

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра великого
Институт машиностроения, материалов и транспорта
Высшая школа автоматизации и робототехники

КУРСОВАЯ РАБОТА

Проектирование платы управления печи оплавления

по дисциплине «Современные методы автоматизированного проектирования
электронных узлов роботов»

Разработал:

студент гр. 3331506/70401

Архипов А. Е.

Преподаватель

Капустин Д. А.

Санкт-Петербург

2021

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
1 Разработка схемы платы управления.....	4
1.1 Электромагнитный замок.....	4
1.2 Концевой выключатель двери	6
1.3 Подсветка.....	8
1.4 Умный ключ	11
1.5 Преобразователи напряжения	14
1.6 Трансивер.....	29
1.7 Программатор STM32	30
1.8 Кнопка notReset.....	31
1.9 Защита от переплюсовки.....	32
1.10 Разъемы	34
2 Трассировка платы управления	35
Заключение	36
Список использованных источников	37
Приложение А	38
Приложение Б.....	39

ВВЕДЕНИЕ

Задачей курсового проекта является разработка платы управления подсветкой и электромагнитным замком двери конвекционно-инфракрасной камерной печи. Печи оплавления представляют собой обязательный компонент производственного участка поверхностного монтажа и рассчитаны на групповую пайку всех типов компонентов с применением паяльной пасты. Назначением печей является нагрев изделия в соответствии с требуемым для плавления припоя термопрофилем, а в ряде случаев ещё и охлаждение готового узла.

В составе платы управления используются следующие ключевые элементы:

- Транзистор управления электромагнитным замком
- Концевой выключатель двери
- Транзистор управления подсветкой
- Умный ключ
- Преобразователи напряжения
- Трансивер
- Интерфейс SWD для прошивки микроконтроллера
- Кнопка notReset
- Защита от переполюсовки
- Разъемы

1 Разработка схемы платы управления

1.1 Электромагнитный замок

Для конвекционно-инфракрасной камерной печи электромагнитный замок предназначен для ограничения доступа в камеру, когда печь в рабочем режиме или в режиме охлаждения готового узла.

1.1.1 Выбор электромагнитного замка

Основным критерием выбора электромагнитного замка является его размер. Как правило электромагнитные замки изготавливаются для входных дверей, однако для двери камерной печи подобные решения будут усложнять конструкцию. Поэтому был выбран электромагнитный замок Atis MS-60, изображенный на рисунке 1. Характеристики данного замка приведены в таблице 1.



Рисунок 1 – Электромагнитный замок Atis MS-60

Таблица 1 – Характеристики электромагнитного замка

Размеры (ШхВхГ)	80 × 33 × 20 мм
Напряжение	12 В
Ток	240 мА
Сила удержания	60 Кг
Вес	1 Кг

Стоит обратить внимание на питающее напряжение электромагнитного замка, которое равняется 12В, для чего необходимо использовать на плате преобразователь напряжения 24В – 12В.

1.1.2 Управление питанием электромагнитного замка

Схема управления электромагнитным замком приведена на рисунке 2.

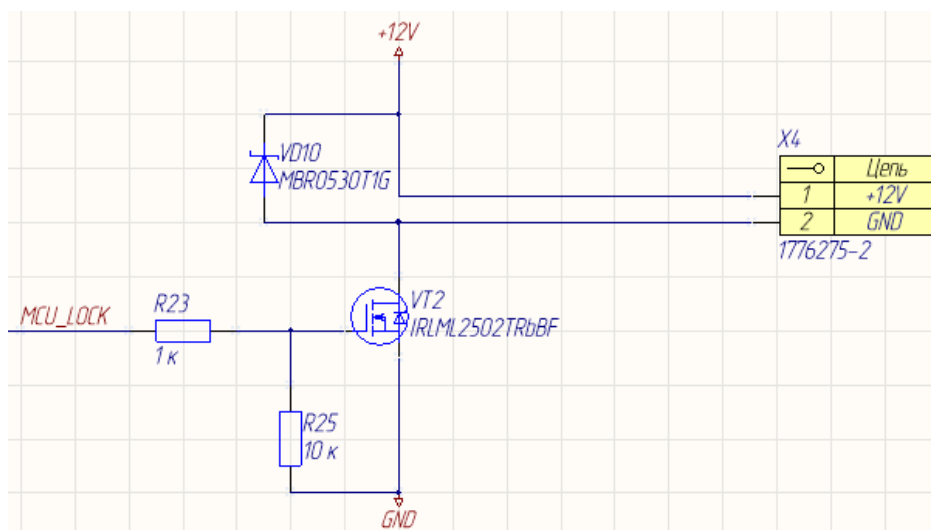


Рисунок 2 – Схема управления электромагнитным замком

Для управления электромагнитным замком использовался полевой транзистор. Данные транзисторы удобны тем, что управляются исключительно напряжением: если напряжение на затворе больше порогового, то транзистор открывается. При этом управляющий ток через транзистор пока он открыт или закрыт не течёт. Это значительное преимущество перед биполярными транзисторами, у которых ток течёт всё время, пока открыт транзистор. В работе использовался N-канальный МОП-транзистор IRLML2502TRbBF. Ток стока транзистора равен 4,2 А, напряжение сток – исток равняется 20 В. Характеристики транзистора удовлетворяют требованиям электромагнитного замка.

Несмотря на то, что полевой транзистор управляется только

напряжением и ток через затвор не идёт, затвор образует с подложкой паразитный конденсатор. Когда транзистор открывается или закрывается, этот конденсатор заряжается или разряжается через вход ключевой схемы. При управлении типа push-pull схема разряда конденсатора образует, фактически, RC-цепочку, в которой максимальный ток разряда будет равен:

$$I_{\text{GPIO}_{\text{SOURCE}}} = \frac{V}{R_{23}} \quad (1)$$

где V – напряжение с микроконтроллера.

$$R_{23} = \frac{V}{I_{\text{GPIO}_{\text{SOURCE}}}} = \frac{3,3}{10 \cdot 10^{-3}} = 330 \text{ Ом} \quad (2)$$

Выберем резистор R_{23} равным 1 кОм.

Сопротивление подтяжки R_{25} должно быть минимум в 10 раз больше значение затворного резистора, поэтому выберем сопротивление резистора R_{23} равным 10 кОм.

Кроме того, необходимо использовать защитный диод. Энергия, запасённая магнитным полем, не даёт мгновенно уменьшить ток до нуля при отключении ключа. А значит, на контактах нагрузки возникнет напряжение обратной полярности, которое легко может нарушить работу схемы или даже повредить её. В данном случае был выбран диод MBR0530T1G, с максимальным обратным напряжением 30 В и максимальным прямым током 0,5 А.

1.2 Концевой выключатель двери

Концевой выключатель для печи предназначен для получения информации о состоянии двери. Для данной платы управления эта информация необходима для автоматического включения подсветки. Также эта информация может обрабатываться микроконтроллером и отправляться на материнскую плату через интерфейс RS-232.

1.2.1 Выбор концевого выключателя

Концевые выключатели бывают различных типов и в различных исполнениях. Для данной задачи был выбран микропереключатель ПМ22 [1], который приведен на рисунке 3.



Рисунок 3 – Микропереключатель ПМ22

Удобством данного переключателя является возможность его использования как в нормально разомкнутом, так и в нормально замкнутом типе контактов. Это возможно осуществить за счет изменения сигнального провода с позиции 3 на 2 и обратно, как показано на рисунке 4.

