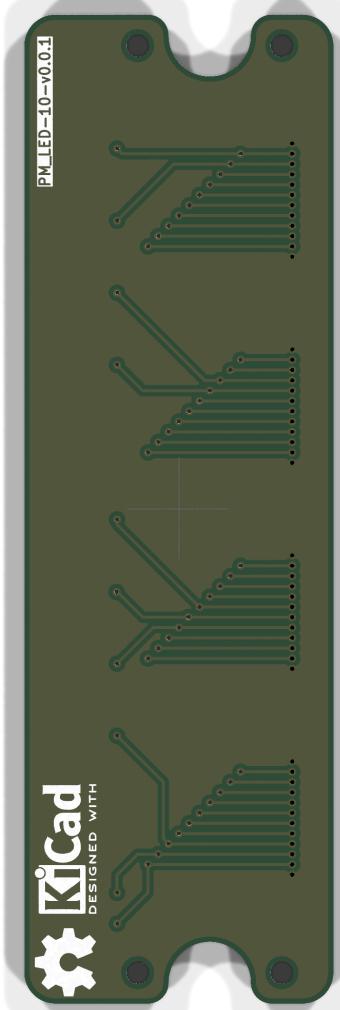
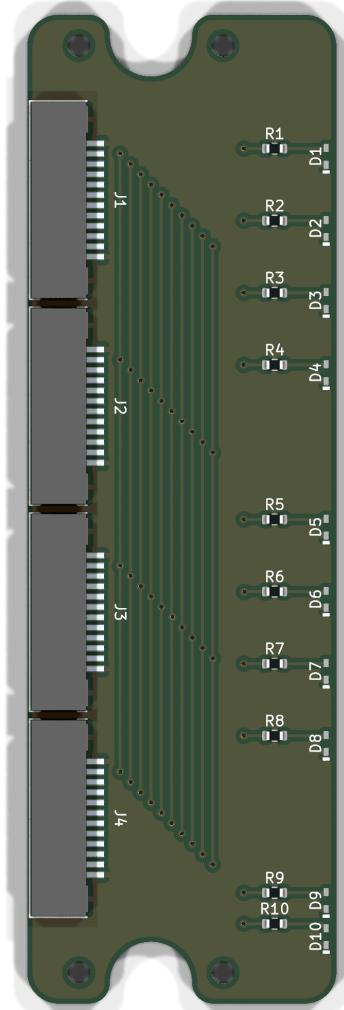


Рис. 17. Внешний вид платы PM_LED-10

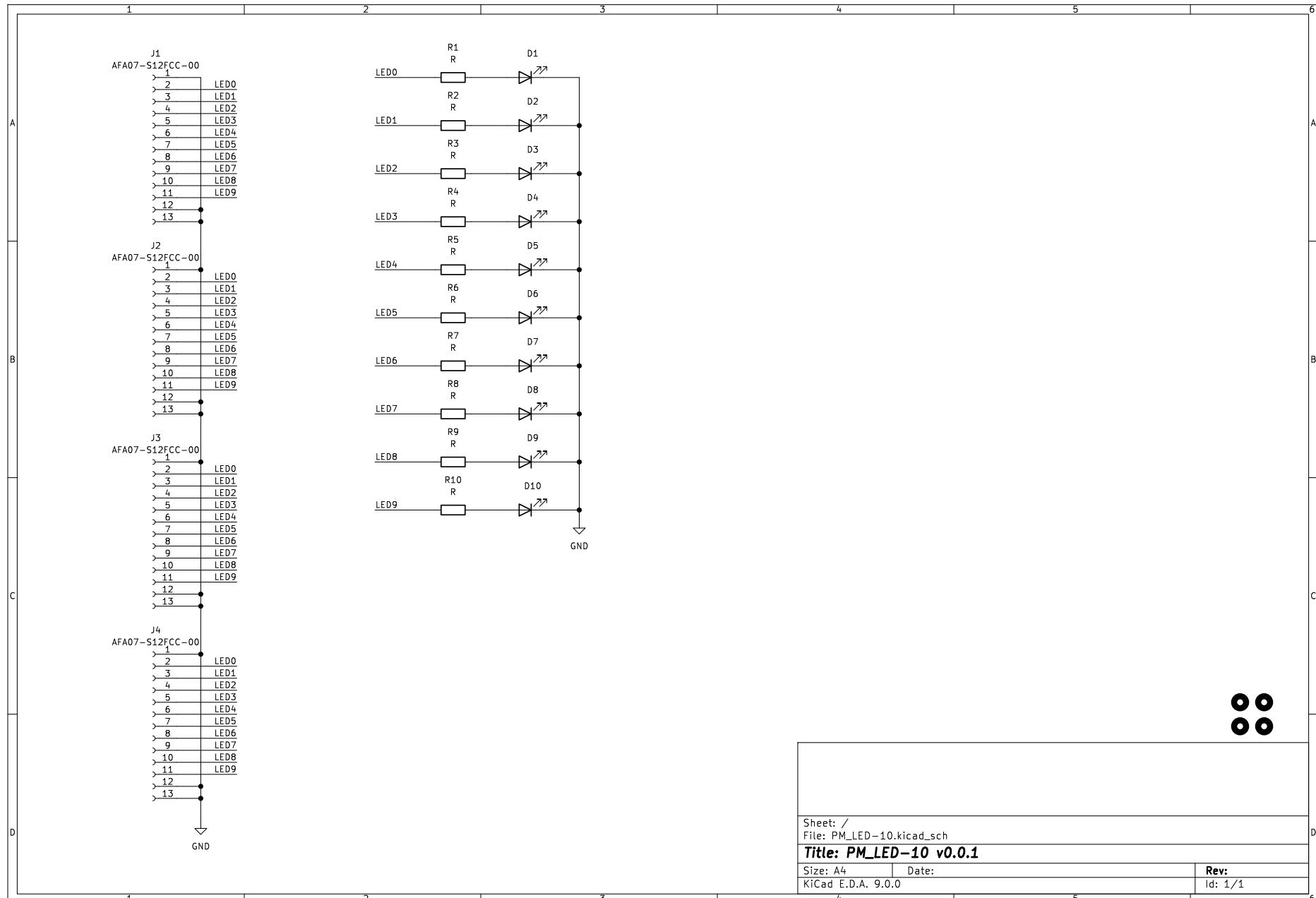


Рис. 18. Принципиальная электрическая схема платы PM_LED-10

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

Таблица 5. Перечень элементов платы PM_LED-10

8.5. 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

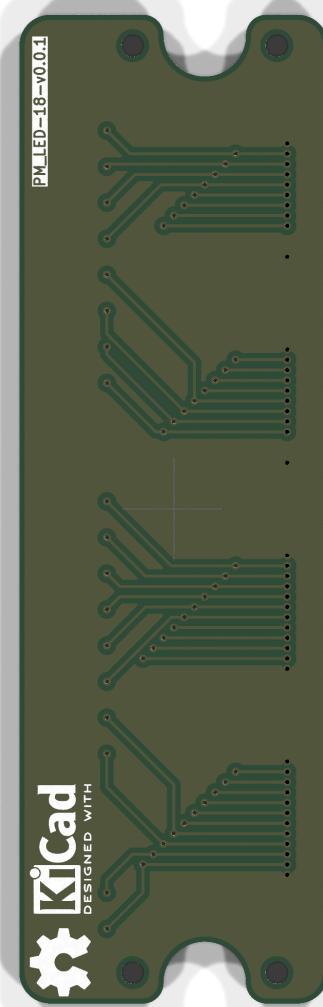
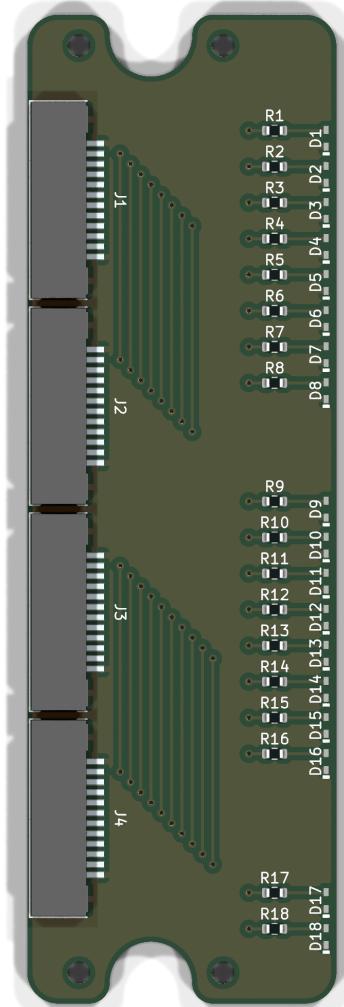


Рис. 19. Внешний вид платы PM_LED-18

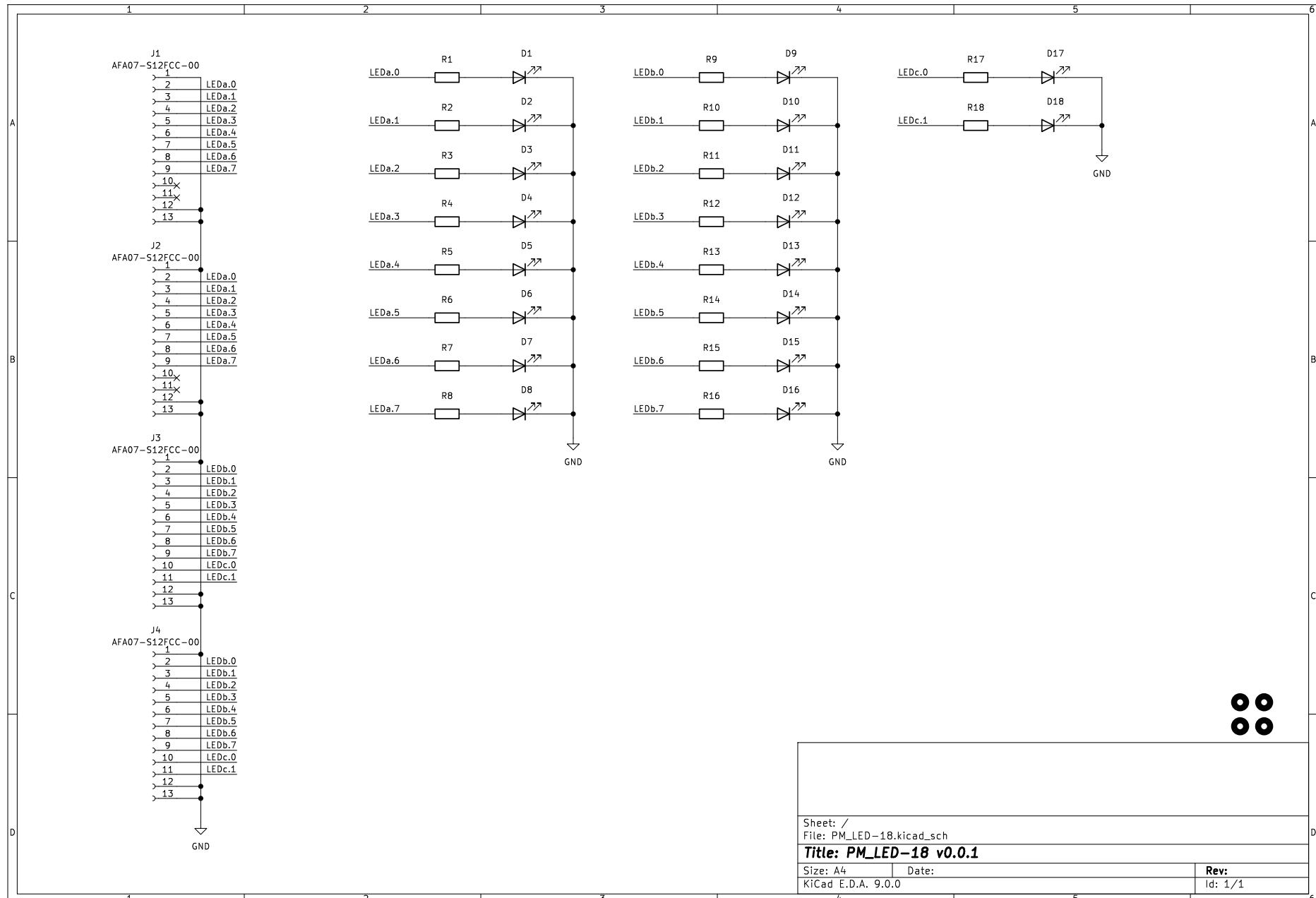


Рис. 20. Принципиальная электрическая схема платы PM_LED-18

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

Таблица 6. Перечень элементов платы PM_LED-18

8.6. PM_CNV-DI16_sink - 16 дискретных входов

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 21.