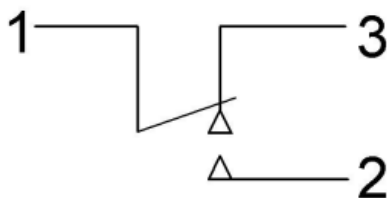


Рисунок 4 – Электрическая схема коммутации ПМ22

1.2.2 Реализация концевого выключателя

Реализация концевых датчиков представлена на рисунке 5.

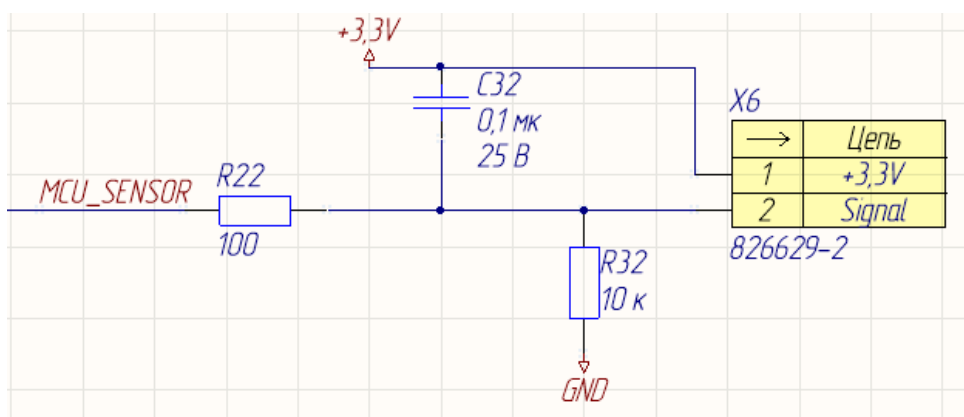


Рисунок 5 – Реализация концевого выключателя

Цепочка C32, R32 необходима для устранения дребезга контактов механической части концевого выключателя. Резистор R22 ограничивает ток через ключевой транзистор микроконтроллера.

1.3 Подсветка

1.3.1 Выбор подсветки

В качестве источника света для камеры печи был сделан выбор в пользу светодиодных лент за счет их достоинств. Светодиодная лента намного надежнее многих других источников света. Благодаря применению в ней светодиодов достигается:

- Длительный срок службы. Если соблюдать все требования к монтажу и условиям эксплуатации, лента способна прослужить около 50 000 часов. Это равняется примерно 8 годам непрерывной работы. В течение этого периода интенсивность свечения не снижается более чем на 50 процентов.
- Минимальное потребление энергии.
- Безопасность использования и монтажа. Для работы ленты требуется небольшое напряжение, которое не опасно для жизни и

не создает риска получения удара током. В процессе работы она не нагревается до высоких температур.

Поскольку разрабатываемое устройство будет работать при высоких температурах, то имеет смысл применять термостойкую светодиодную ленту. Была выбрана светодиодная лента, приведенная на рисунке 2, компании Clever-light. Лента состоит из светодиодов SMD2835. Характеристики ленты приведены в таблице 2.



Рисунок 6 – Светодиодная лента

Таблица 2 – Характеристики светодиодной ленты

Количество светодиодов	120 шт./м
Напряжение питания	12 В
Шлейф ленты	двухслойный, силиконовая оболочка
Мощность ленты	15 Вт/м
Световой поток	1440 лм/м
Размеры	2000×10×7 мм
Степень защиты	IP68

Длина светодиодной ленты была подобрана таким образом, чтобы ее можно было провести по периметру внутренней камеры печи. Мощность

двух метров ленты равняется 30 Вт, тогда при напряжении 12 В необходимо иметь 2,5 А.

1.3.2 Управление подсветкой

Схема управления подсветкой представлена на рисунке 7.

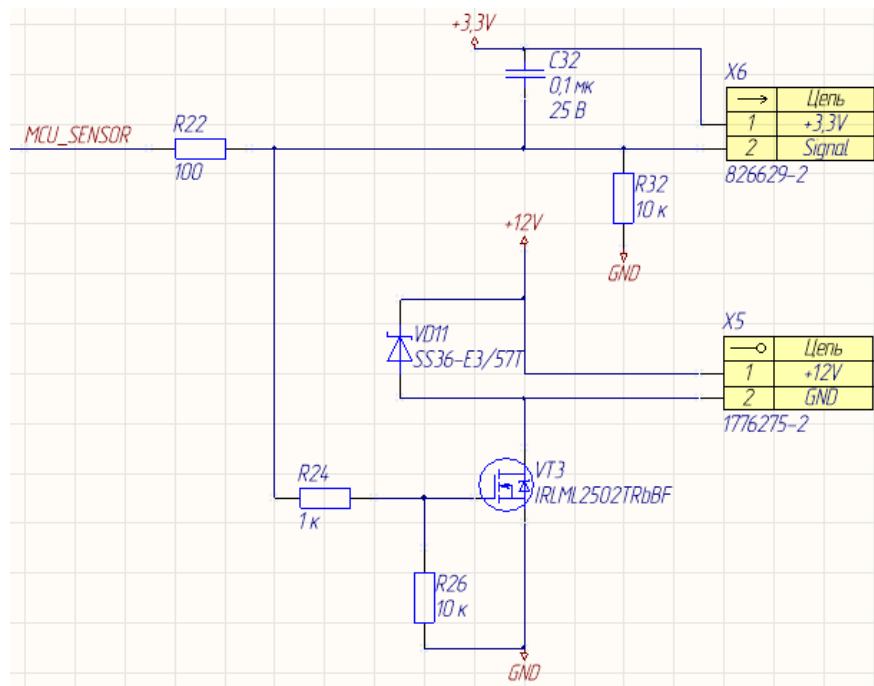


Рисунок 7 – Схема управления подсветкой

Схема управления аналогична схеме управления электронным замком. Разница заключается в том, что управляющий сигнал поступает не от микроконтроллера, а от концевого выключателя. Также был заменен защитный диод. В данном случае был выбран диод SS36-E3/57T, с максимальным обратным напряжением 60 В и максимальным прямым током 3 А.

1.4 Умный ключ

Схема цепи питания электронного устройства состоит из источника питания и подключаемой нагрузки. Для безопасной и надежной работы устройства источник питания должен обеспечивать номинальный режим по току и напряжению в цепи. При аварийных ситуациях в цепи питания могут происходить как кратковременная, так и долговременная перегрузки по току, перенапряжение либо подача недостаточного для корректной работы напряжения питания, а также ошибочная смена полярности напряжения в результате неправильного подключения источника питания к нагрузке. Все эти события могут вызвать выход из строя питаемого устройства (нагрузки), а также силовых цепей источника питания, привести к локальному перегреву и даже возгоранию устройств. Международные стандарты регламентируют обязательное использование в цепях питания электронных устройств предохранительных приборов, обеспечивающих гарантированное отключение устройства от цепи питания при перегрузках для предотвращения возгорания в процессе эксплуатации.

В работе используется микросхема TPS16630PWPR.