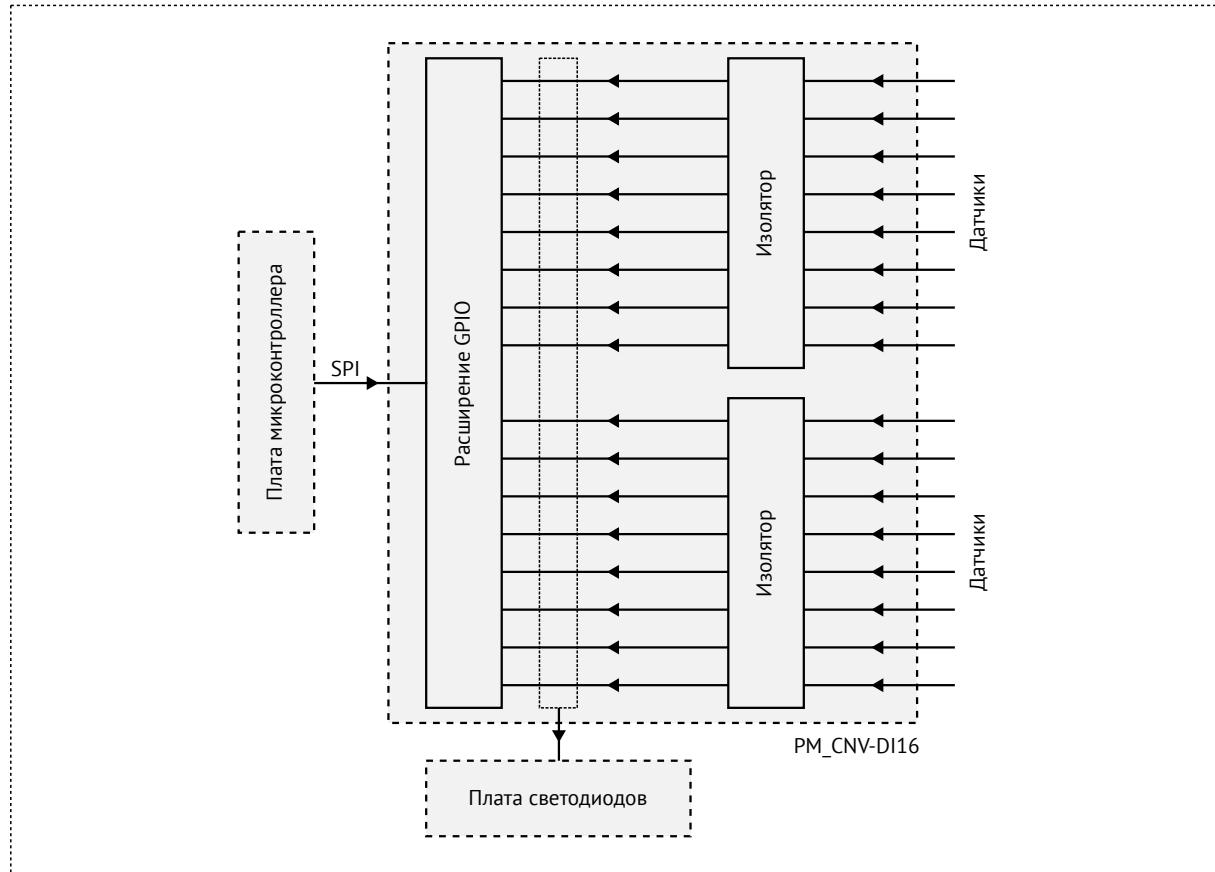


Рис. 21. Функциональная схема платы

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 22.

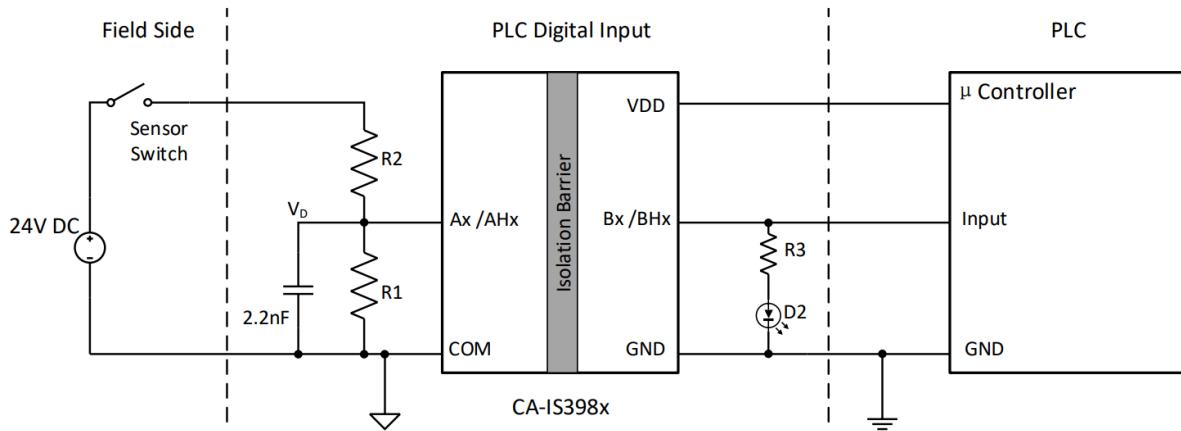


Рис. 22. Схема подключения отдельного канала

Номиналы выбираются исходя из напряжения и обеспечения требуемой характеристики. Рекомендуемые значения сопротивлений для напряжения 24 В приведены в таблице 7. 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 7. 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 PM MCU-ESP32 C3 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.

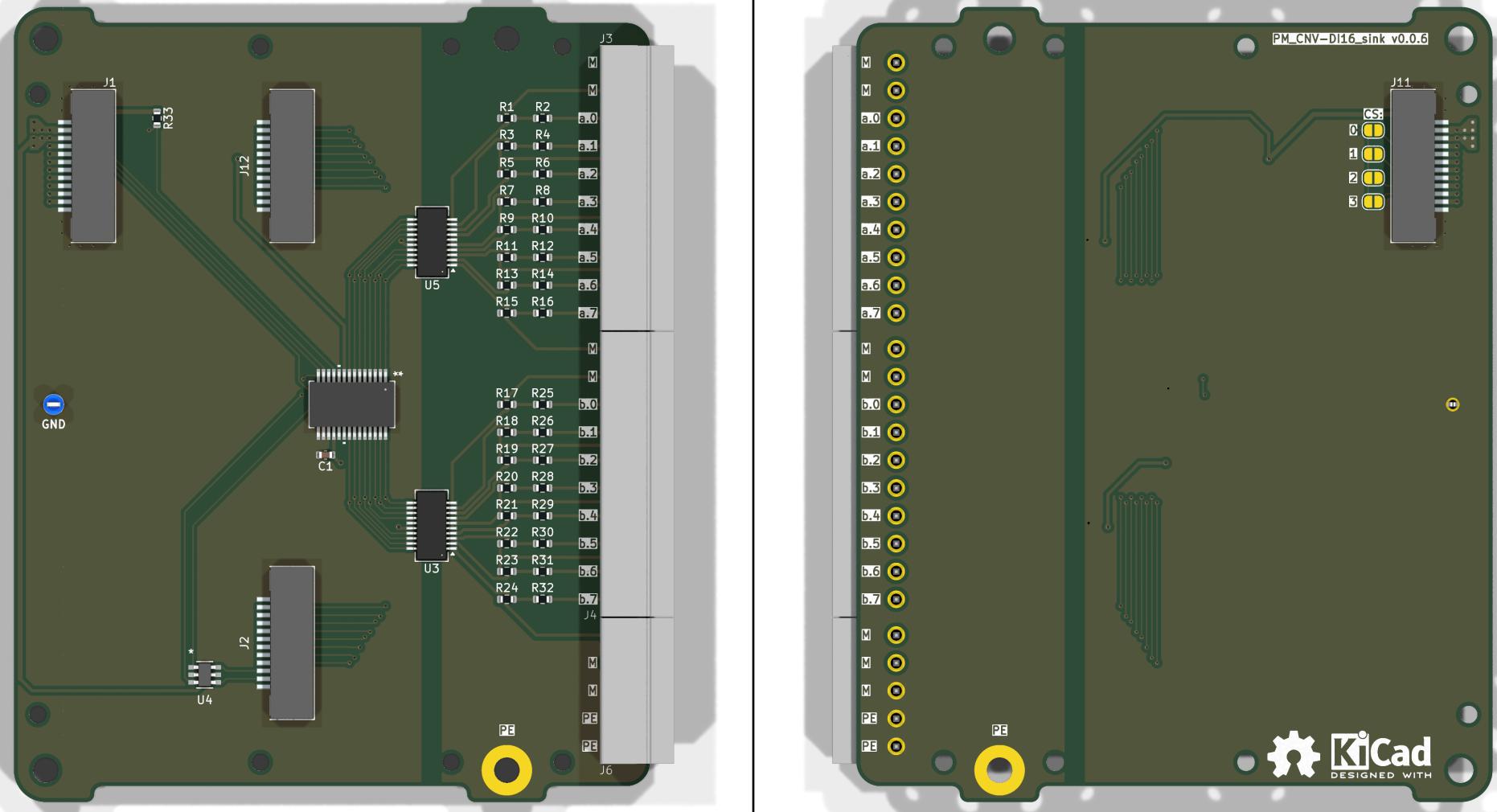


Рис. 23. Внешний вид платы PM_CNV-DI16_sink

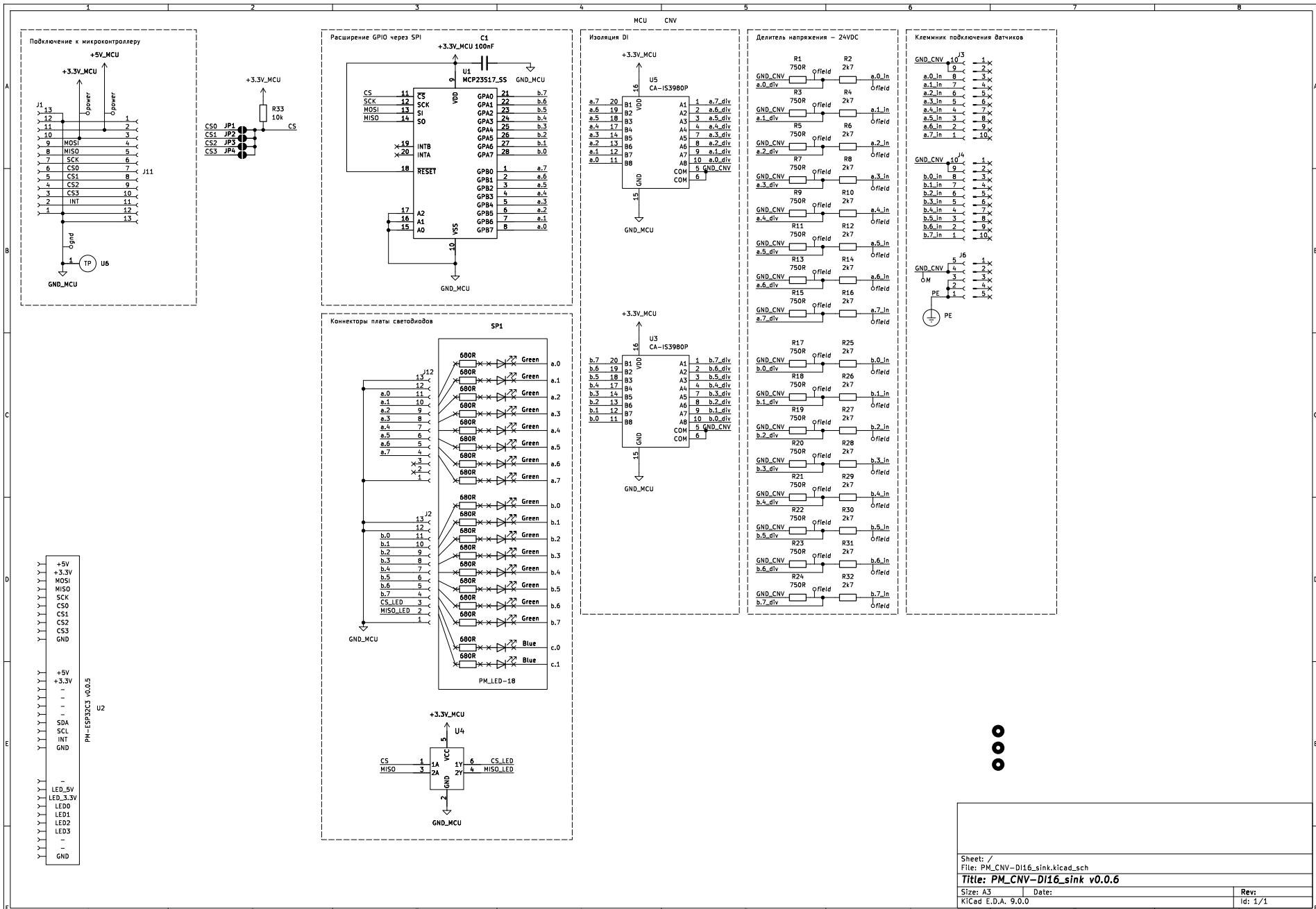


Рис. 24. Принципиальная электрическая схема платы PM_CNV-DI16_sink

| 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 |
| J1, J2, J11, J12 | 4 | 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 |
| 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% |
| R33 | 1 | R_10k_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 | Keystone_5117 |

Таблица 8. Перечень элементов платы PM_CNV-DI16_sink

8.7. PM_CNV-DQ16_src - 16 дискретных выходов

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

Функциональная схема платы представлена на рисунке 25.