Микросхем TPS16630PWPR (eFuse) [2] представляет собой устройство комплексной защиты нагрузки от проблем, вызванных источником питания. Микросхема защищает нагрузку от низкого уровня напряжения, перенапряжения и перегрузки по току. Силовой МОП-ключ входит в состав микросхемы. Такие параметры как уровни защиты от перенапряжения и перегрузки по току устанавливаются внешними резисторами. Микросхема имеет выход «питание в норме» (Power good), который можно использовать для включения микросхем преобразования напряжения. Также в микросхеме имеется выход для мониторинга значения проходящего тока – IMON и индикатор отказа FLT.

Исходные данные для расчета представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Исходные данные

Нижний порог входного напряжения, V_{UV}	20 В
Верхний порог входного напряжения, V_{OV}	24 В
Предел тока, I_{LIM}	4 А
Емкость нагрузки, C_{OUT}	47 мкФ
Пусковой ток, I_{INRUSH}	300 мА

1.4.1 Расчет резистора на выводе ILIM

Расчет резистора R_{ILIM} выполняется по формуле (3).

$$R_{ILIM} = \frac{18}{I_{LIM}} = \frac{18}{4} = 4,5 \text{ кОм} \quad (3)$$

Выбираем резистор 4,42 кОм.

1.4.2 Расчет резисторов делителя напряжения

Расчет резисторов R_1 , R_2 и R_3 делителя напряжения.

Ток через эти резисторы I_{R123} рассчитывается по формуле (4).

$$I_{R123} = \frac{V_{IN}}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (4)$$

В то же время ток I_{R123} должен быть минимум в 20 раз больше тока утечки выводов UVLO и OVP.

Из документации $I_{UVLO(max)} = I_{OVP(max)} = 150 \text{ нА}$.

Пусть $I_{R123} = 200 \cdot 150 \cdot 10^{-9} = 30 \text{ мкА}$.

Из формулы (4)

$$R_1 + R_2 + R_3 = \frac{V_{IN}}{I_{R123}} = \frac{24}{30 \cdot 10^{-6}} = 8 \cdot 10^5 \text{ Ом} \quad (5)$$

Расчет резисторов R_1 , R_2 и R_3 выполняется с помощью формул (4) и (5).

$$V_{OVPR} = \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \cdot V_{OV} \quad (6)$$

$$V_{UVLOR} = \frac{R_2 + R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \cdot V_{UV} \quad (7)$$

Из документации $V_{OVPR} = V_{UVLOR} = 1,2 \text{ В}$.

Из уравнения (5) получаем

$$R_3 = \frac{(R_1 + R_2 + R_3) \cdot V_{OVPR}}{V_{OV}} = \frac{8 \cdot 10^5 \cdot 1,2}{24} = 30 \text{ кОм}$$

Из уравнения (5) получаем

$$R_2 = \frac{(R_1 + R_2 + R_3) \cdot V_{UVLOR}}{V_{UV}} - R_3 = \frac{8 \cdot 10^5 \cdot 1,2}{20} - 40 \cdot 10^3 = 8 \text{ кОм}$$

Так как, $R_1 + R_2 + R_3 = 16 \cdot 10^5 \text{ Ом}$, получаем

$$R_1 = 8 \cdot 10^5 - R_2 - R_3 = 8 \cdot 10^5 - 8 \cdot 10^3 - 30 \cdot 10^3 = 762 \cdot 10^3 \text{ Ом}$$

Выбираем $R_1 = 750 \text{ кОм}$, $R_2 = 8,06 \text{ кОм}$, $R_3 = 30 \text{ кОм}$.

1.4.3 Расчет конденсатора для вывода dVdT

Расчет конденсатора для вывода dVdT выполняется по формуле (8).

$$C_{dVdT} = \frac{t_{dVdT}}{20,8 \cdot 10^3 \cdot V_{IN}}, \quad (8)$$

где t_{dVdT} вычисляется по формуле (9).

$$t_{dVdT} = \frac{V_{IN} \cdot C_{OUT}}{I_{INRUSH}} = \frac{24 \cdot 47 \cdot 10^{-6}}{300 \cdot 10^{-3}} = 0,0035 \text{ с} \quad (9)$$

Подставив значения в формулу (8), получим

$$C_{dvdt} = \frac{0,0035}{20,8 \cdot 10^3 \cdot 24} = 0,007 \text{ мкФ}$$

Выбираем конденсатор 6800 пФ, 50 В, X7R.

1.4.4 Выбор входного конденсатора

Входной конденсатор по рекомендациям должен быть номиналом не меньше 0,1 мкФ.

Выбираем 1 мкФ, 100 В, X7R.

1.4.5 Схема умного ключа

Схема умного ключа со всеми рассчитанными компонентами приведена на рисунке 8.

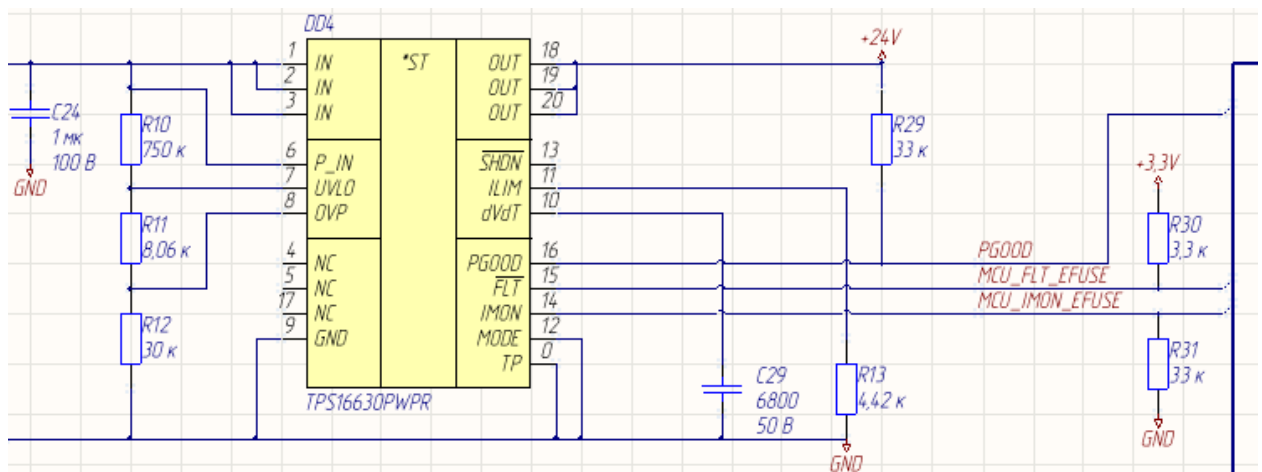


Рисунок 8 – Схема умного ключа

1.5 Преобразователи напряжения

TPS54560B [3] — понижающий преобразователь постоянного напряжения (DC-DC) с максимальным током нагрузки до 5А. Преобразователь работает при входном напряжении от 4.5В до 60В. Содержит встроенный мощный ключевой полевой транзистор MOSFET на плюсовой шине и

использует минимальное число внешних элементов для работы. В преобразователе реализован токовый режим управления цепью обратной связи, который облегчает требования к выбору элементов цепи компенсации. Используемый метод подавления дрожаний импульсов позволяет снизить ток потребления холостого хода до 146мкА. Имеется защита от снижения входного напряжения ниже 4.3В, при необходимости этот уровень может быть повышен подачей определенного напряжения на вывод EN. Выходное напряжение задается внешними резисторами и в момент запуска управляется так, чтобы не произошла перегрузка по току в нагрузке. Преобразователь позволяет менять частоту коммутации ШИМ в широких пределах для достижения максимального КПД или для выбора индуктивности подходящих размеров. Предусмотрена защита от перегрузки по среднему току, от перегрева и от короткого замыкания. ИС выпускается в 8-выводном корпусе HSOIC с улучшенным теплоотводом. Основные характеристики данной микросхемы приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Характеристики микросхемы TPS54560B

Параметр	Значение
Номинальное напряжение, В	от 4,5 до 60
Номинальный ток, А	до 5
Частота переключения, МГц	от 0,1 до 2,5
Рабочие температуры, °С	от -40 до 150
Температура теплового отключения, °С	176

На рисунке 9 представлено условное графическое обозначение микросхемы.