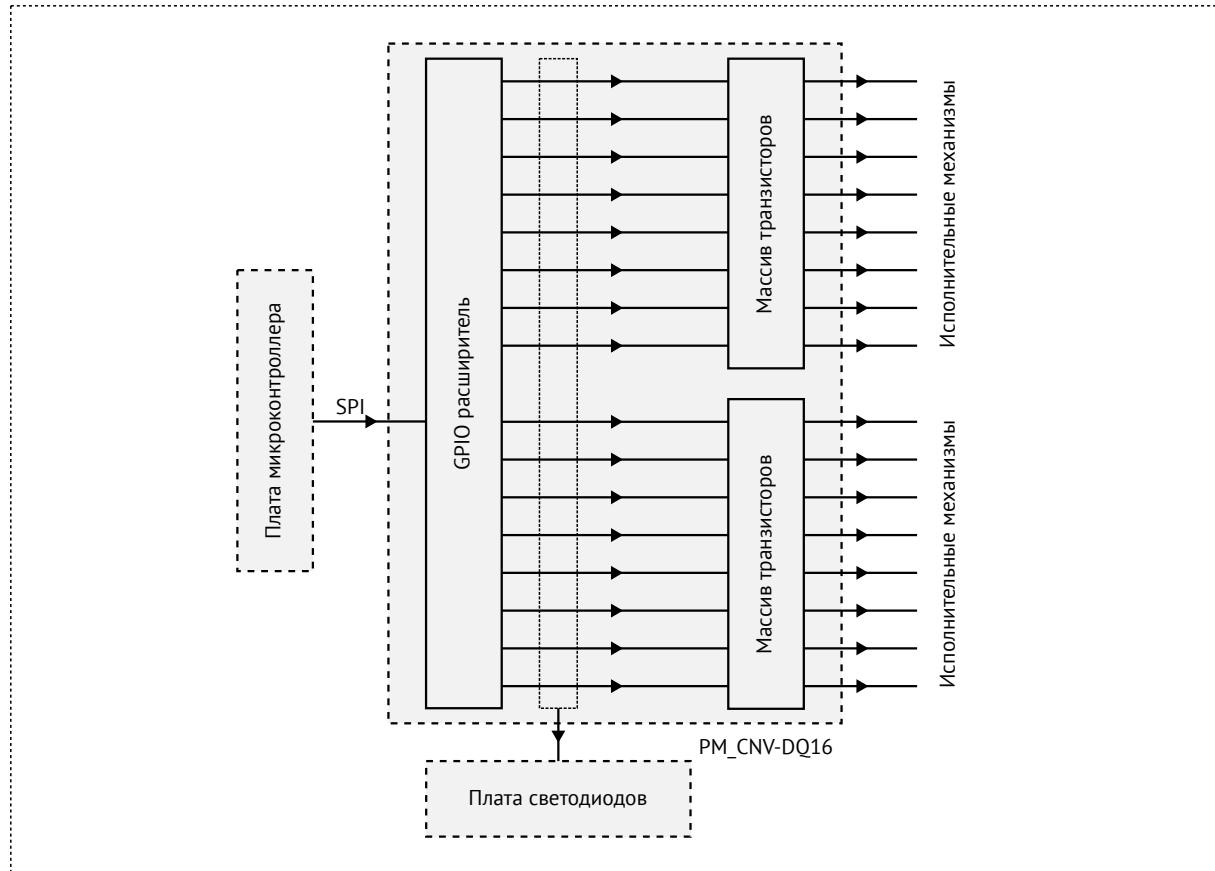


Рис. 25. Функциональная схема платы

Управляющие сигналы с платы микроконтроллера **PM MCU-ESP32 C3** 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.

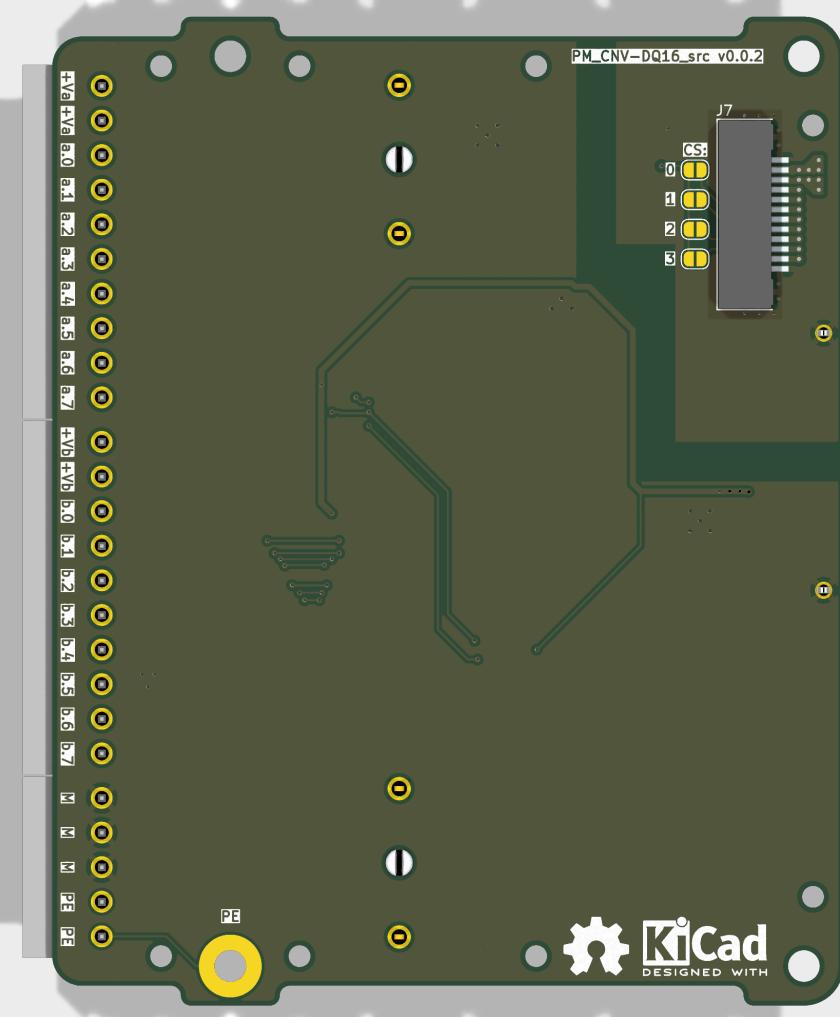
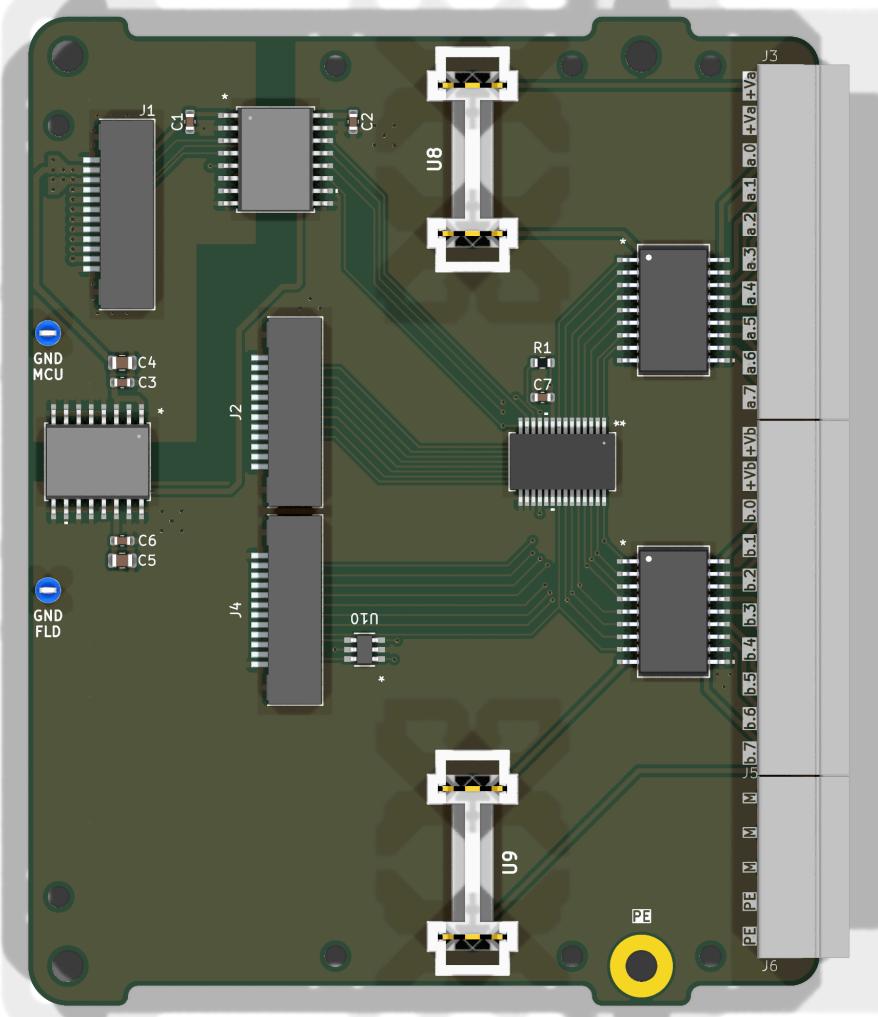


Рис. 26. Внешний вид платы PM_CNV-DQ16_src

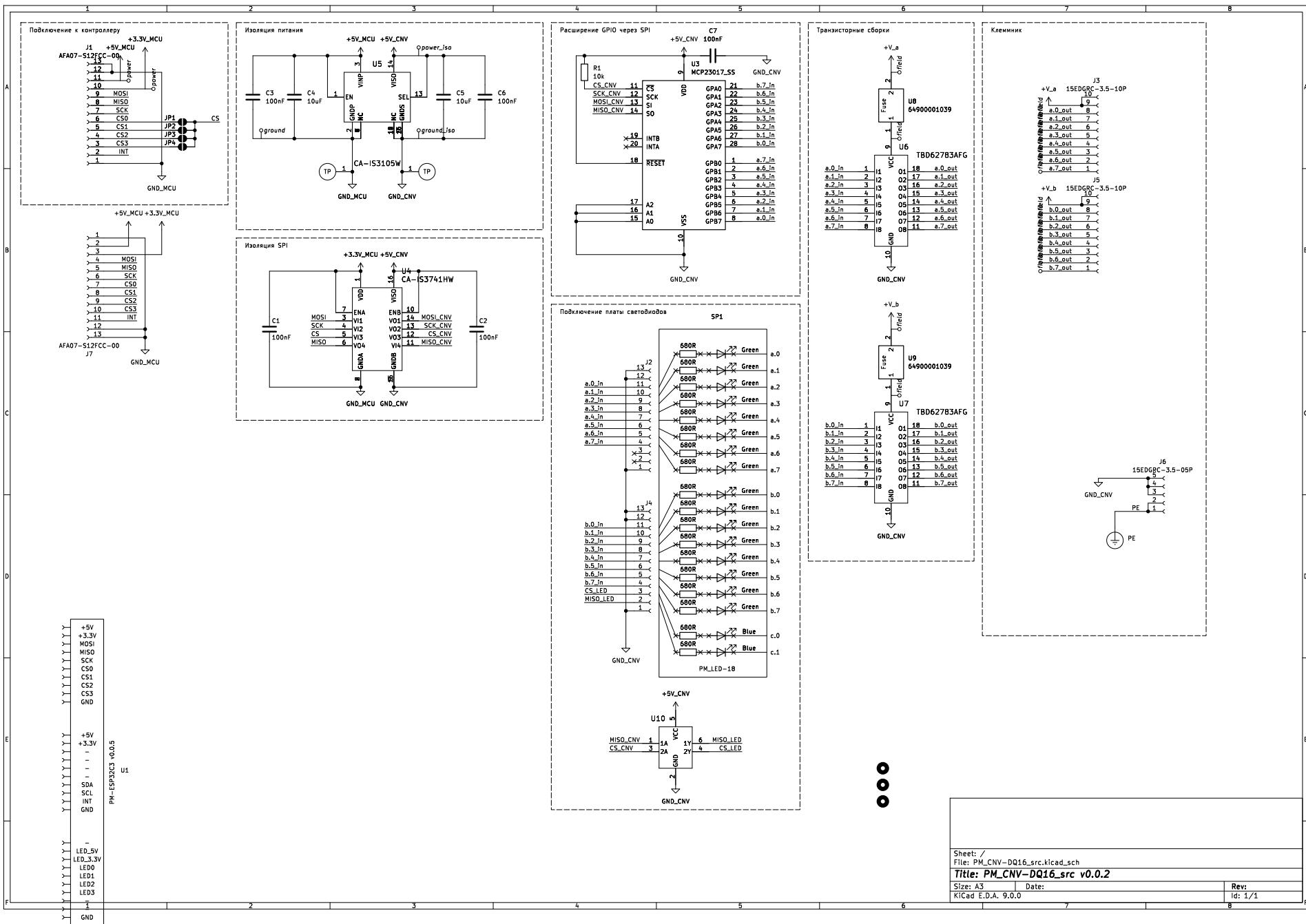


Рис. 27. Принципиальная электрическая схема платы PM_CNV-DQ16_src

| Обозначение | Количе- ство | part_ipn |
|--|-------------------------|---------------------------|
| C1, C2, C3, C6, C7 | 5 | C_100nF_16V_0603_MLCC-X7R |
| C4, C5 | 2 | C_10uF_16V_0805_MLCC-X5R |
| D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8, D9, D10, D11, D12, D13, D14, D15, D16 | 16 | XL-1606SYGC |
| D17, D18 | 2 | XL-1606UBC |
| J1, J2, J4, J7 | 4 | AFA07-S12FCC-00 |
| J3, J5 | 2 | 15EDGRC-3.5-10P |
| J6 | 1 | 15EDGRC-3.5-05P |
| 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, U11 | 2 | Keystone_5117 |
| U3 | 1 | MCP23S17-E/SS |
| U4 | 1 | CA-IS3741HW |
| U5 | 1 | CA-IS3105W |
| U6, U7 | 2 | TBD62783AFG |
| U8, U9 | 2 | 64900001039 |
| U10 | 1 | SN74LVC2G14DBVR |