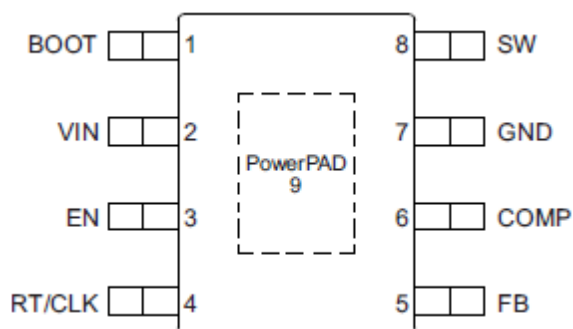


Рисунок 9 – УГО микросхемы TPS54560B

Контакт VIN предназначен для подключения входного напряжения питания с рабочим диапазоном от 4,5 В до 60 В.

Контакт EN предназначен для защиты от подачи пониженного напряжения. С помощью резистора можно регулировать напряжение, с которого микросхема начинает работать.

Контакт RT/CLK предназначен для установки частоты переключения. С помощью внешнего резистора можно регулировать значение частоты переключения.

Контакт FB – вход компаратора обратной связи по выходному напряжению. Подключается к делителю напряжения, с помощью которого устанавливается выходное напряжение.

Контакт COMP предназначен для подключения компонентов частотной компенсации. Выход для подключения внешней цепи частотной коррекции. Является выходом усилителя ошибки

Контакт SW – коммутационный узел преобразователя. Между выводами BOOT и SW требуется загрузочный конденсатор. Если напряжение на этом конденсаторе ниже минимума, необходимого для работы высокочастотного МОП-транзистора, выход выключается до тех пор, пока конденсатор не будет обновлен.

Для данной платы управления необходимо два преобразователя напряжения, один из которых нужен для питания микроконтроллера

напряжением 3,3 В, другой для питания подсветки и электромагнитного замка питанием 12 В.

1.5.1 Расчет преобразователя напряжения 24 В – 12 В

1.5.1.1 Расчет максимальной частоты переключения $f_{SW(max)}$ и резистора $R_{RT/CLK}$

Вычислим максимальную частоту переключения $f_{SW(max)}$ по формуле (10).

$$f_{SW(max)} = \frac{1}{t_{ON}} \cdot \left(\frac{I_{OUT} \cdot R_{dc} + V_{OUT} + V_d}{V_{IN} - I_{OUT} \cdot R_{DS(on)} + V_d} \right), \quad (10)$$

где t_{ON} – минимальное время включения, с; I_{OUT} – выходной ток, А; R_{dc} – сопротивление катушки, Ом; V_{OUT} – выходное напряжение, В; V_d – падение напряжения на диоде, В; V_{IN} – входное напряжение, В; $R_{DS(on)}$ – сопротивление внутреннего переключателя, Ом.

Выберем диод STPS5L60S ($V_d = 0,42$ В) и катушку XAL1510-333МЕВ ($L = 33$ мкГн, $R_{dc} = 0,0187$ Ом).

Из документации на микросхему: $t_{ON} = 135$ нс, $R_{DS(on)} = 92$ мОм.

Из задания $V_{IN} = 24$ В, $V_{OUT} = 12$ В, $I_{OUT} = 4$ А,

Подставив значения в формулу (10), получим

$$f_{SW(max)} = \frac{1}{135 \cdot 10^{-9}} \cdot \left(\frac{4 \cdot 0,0187 + 12 + 0,42}{24 - 4 \cdot 0,092 + 0,42} \right) = 3,87 \text{ МГц}$$

Вычислим сопротивления резистора между контактом RT/CLK и GND по формуле (11).

$$R_{RT/CLK} = \frac{101756}{f_{SW}^{1,008}} = \frac{101756}{1000^{1,008}} = 96,29 \text{ кОм} \quad (11)$$

Выбираем $f_{SW} = 2$ МГц и $R_{RT/CLK} = 97,6$ кОм.

1.5.1.2 Расчет минимального значения индуктивности

Для расчета минимального значения индуктивности используем формулу (12).

$$L_{min} = \frac{V_{IN} - V_{OUT}}{I_{OUT} \cdot K_{IND}} \cdot \frac{V_{OUT}}{V_{IN} \cdot f_{SW}}, \quad (12)$$

где K_{IND} – коэффициент, рекомендуемое значение которого равно $K_{IND} = 0,3$.

Подставив значения в формулу (12), получим

$$L_{min} = \frac{24 - 12}{4 \cdot 0,3} \cdot \frac{12}{24 \cdot 2 \cdot 10^6} = 5 \text{ мкГн}$$

Для расчета тока пульсации используем формулу (13).

$$I_{RIPPLE} = \frac{V_{OUT} \cdot (V_{IN} - V_{OUT})}{V_{IN} \cdot L \cdot f_{SW}} = \frac{12 \cdot (24 - 12)}{24 \cdot 33 \cdot 10^{-6} \cdot 10^6} = 0,181 \text{ А} \quad (13)$$

Для расчета пикового тока индуктивности используем формулу (14).

$$I_{L(peak)} = I_{OUT} + \frac{I_{RIPPLE}}{2} = 4 + \frac{0,181}{2} = 4,09 \text{ А} \quad (14)$$

Оставляем выбранную катушку индуктивности XAL1510-333МЕВ ($L = 33 \text{ мкГн}$, $R_{dc} = 0,0187 \text{ Ом}$, $I_{sat} = 8,6 \text{ А}$).

1.5.1.3 Расчет выходной емкости

Расчет выходной емкости C_{OUT} по току пульсации выполняется по формуле (15).

$$C_{OUT} > \frac{1}{8 \cdot f_{SW}} \cdot \frac{I_{RIPPLE}}{V_{OUT(RIPPLE)}}, \quad (15)$$

где $V_{OUT(RIPPLE)} = 25 \text{ мВ}$ – максимально допустимая пульсация выходного напряжения.

Подставив значения в формулу (15), получим

$$C_{OUT} > \frac{1}{8 \cdot f_{SW}} \cdot \frac{I_{RIPPLE}}{V_{OUT(RIPPLE)}} = \frac{1}{8 \cdot 10^6} \cdot \frac{0,181}{25 \cdot 10^{-3}} = 0,905 \text{ мкФ}$$

Эквивалентное последовательное сопротивление конденсатора должно быть меньше значения, которое рассчитывается по формуле (16).

$$R_{ESR} < \frac{V_{OUT(RIPPLE)}}{I_{RIPPLE}} = \frac{25 \cdot 10^{-3}}{0,181} = 138 \text{ мОм} \quad (16)$$

Используем керамический конденсатор 22 мкФ, 10 В, X5R.