Таблица 9. Перечень элементов платы PM_CNV-DQ16_src

8.8. PM_CNV-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 Рис. 28.

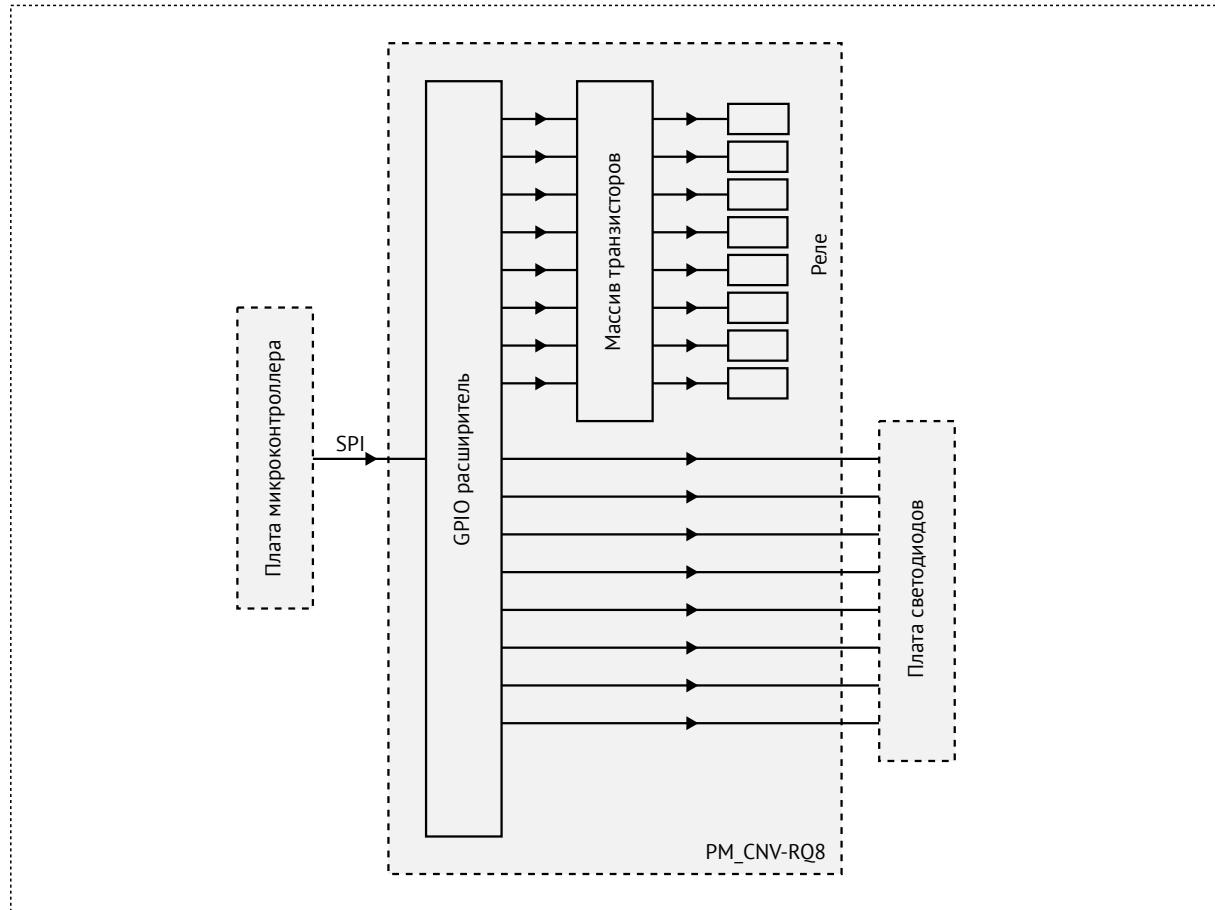


Рис. 28. Функциональная схема платы

Управляющие сигналы с платы микроконтроллера PM MCU-ESP32 C3 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.

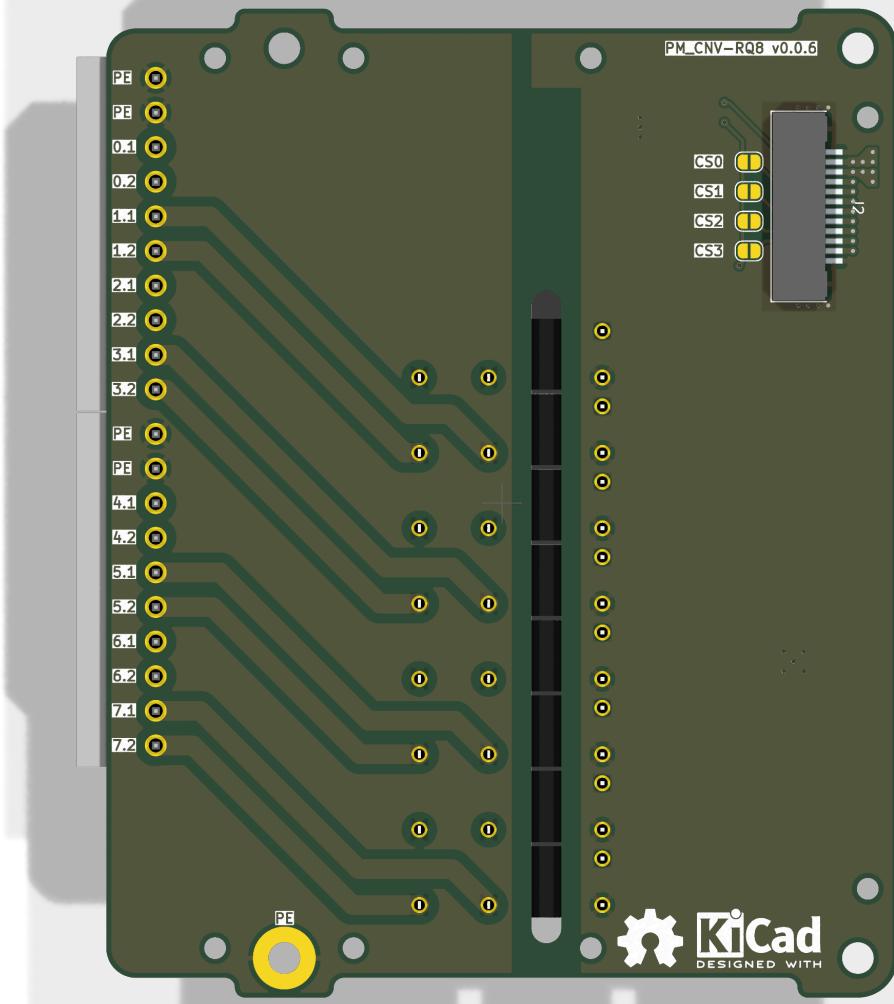
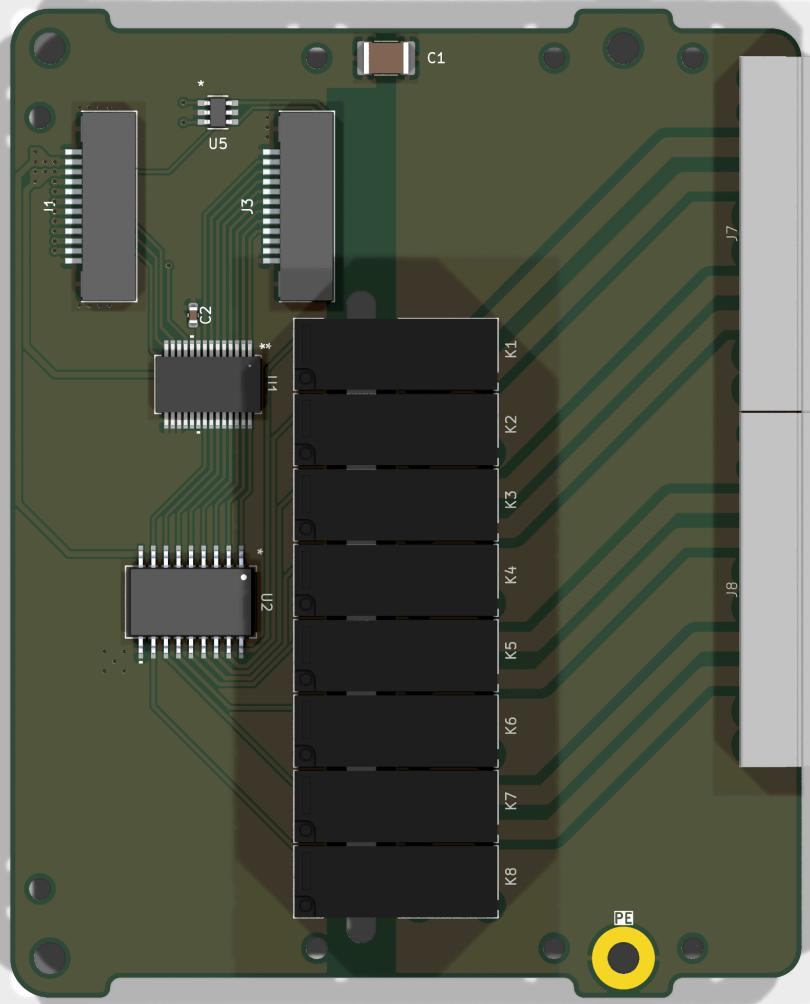
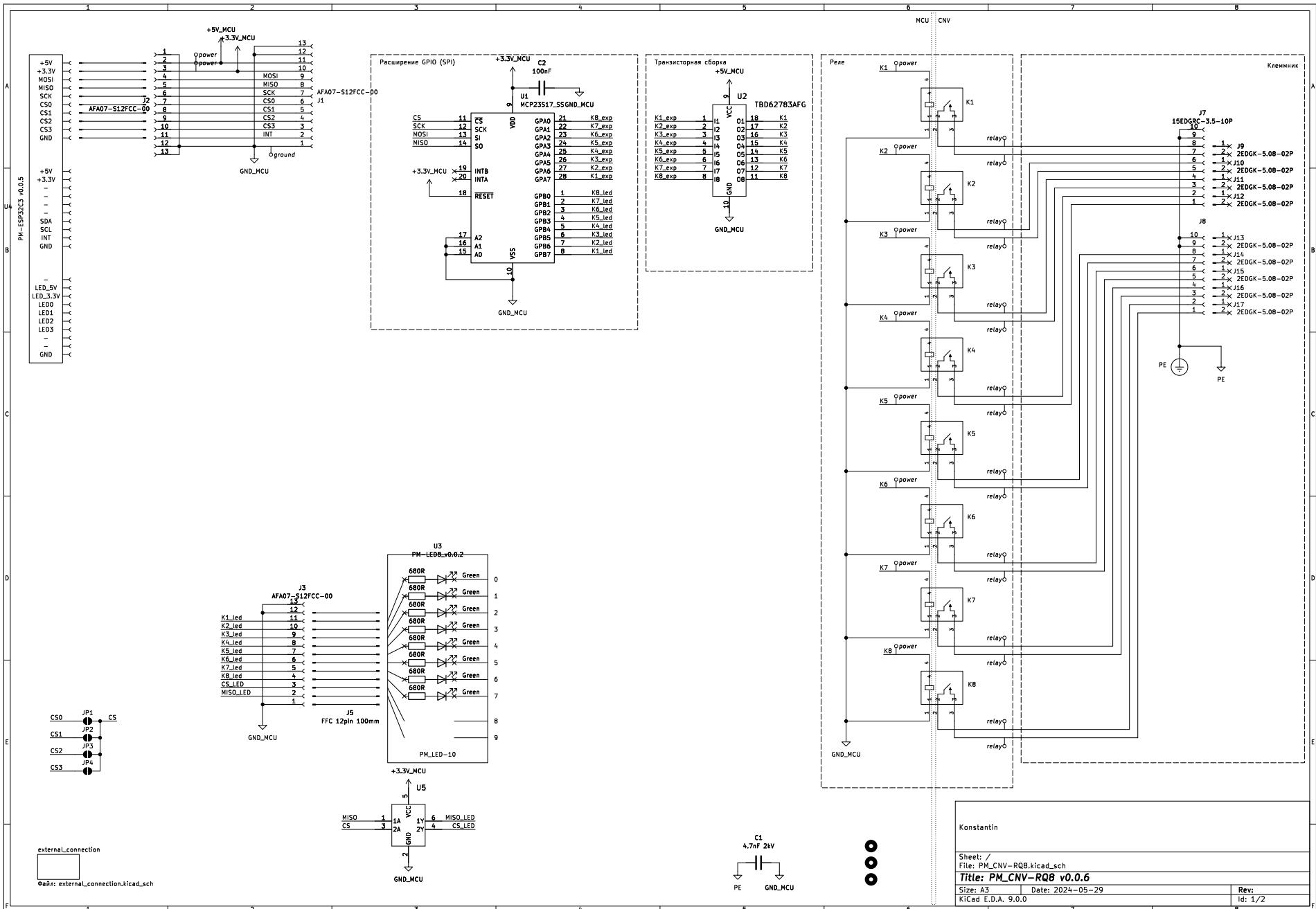


Рис. 29. Внешний вид платы PM_CNV-RQ8



| 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 |
| J1, J2, J3 | 3 | AFA07-S12FCC-00 |
| J4 | 1 | FFC_10P_P1.0_50mm_reverse |
| J5 | 1 | FFC_12P_P1.0_100mm_straight |
| J7, J8 | 2 | 15EDGRC-3.5-10P |
| J9, J10, J11, J12, J13, J14, J15, J16, J17 | 9 | 2EDGK-5.08-02P |
| K1, K2, K3, K4, K5, K6, K7, K8 | 8 | G5NB-1A-E-DC5 |
| R34, R35, R36, R37, R38, R39, R40, R41 | 8 | R_680R_0603_1% |
| U1 | 1 | MCP23S17-E/SO |
| U2 | 1 | TBD62783AFG |
| U3 | 1 | PM_LED-10-v0.0.1 |
| U5 | 1 | SN74LVC2G14DBVR |

Таблица 10. Перечень элементов платы PM_CNV-RQ8

8.9. PM_CNV-AI4_RTD - 4 аналоговых входа (термосопротивления)

8.10. PM_CNV-AI4_TC - 4 аналоговых входа (термопары)

8.11. PM_CNV-AI4_W - 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 - [8].

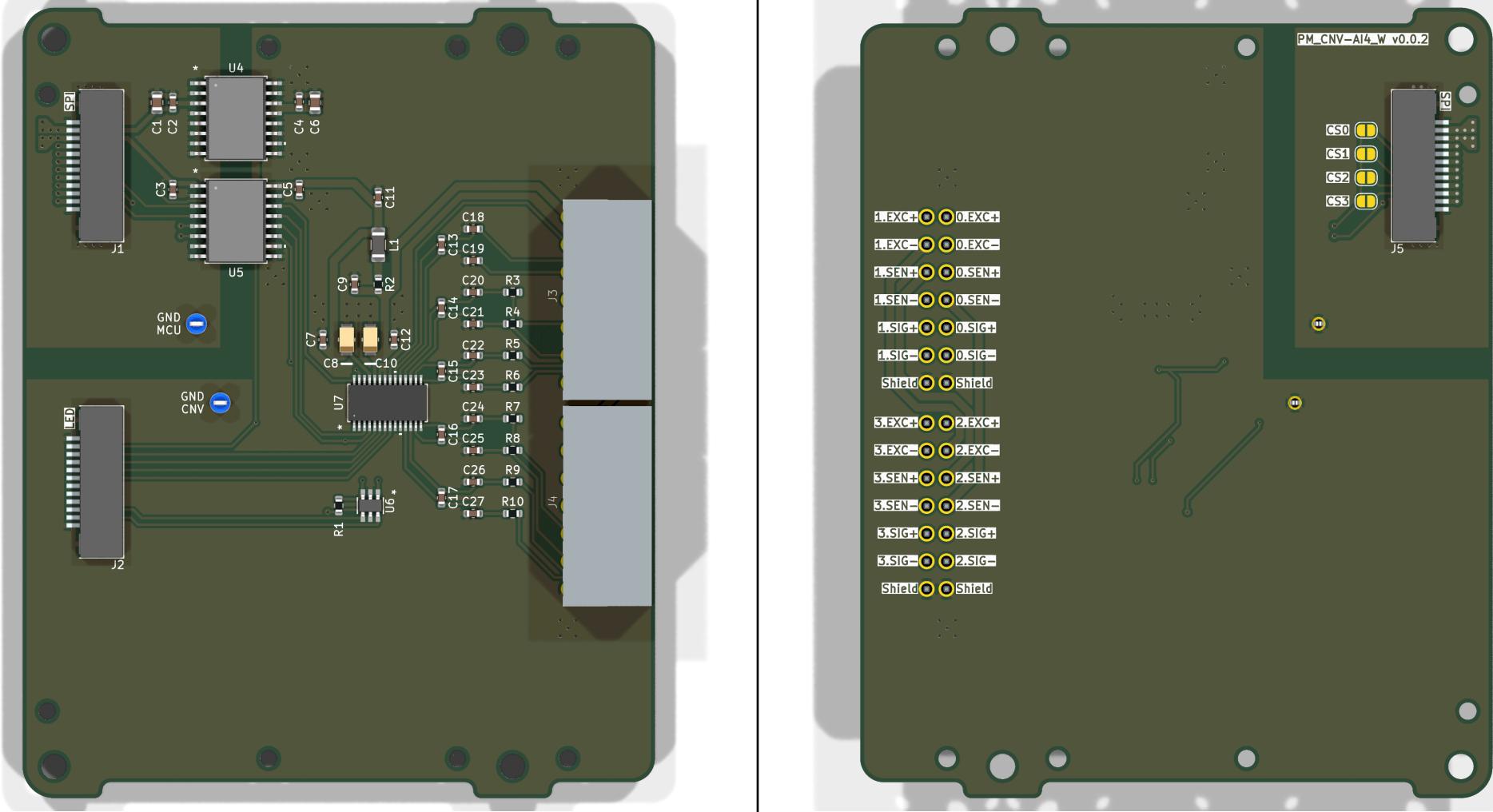


Рис. 31. Внешний вид платы PM_CNV-AI4_W

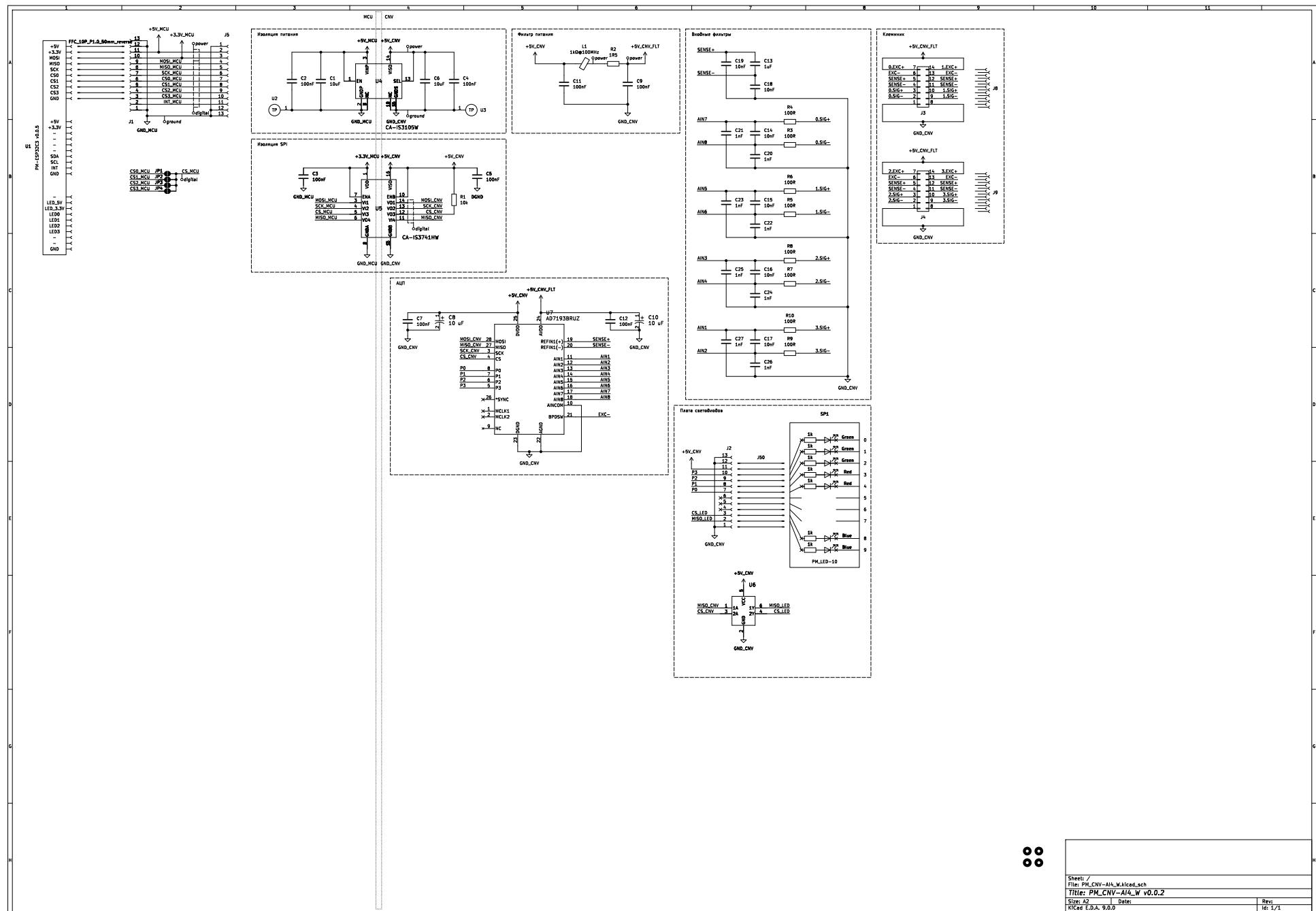


Рис. 32. Принципиальная электрическая схема платы PM_CNV-AI4_W

| Обозначение | Количе- ство | part_ipn |
|---|-------------------------|-----------------------------|
| C1, C6 | 2 | C_10uF_16V_0805_MLCC-X7R |
| C2, C3, C4, C5, C7, C9, C11, C12 | 8 | 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 |
| J1, J2, J5 | 3 | 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 |
| L1 | 1 | FB_300mΩ_1kΩ@100MHz_1206 |
| 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% |
| SP1 | 1 | PM_LED-10-v0.0.1 |
| U2, U3 | 2 | Keystone_5117 |
| U4 | 1 | CA-IS3105W |
| U5 | 1 | CA-IS3741HW |
| U6 | 1 | SN74LVC2G14DBVR |
| U7 | 1 | AD7193BRUZ |