1.5.1.4 Расчет входной емкости

Найдем номинал входного конденсатора. Номинальное напряжение входного конденсатора должно быть больше максимального входного напряжения. Конденсатор также должен иметь номинальный пульсационный ток, превышающий максимальную пульсацию входного тока.

Расчет входного тока пульсации выполняется по формуле (17).

$$I_{CI} = I_{OUT} \cdot \sqrt{\frac{V_{OUT}}{V_{IN(min)}} \cdot \frac{(V_{IN(min)} - V_{OUT})}{V_{IN(min)}}} = 4 \cdot \sqrt{\frac{12}{20} \cdot \frac{(20 - 12)}{20}} = 1,96 \text{ А} \quad (17)$$

Выбираем три параллельно соединенных керамических конденсатора 2,2 мкФ, 100 В, X7R.

1.5.1.5 Выбор конденсатора между выводами BOOT и SW

Для правильной работы между выводами BOOT и SW рекомендуется использовать керамический конденсатор емкостью 0,1 мкФ с диэлектриком X5R или лучше и номинальным напряжением не менее 10 В.

Используем керамический конденсатор 0,1 мкФ, 50 В, X7R.

1.5.1.6 Расчет резисторов делителя напряжения на выводе EN

Расчет резисторов делителя напряжения на выводе EN выполняется по формулам (18) и (19). Напряжение остановки V_{STOP} должно быть равно минимальному входному напряжению, следовательно, $V_{STOP} = 20$ В. Напряжение старта V_{START} обычно выбирают больше V_{STOP} на 0,5 В, следовательно, $V_{START} = 20,5$ В.

$$R_{UVLO1} = \frac{V_{START} - V_{STOP}}{I_{HYS}}, \quad (18)$$

$$R_{UVLO2} = \frac{V_{ENA}}{\frac{V_{START} - V_{ENA}}{R_{UVLO1}} + I_1}, \quad (19)$$

где V_{START} – напряжение включения, В; V_{STOP} – напряжение остановки работы, В; I_{HYS} – ток гистерезиса, А; V_{ENA} – пороговое напряжение, В; I_1 – входной ток вывода EN, А;

Напряжение остановки V_{STOP} должно быть равно минимальному входному напряжению, следовательно, $V_{STOP} = 20$ В. Напряжение старта V_{START} обычно выбирают больше V_{STOP} на 0,5 В, следовательно, $V_{START} = 20,5$ В.

Из документации: $I_{HYS} = 3,4$ мкА, $V_{ENA} = 1,2$ В, $I_1 = 1,2$ мкА.

Подставив значения в формулы (18) и (19), получим

$$R_{UVLO1} = \frac{V_{START} - V_{STOP}}{I_{HYS}} = \frac{20,5 - 20}{3,4 \cdot 10^{-6}} = 147 \text{ кОм}$$

$$R_{UVLO2} = \frac{1,2}{\frac{20,5 - 1,2}{147 \cdot 10^3} + 1,2 \cdot 10^{-6}} = 4,47 \text{ кОм}$$

Используем резисторы 147 кОм и 4,42 кОм.

1.5.1.7 Расчет резисторов делителя напряжения на выводе FB

Расчет резисторов R_{HS} и R_{LS} делителя напряжения на выводе FB

выполняется по формуле (20).

$$R_{HS} = R_{LS} \cdot \frac{V_{OUT} - 0,8}{0,8} \quad (20)$$

Рекомендованное значение $R_{LS} = 10,2$ кОм. Подставив значения в формулу (20), получим

$$R_{HS} = 10,2 \cdot 10^3 \cdot \frac{12 - 0,8}{0,8} = 142,8 \text{ кОм}$$

Используем резисторы 10,2 кОм и 140 кОм.

1.5.1.8 Расчет резистора на выводе COMP

Расчет резистора на выводе COMP выполняется по формуле (21).

$$R_{COMP} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_{c0} \cdot C_{OUT}}{gmps} \cdot \frac{V_{OUT}}{V_{REF} \cdot gmea}, \quad (21)$$

где $gmps = 17$ А/В; $V_{REF} = 0,8$ В; $gmea = 350$ мкА/В; f_{c0} рассчитывается по формуле (22).

$$f_{c0} = \sqrt{f_{p(mod)} \cdot \frac{f_{SW}}{2}}, \quad (22)$$

где $f_{p(mod)}$ рассчитывается по формуле (23).

$$f_{p(mod)} = \frac{I_{OUT}}{2 \cdot \pi \cdot V_{OUT} \cdot C_{OUT}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 3,3 \cdot 22 \cdot 10^{-6}} = 2193 \text{ Гц} \quad (23)$$

Подставив значения в формулу (22), получим

$$f_{c0} = \sqrt{f_{p(mod)} \cdot \frac{f_{SW}}{2}} = \sqrt{1450 \cdot \frac{10^6}{2}} = 26,9 \text{ кГц}$$

Подставив значения в формулу (21), получим

$$R_{COMP} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_{c0} \cdot C_{OUT}}{g_{mps}} \cdot \frac{V_{OUT}}{V_{REF} \cdot g_{mea}} =$$

$$= \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 26,9 \cdot 10^3 \cdot 22 \cdot 10^{-6}}{17} \cdot \frac{3,3}{0,8 \cdot 350 \cdot 10^{-6}} = 2,6 \text{ кОм}$$

Используем резистор на 2,7 кОм.

1.5.1.9 Расчет конденсаторов на выводе COMP

Расчет конденсаторов на выводе COMP выполняется по формулам (24) и (25).

$$C_{COMP1} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_{COMP} \cdot f_{p(mod)}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 2,6 \cdot 10^3 \cdot 2193} = 27,9 \text{ нФ} \quad (24)$$

$$C_{COMP2} = \frac{1}{R_{COMP} \cdot f_{SW} \cdot \pi} = \frac{1}{2,6 \cdot 10^3 \cdot 10^6 \cdot 3,14} = 122 \text{ пФ} \quad (25)$$

Используем конденсатор 0,033 мкФ, 50 В, NPO, и конденсатор 100 пФ, 50 В, NPO.

1.5.2 Схема преобразователя напряжения 24 В – 12 В

Схема со всеми рассчитанными компонентами преобразователя напряжения приведена на рисунке 10.