Таблица 11. Перечень элементов платы PM_CNV-AI4_W

8.12. PM_CNV-AI8_IU - 8 аналоговых входов (0..20 мА или 0..10 В)

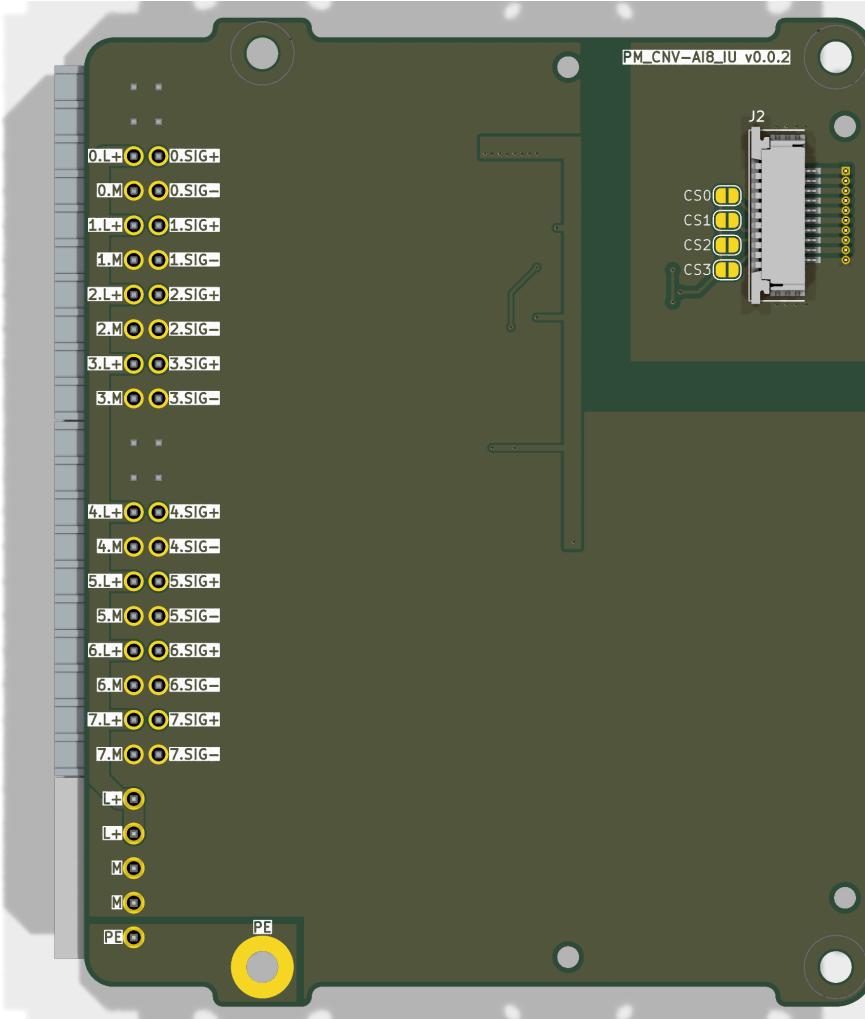
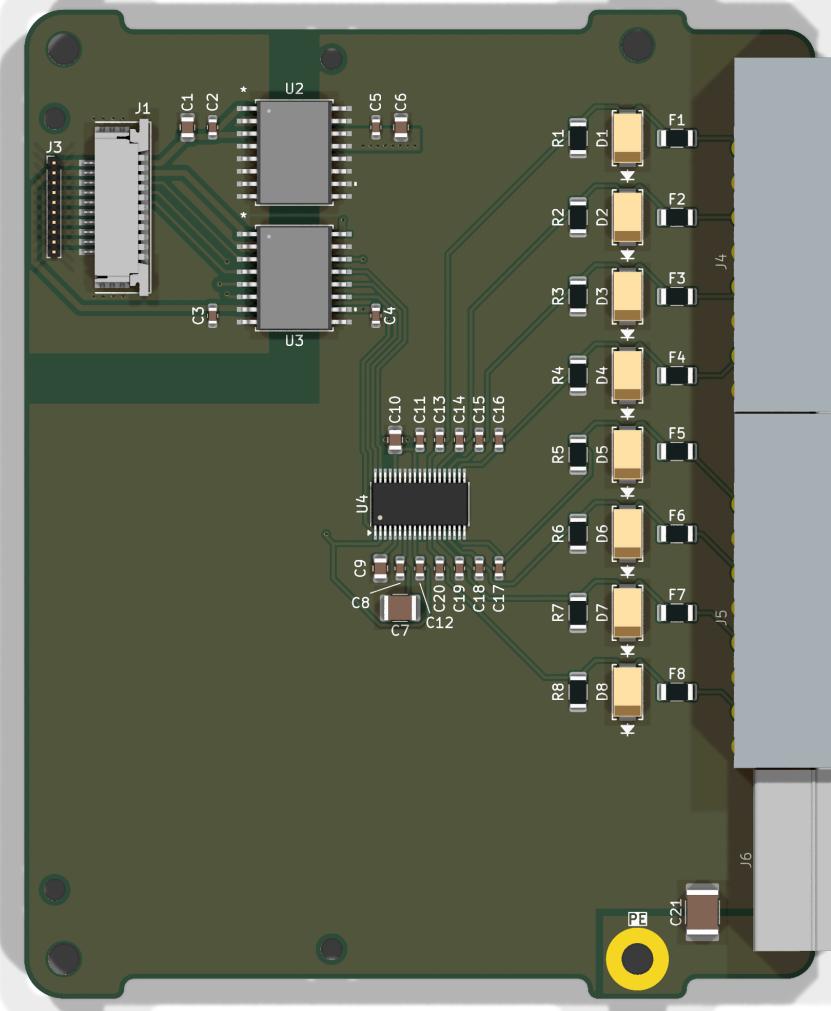


Рис. 33. Внешний вид платы PM_CNV-AI8_IU

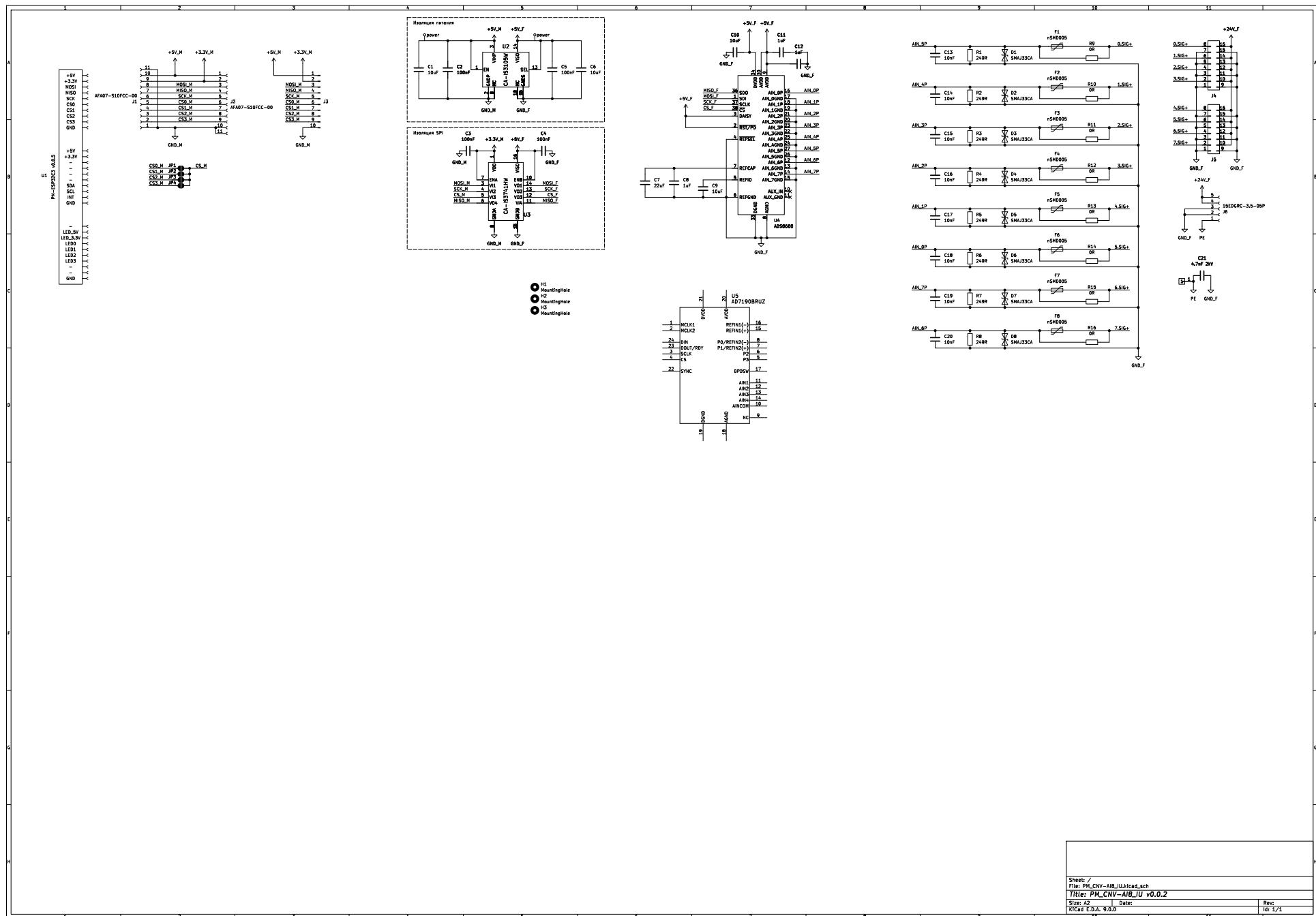


Рис. 34. Принципиальная электрическая схема платы PM_CNV-AI8_IU

| Обозначение | Количе- ство | part_ipn |
|---|-------------------------|---------------------------|
| C1, C6, C9, C10 | 4 | C_10uF_16V_0805_MLCC-X7R |
| C2, C3, C4, C5 | 4 | 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 |
| J1, J2 | 2 | AFA07-S10FCC-00 |
| J3, U4 | 2 | |
| J4, J5 | 2 | 15EDGRHC-THR-3.5-16P |
| J6 | 1 | 15EDGRC-3.5-05P |
| 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 | 1 | CA-IS3105W |
| U3 | 1 | CA-IS3741HW |
| U5 | 1 | AD7190 |

Таблица 12. Перечень элементов платы PM_CNV-AI8_IU

8.13. PM_CNV-AQ - аналоговый выход

8.14. PM_HMI-Keyboard

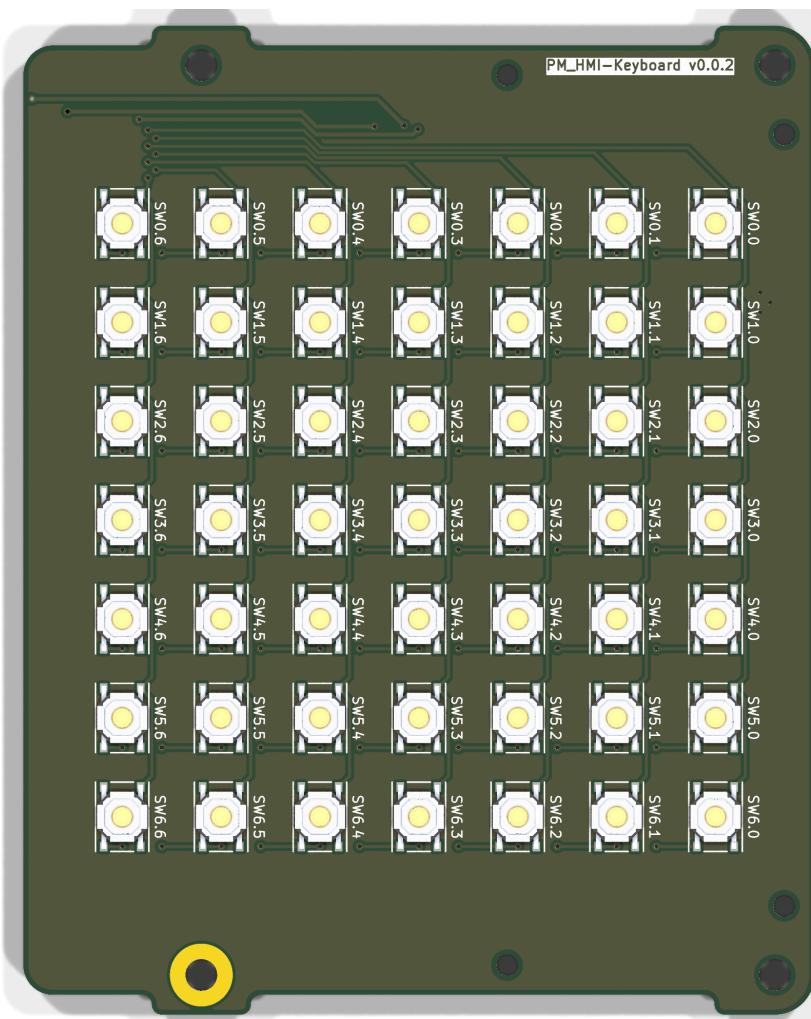
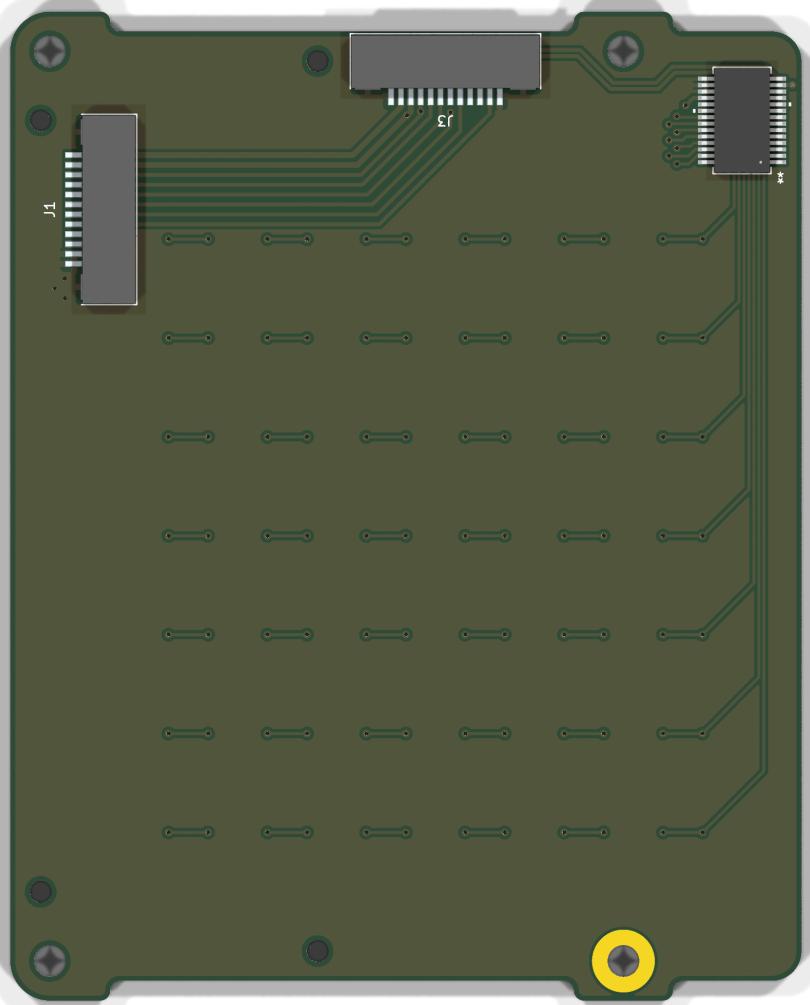