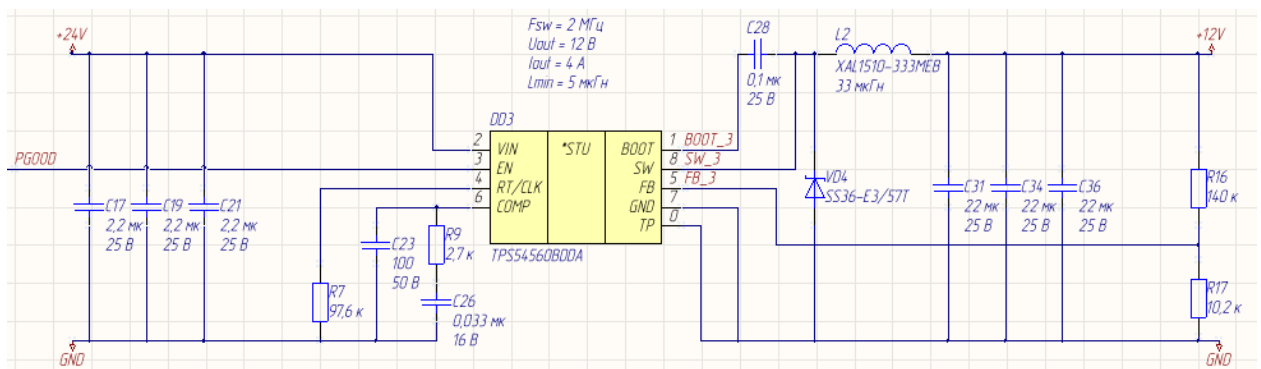


Рисунок 10 – Схема преобразователя напряжения 24 В – 12 В

1.5.3 Расчет преобразователя напряжения 24 В – 3,3 В

1.5.3.1 Расчет максимальной частоты переключения $f_{SW(max)}$ и резистора $R_{RT/CLK}$

Вычислим максимальную частоту переключения $f_{SW(max)}$ по формуле (26).

$$f_{SW(max)} = \frac{1}{t_{ON}} \cdot \left(\frac{I_{OUT} \cdot R_{dc} + V_{OUT} + V_d}{V_{IN} - I_{OUT} \cdot R_{DS(on)} + V_d} \right), \quad (26)$$

где t_{ON} – минимальное время включения, с; I_{OUT} – выходной ток, А; R_{dc} – сопротивление катушки, Ом; V_{OUT} – выходное напряжение, В; V_d – падение напряжения на диоде, В; V_{IN} – входное напряжение, В; $R_{DS(on)}$ – сопротивление внутреннего переключателя, Ом.

Выберем диод SS36-E3/57T ($V_d = 0,75$ В) и катушку SRP7028A-220M ($L = 22$ мкГн, $R_{dc} = 0,165$ Ом).

Из документации на микросхему: $t_{ON} = 135$ нс, $R_{DS(on)} = 92$ мОм.

Из задания $V_{IN} = 24$ В, $V_{OUT} = 3,3$ В, $I_{OUT} = 1$ А,

Подставив значения в формулу (26), получим

$$f_{SW(max)} = \frac{1}{135 \cdot 10^{-9}} \cdot \left(\frac{1 \cdot 0,165 + 3,3 + 0,75}{24 - 1 \cdot 0,092 + 0,75} \right) = 1266 \text{ кГц}$$

Вычислим сопротивления резистора между контактом RT/CLK и GND по формуле (27).

$$R_{RT/CLK} = \frac{101756}{f_{SW}^{1,008}} = \frac{101756}{1000^{1,008}} = 96,3 \text{ кОм} \quad (27)$$

Выбираем $f_{SW} = 1000$ кГц и $R_{RT/CLK} = 97,6$ кОм.

1.5.3.2 Расчет минимального значения индуктивности

Для расчета минимального значения индуктивности используем формулу (28).

$$L_{min} = \frac{V_{IN} - V_{OUT}}{I_{OUT} \cdot K_{IND}} \cdot \frac{V_{OUT}}{V_{IN} \cdot f_{SW}}, \quad (28)$$

где K_{IND} – коэффициент, рекомендуемое значение которого равно $K_{IND} = 0,3$.

Подставив значения в формулу (28), получим

$$L_{min} = \frac{24 - 3,3}{1 \cdot 0,3} \cdot \frac{3,3}{24 \cdot 1000 \cdot 10^3} = 9,5 \text{ мкГн}$$

Для расчета тока пульсации используем формулу (29).

$$I_{RIPPLE} = \frac{V_{OUT} \cdot (V_{IN} - V_{OUT})}{V_{IN} \cdot L \cdot f_{SW}} = \frac{3,3 \cdot (24 - 3,3)}{24 \cdot 22 \cdot 10^{-6} \cdot 10^6} = 0,129 \text{ А} \quad (29)$$

Для расчета пикового тока индуктивности используем формулу (30).

$$I_{L(peak)} = I_{OUT} + \frac{I_{RIPPLE}}{2} = 1 + \frac{0,129}{2} = 1,065 \text{ А} \quad (30)$$

Оставляем выбранную катушку индуктивности SRP7028A-220M ($L = 22 \text{ мкГн}$, $R_{dc} = 0,165 \text{ Ом}$, $I_{sat} = 3,5 \text{ А}$).

1.5.3.3 Расчет выходной емкости

Расчет выходной емкости C_{OUT} по току пульсации выполняется по формуле (31).

$$C_{OUT} > \frac{I}{8 \cdot f_{SW}} \cdot \frac{I_{RIPPLE}}{V_{OUT(RIPPLE)}}, \quad (31)$$

где $V_{OUT(RIPPLE)} = 25 \text{ мВ}$ – максимально допустимая пульсация выходного напряжения.

Подставив значения в формулу (31), получим

$$C_{OUT} > \frac{I}{8 \cdot f_{SW}} \cdot \frac{I_{RIPPLE}}{V_{OUT(RIPPLE)}} = \frac{I}{8 \cdot 10^6} \cdot \frac{0,129}{25 \cdot 10^{-3}} = 0,645 \text{ мкФ}$$

Эквивалентное последовательное сопротивление конденсатора должно быть меньше значения, которое рассчитывается по формуле (32).

$$R_{ESR} < \frac{V_{OUT(RIPPLE)}}{I_{RIPPLE}} = \frac{25 \cdot 10^{-3}}{0,129} = 194 \text{ мОм} \quad (32)$$

Используем керамический конденсатор 22 мкФ, 10 В, X5R.

1.5.3.4 Расчет входной емкости

Найдем номинал входного конденсатора. Номинальное напряжение входного конденсатора должно быть больше максимального входного напряжения. Конденсатор также должен иметь номинальный пульсационный ток, превышающий максимальную пульсацию входного тока.

Расчет входного тока пульсации выполняется по формуле (33).

$$\begin{aligned} I_{CI} &= I_{OUT} \cdot \sqrt{\frac{V_{OUT}}{V_{IN(min)}} \cdot \frac{(V_{IN(min)} - V_{OUT})}{V_{IN(min)}}} = \\ &= I \cdot \sqrt{\frac{3,3}{20} \cdot \frac{(20 - 3,3)}{20}} = 0,371 \text{ А} \end{aligned} \quad (33)$$

Выбираем три параллельно соединенных керамических конденсатора 2,2 мкФ, 100 В, X7R.

1.5.3.5 Выбор конденсатора между выводами BOOT и SW

Для правильной работы между выводами BOOT и SW рекомендуется использовать керамический конденсатор емкостью 0,1 мкФ с диэлектриком X5R или лучше и номинальным напряжением не менее 10 В.

Используем керамический конденсатор 0,1 мкФ, 50 В, Х7R.

1.5.3.6 Расчет резисторов делителя напряжения на выводе EN

Расчет резисторов делителя напряжения на выводе EN выполняется по формулам (34) и (35). Напряжение остановки V_{STOP} должно быть равно минимальному входному напряжению, следовательно, $V_{STOP} = 20 В$. Напряжение старта V_{START} обычно выбирают больше V_{STOP} на 0,5 В, следовательно, $V_{START} = 20,5 В$.

$$R_{UVLO1} = \frac{V_{START} - V_{STOP}}{I_{HYS}}, \quad (34)$$

$$R_{UVLO2} = \frac{V_{ENA}}{\frac{V_{START} - V_{ENA}}{R_{UVLO1}} + I_I}, \quad (35)$$

где V_{START} – напряжение включения, В; V_{STOP} – напряжение остановки работы, В; I_{HYS} – ток гистерезиса, А; V_{ENA} – пороговое напряжение, В; I_I – входной ток вывода EN, А;

Напряжение остановки V_{STOP} должно быть равно минимальному входному напряжению, следовательно, $V_{STOP} = 20 В$. Напряжение старта V_{START} обычно выбирают больше V_{STOP} на 0,5 В, следовательно, $V_{START} = 20,5 В$.

Из документации: $I_{HYS} = 3,4 мкА$, $V_{ENA} = 1,2 В$, $I_I = 1,2 мкА$.

Подставив значения в формулы (34) и (35), получим

$$R_{UVLO1} = \frac{V_{START} - V_{STOP}}{I_{HYS}} = \frac{20,5 - 20}{3,4 \cdot 10^{-6}} = 147 кОм$$

$$R_{UVLO2} = \frac{1,2}{\frac{20,5 - 1,2}{147 \cdot 10^3} + 1,2 \cdot 10^{-6}} = 4,47 кОм$$

Используем резисторы 147 кОм и 4,42 кОм.

1.5.3.7 Расчет резисторов делителя напряжения на выводе FB

Расчет резисторов R_{HS} и R_{LS} делителя напряжения на выводе FB выполняется по формуле (36).

$$R_{HS} = R_{LS} \cdot \frac{V_{OUT} - 0,8}{0,8} \quad (36)$$

Рекомендованное значение $R_{LS} = 10,2 \text{ кОм}$. Подставив значения в формулу (36), получим

$$R_{HS} = 10,2 \cdot 10^3 \cdot \frac{3,3 - 0,8}{0,8} = 31,9 \text{ кОм}$$

Используем резисторы 10,2 кОм и 33 кОм.

1.5.3.8 Расчет резистора на выводе COMP

Расчет резистора на выводе COMP выполняется по формуле (37).

$$R_{COMP} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_{c0} \cdot C_{OUT}}{gmps} \cdot \frac{V_{OUT}}{V_{REF} \cdot gmea}, \quad (37)$$

где $gmps = 17 \text{ А/В}$; $V_{REF} = 0,8 \text{ В}$; $gmea = 350 \text{ мкА/В}$; f_{c0} рассчитывается по формуле (38).

$$f_{c0} = \sqrt{f_{p(mod)} \cdot \frac{f_{SW}}{2}}, \quad (38)$$

где $f_{p(mod)}$ рассчитывается по формуле (39).

$$f_{p(mod)} = \frac{I_{OUT}}{2 \cdot \pi \cdot V_{OUT} \cdot C_{OUT}} = \frac{I}{2 \cdot 3,14 \cdot 3,3 \cdot 22 \cdot 10^{-6}} = 2193 \text{ Гц} \quad (39)$$

Подставив значения в формулу (38), получим

$$f_{c0} = \sqrt{f_{p(mod)} \cdot \frac{f_{SW}}{2}} = \sqrt{1450 \cdot \frac{10^6}{2}} = 26,9 \text{ кГц}$$

Подставив значения в формулу (37), получим

$$\begin{aligned} R_{COMP} &= \frac{2 \cdot \pi \cdot f_{c0} \cdot C_{OUT}}{gmps} \cdot \frac{V_{OUT}}{V_{REF} \cdot gmea} = \\ &= \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 26,9 \cdot 10^3 \cdot 22 \cdot 10^{-6}}{17} \cdot \frac{3,3}{0,8 \cdot 350 \cdot 10^{-6}} = 2,6 \text{ кОм} \end{aligned}$$

Используем резистор на 2,7 кОм.

1.5.3.9 Расчет конденсаторов на выводе COMP

Расчет конденсаторов на выводе COMP выполняется по формулам (38) и (39).

$$C_{COMP1} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_{COMP} \cdot f_{p(mod)}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 2,6 \cdot 10^3 \cdot 2193} = 27,9 \text{ нФ} \quad (38)$$

$$C_{COMP2} = \frac{1}{R_{COMP} \cdot f_{SW} \cdot \pi} = \frac{1}{2,6 \cdot 10^3 \cdot 10^6 \cdot 3,14} = 122 \text{ пФ} \quad (39)$$

Используем конденсатор 0,033 мкФ, 50 В, NPO, и конденсатор 100 пФ, 50 В, NPO.

1.5.4 Схема преобразователя напряжения 24 В – 3,3 В

Схема со всеми рассчитанными компонентами преобразователя напряжения приведена на рисунке 11.

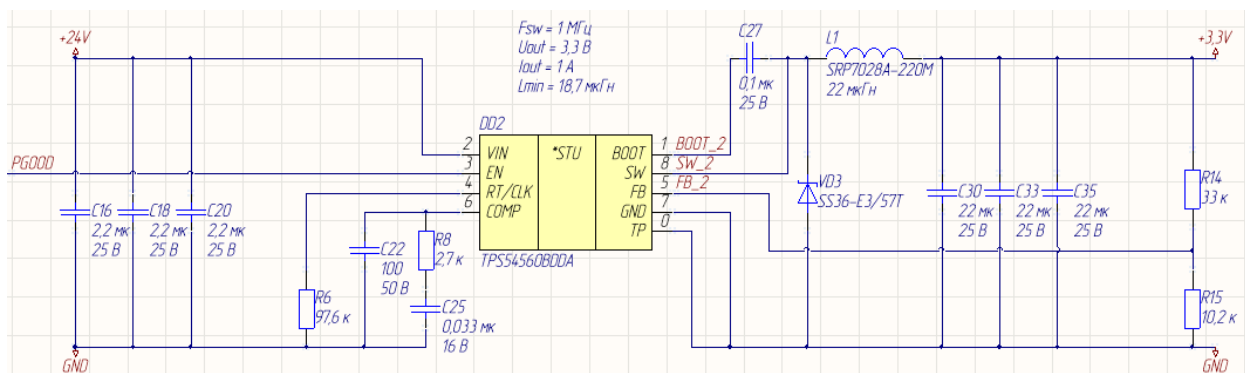


Рисунок 10 – Схема преобразователя напряжения 24 В – 3,3 В

1.6 Трансивер

Взаимодействие между различными цифровыми устройствами осуществляется при помощи интерфейсов. Для разрабатываемой платы управления необходимо обеспечить взаимодействия с платой управления нагревом и с материнской платой по стандарту RS-232.

RS-232 – стандарт физического уровня для интерфейса UART, определяющий уровни напряжения между двумя устройствами. Некоторые из этих уровней напряжения являются отрицательными, и они также могут достигать ± 15 В. Большой перепад напряжения делает RS-232 более устойчивым к помехам. Однако микроконтроллер не может самостоятельно генерировать такие уровни напряжения. Поэтому необходимо использовать дополнительный компонент – трансивер, позволяющий переводить сигналы UART в RS-232 и обратно.

1.6.1 Выбор трансивера

Поскольку для данной задачи необходимо разработать взаимодействие с двумя другими устройствами, то имеет смысл использовать двухканальный трансивер. Поэтому был выбран трансивер TRS3122E [4].