Рис. 35. Внешний вид платы PM_HMI-Keyboard

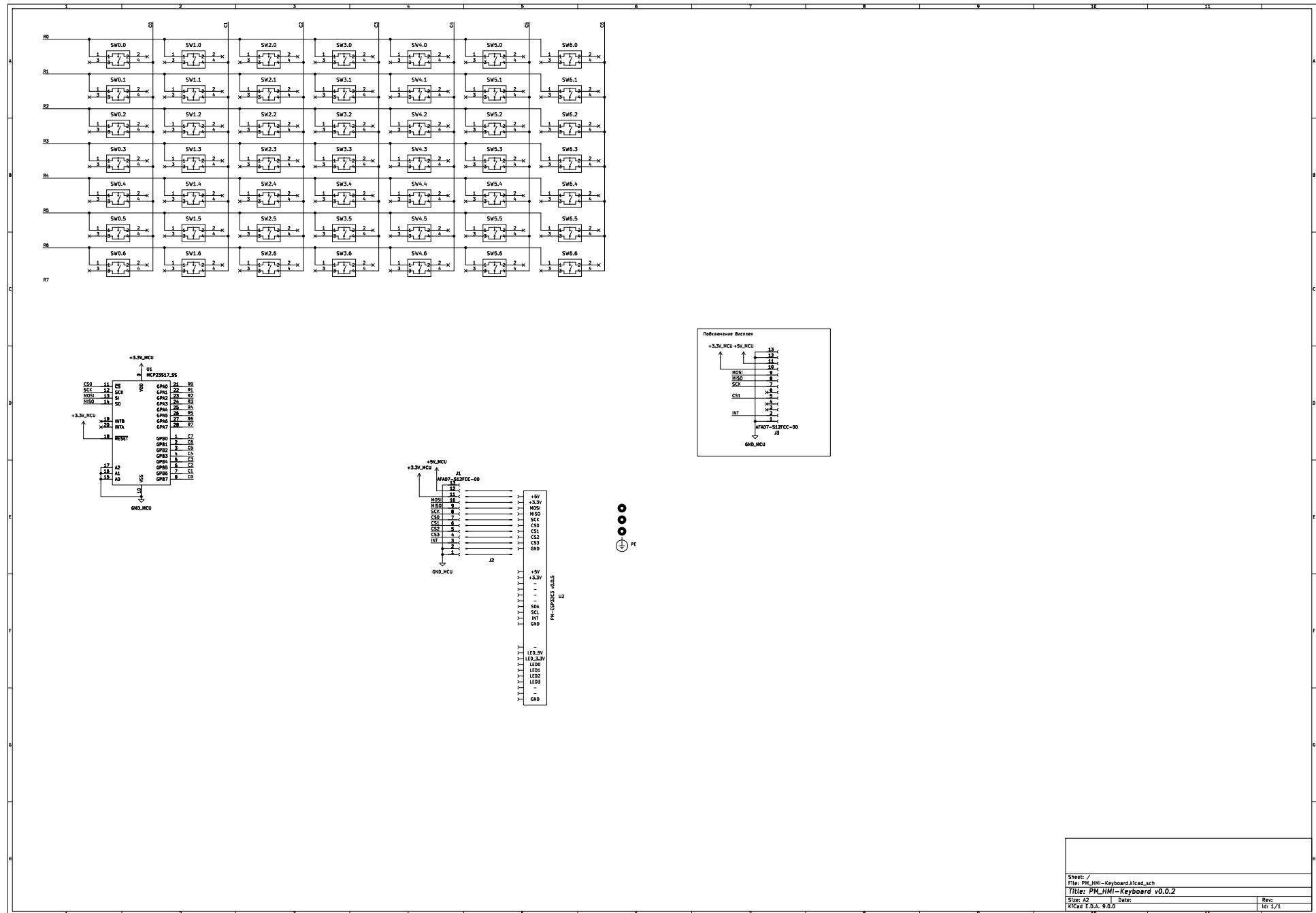


Рис. 36. Принципиальная электрическая схема платы PM_HMI-Keyboard

| 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 13. Перечень элементов платы PM_HMI-Keyboard

8.15. PM_HMI-Touch

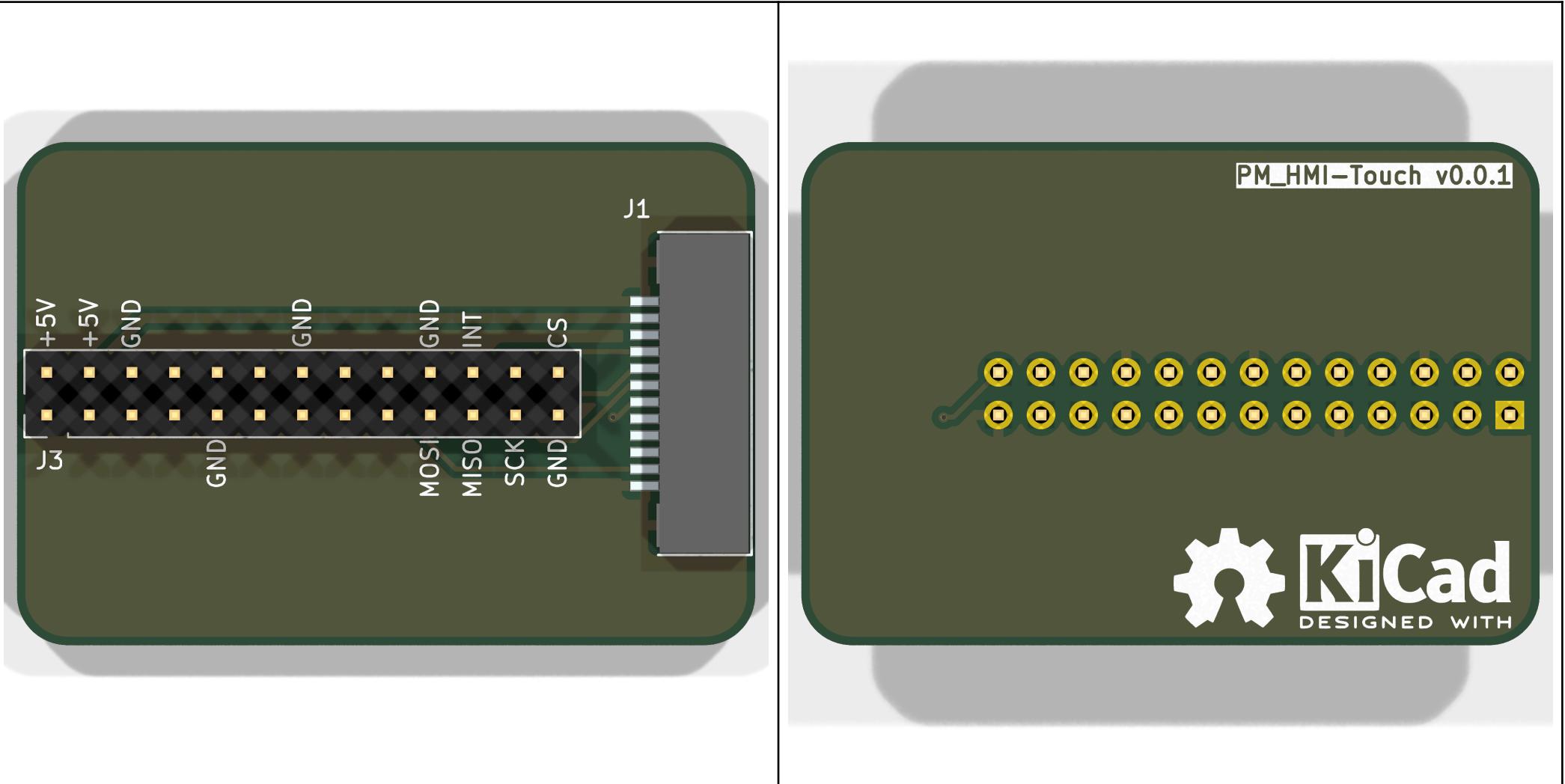


Рис. 37. Внешний вид платы PM_HMI-Touch

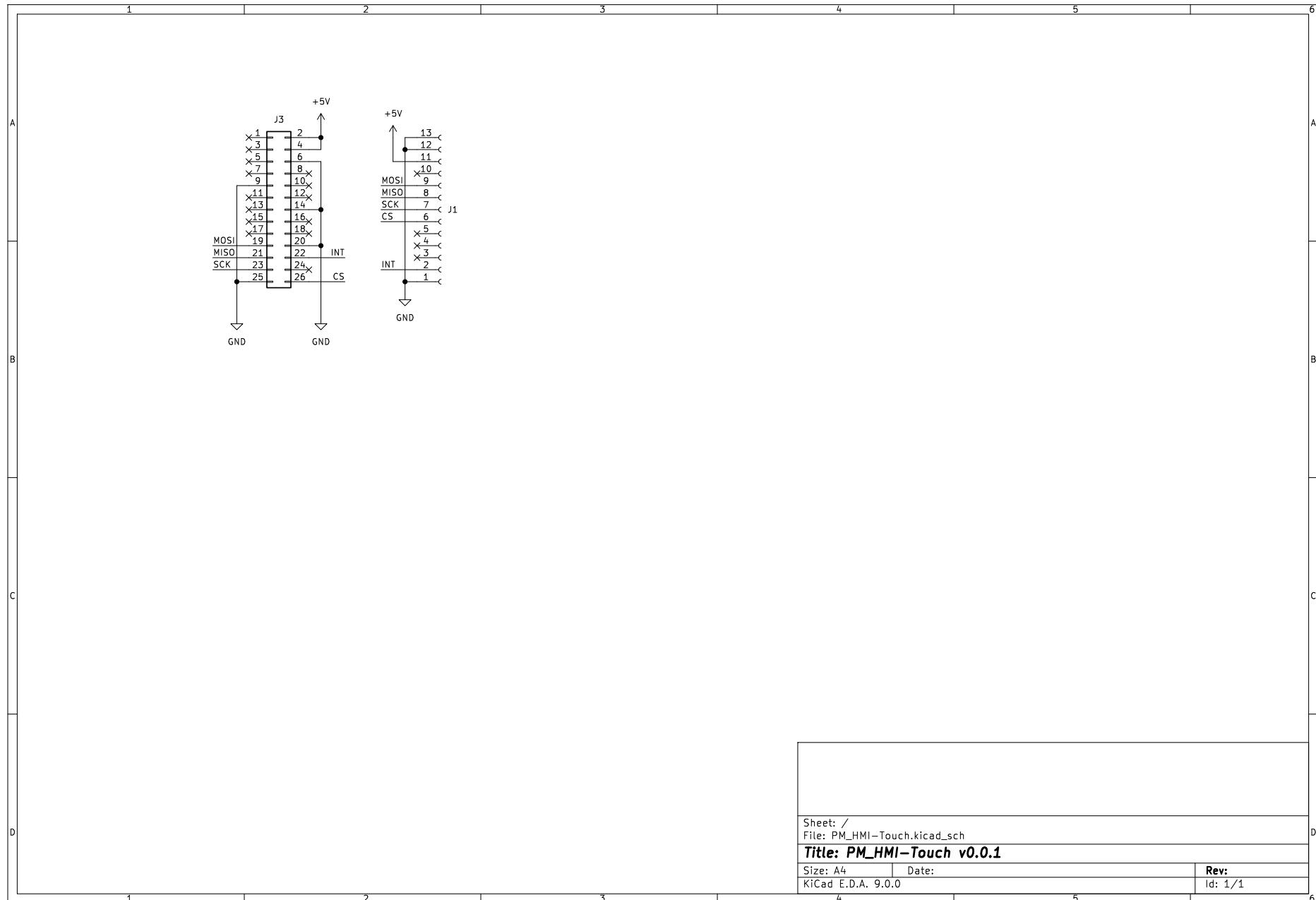


Рис. 38. Принципиальная электрическая схема платы PM_HMI-Touch

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

Таблица 14. Перечень элементов платы PM_HMI-Touch

8.16. 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

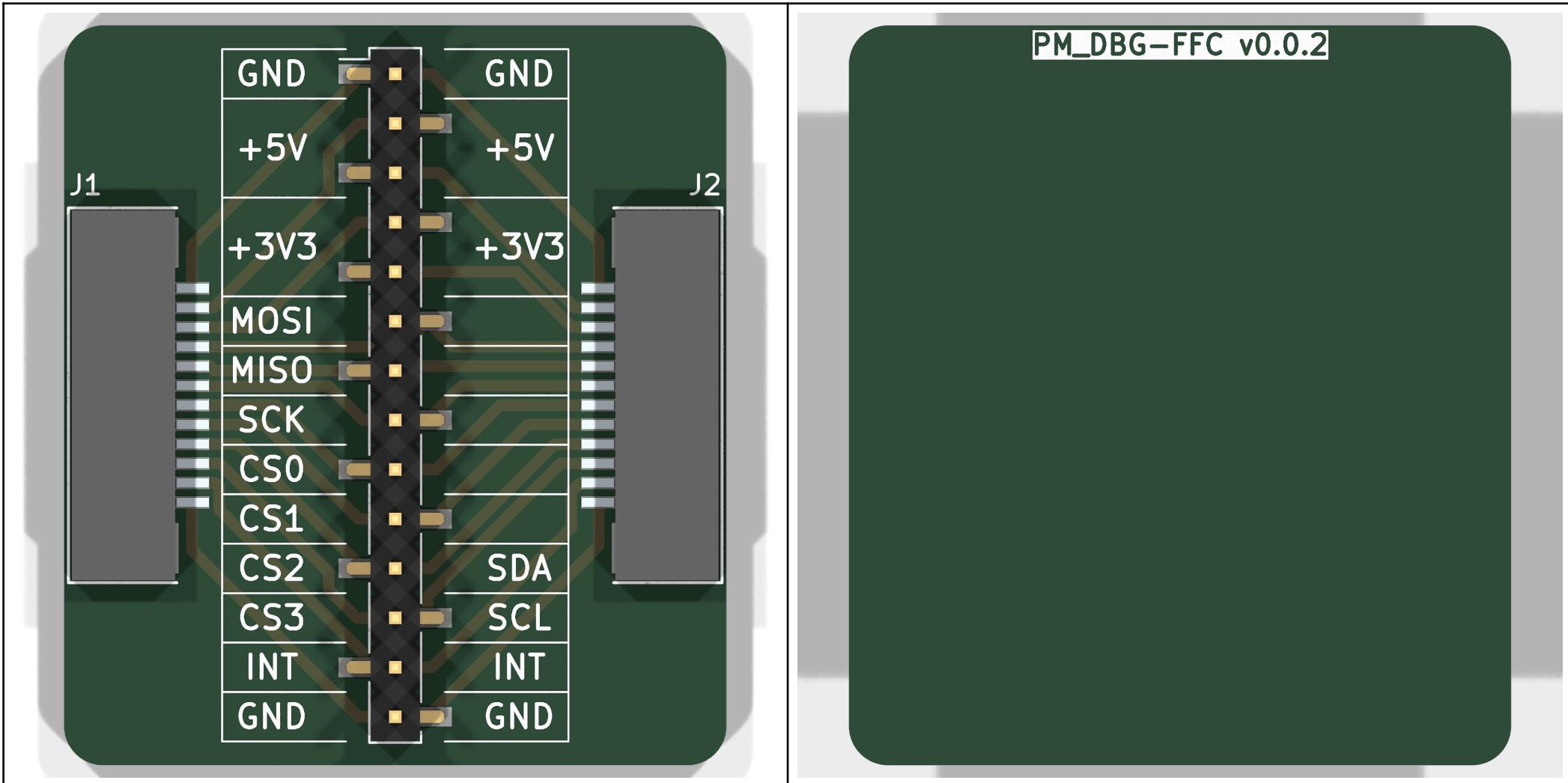


Рис. 39. Внешний вид платы PM_DBG-FFC

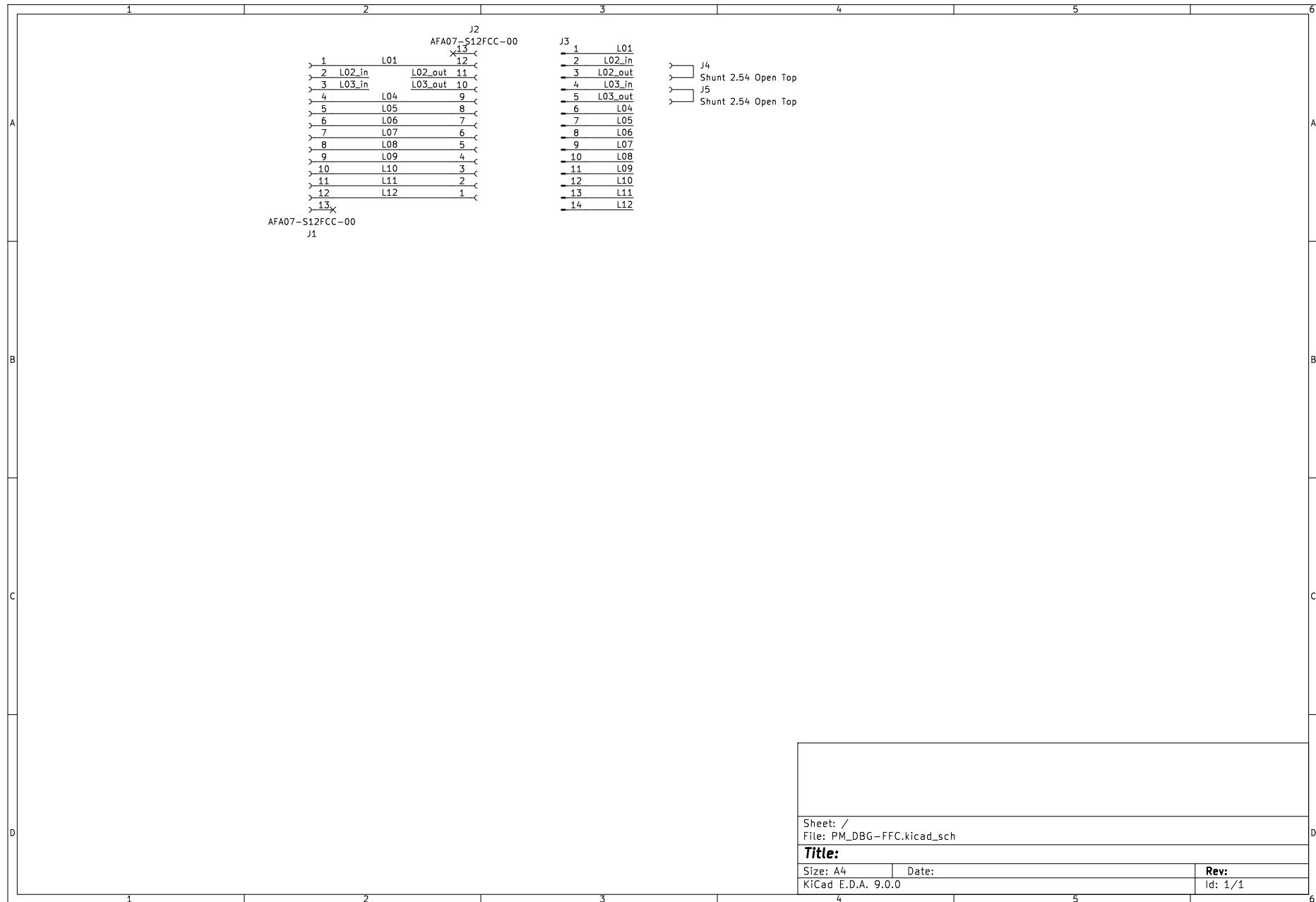


Рис. 40. Принципиальная электрическая схема платы PM_DBG-FFC

| 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 15. Перечень элементов платы PM_DBG-FFC

9. Комбинирование плат в модули

10. Габаритные размеры плат

На рисунке 41 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 42 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 43 показаны габаритные размеры платы микроконтроллера PM MCU-ESP32_C3. Плата крепится к основной плате с помощью стоек диаметром 2 мм.

TODO - нанести диаметры отверстий

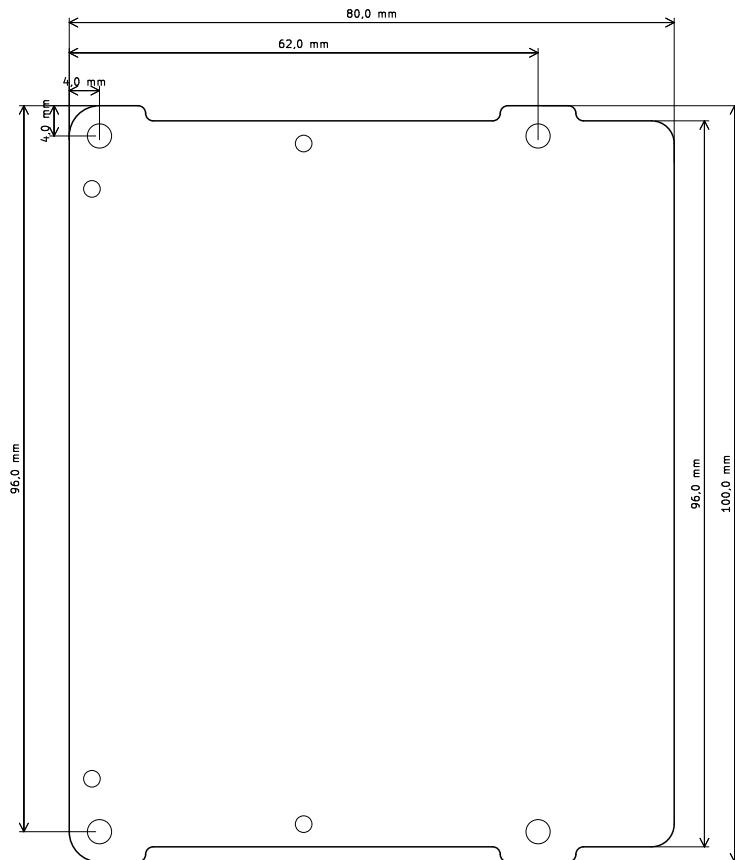


Рис. 41. Размеры основной печатной платы

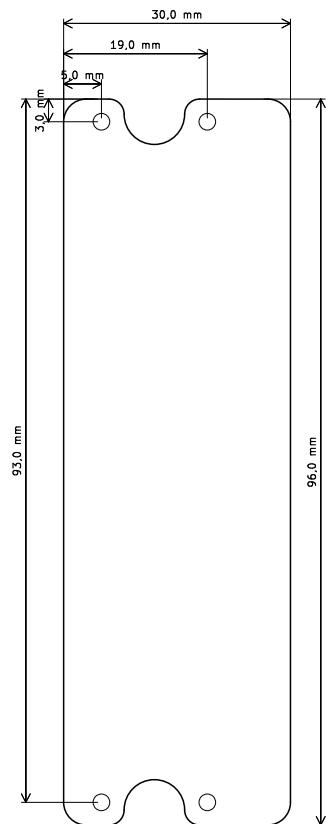


Рис. 42. Размеры платы светодиодов

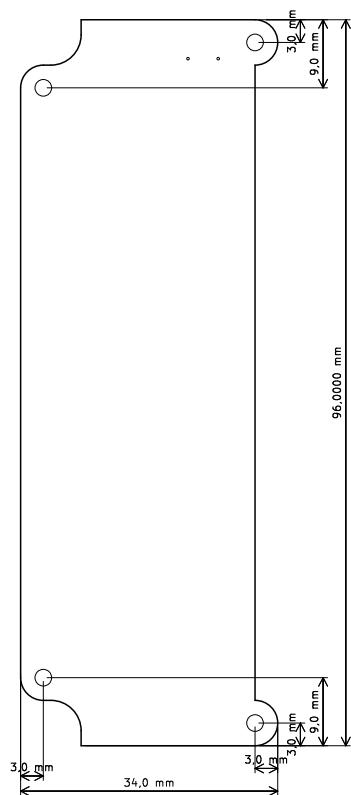


Рис. 43. Размеры платы микроконтроллера

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] Shanghai Chip analog 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>
- [6] Shanghai Chip analog 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>
- [7] 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
- [8] 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>