TRS3122E – это двухканальный трансивер интерфейса RS-232. Все входы и выходы RS-232 защищены от статических разрядов. Трансивер имеет

схему сдвига уровня и встроенный DC-DC преобразователь на переключаемых конденсаторах, что обеспечивает работоспособность микросхемы при питающих напряжениях от 1,8 В до 5 В. Входы питания логической части и DC-DC преобразователя разделены для упрощения подключения низковольтных микроконтроллеров или UART. Функция Auto Powerdown Plus автоматически переводит устройство в режим низкого энергопотребления, если не передавались или не принимались данные более 30 секунд.

1.6.2 Схема трансивера TRS3122E

Схема трансивера приведена на рисунке 11.

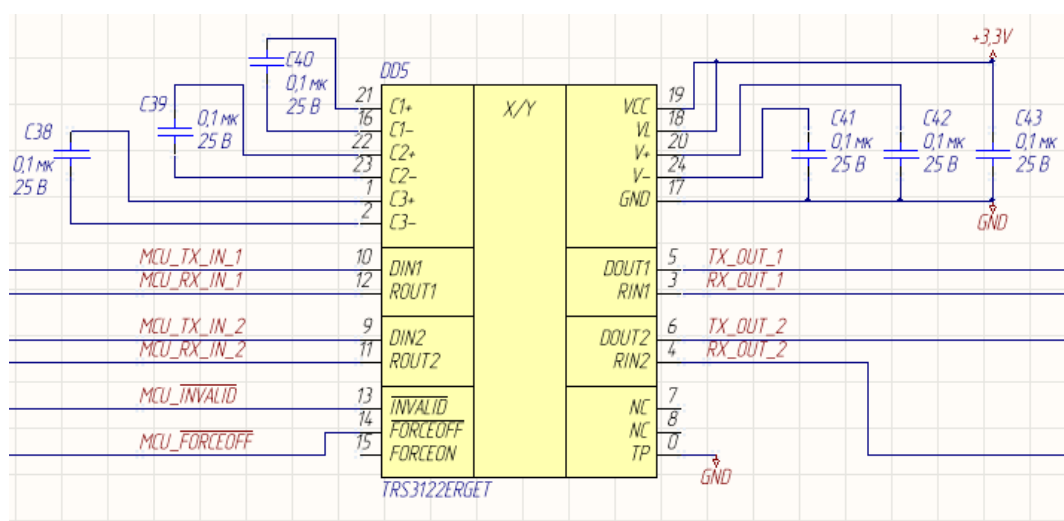


Рисунок 11 – Схема трансивера

Емкость конденсаторов C38, C39, C40 было подобрано в соответствии с требованиями документации [1] на питающее напряжение 3,3 В.

1.7 Программатор STM32

В микроконтроллерах STM32 есть удобный интерфейс для отладки и прошивки микроконтроллера – SWD (Serial Wire Debug). Схема приведена на

рисунке 12.

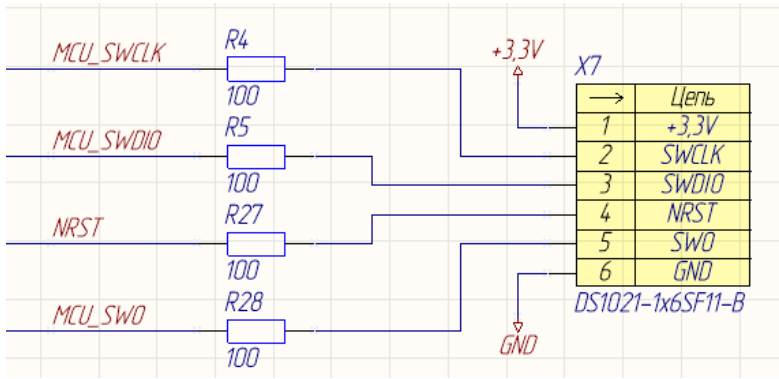


Рисунок 12 – Программатор

1.8 Кнопка notReset

Кнопка notReset, представленная на рисунке 13, необходима для ручного перезапуска микроконтроллера.

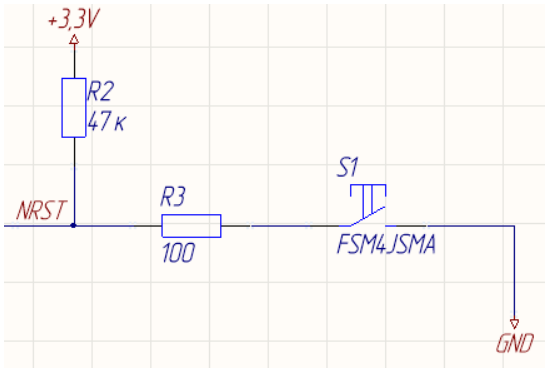


Рисунок 13 – кнопка notReset

1.9 Защита от переплюсовки

Для защиты от переплюсовки используется полевой транзистор CSD19532Q5B. В случае правильного подключения питания и земли транзистор откроется, в противном случае он будет закрыт.

Напряжение затвор-исток данного транзистора не должно превосходить 20В, а входное напряжение 24В, поэтому для стабилизации напряжения используется стабилитрон BZD17C15P с номинальным напряжением стабилизации 15В. Также для защиты данного стабилитрона в случае переплюсовки предусмотрен диод Шоттки.

Расчет сопротивления резистора выполняется по формуле (40)

$$R = \frac{U_{\text{вх}} - U_{\text{стаб}} - U_{\text{д}}}{I_{\text{стаб}}}, \quad (40)$$

где $U_{\text{вх}}$ – входное напряжение, $U_{\text{д}}$ – падение напряжения на диоде Шоттки SS36-E3/57T.

Чтобы найти падение напряжения на диоде Шоттки, необходимо из документации на компонент найти зависимость прямого падения напряжения от тока и температуры. График, приведенный на рисунке 14, отражает данную зависимость. При температуре $T_j = 25^\circ\text{C}$ и токе $I = 0,05\text{A}$ падение напряжения на диоде Шоттки $U_{\text{д}} = 0,25\text{ В}$.

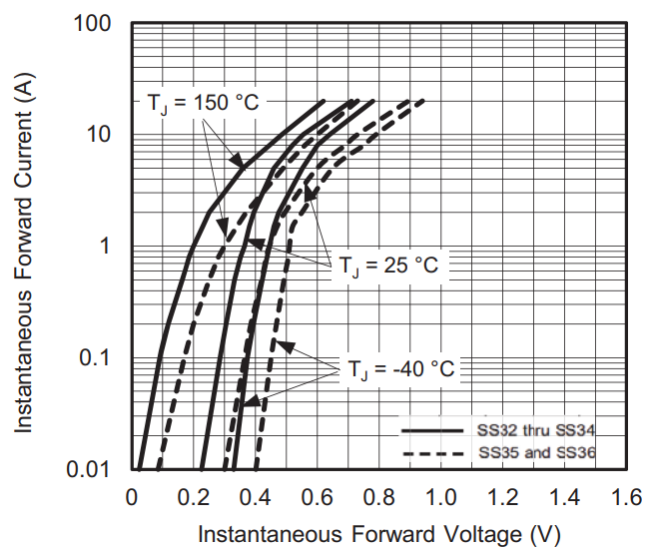


Рисунок 14 – Зависимость прямого падения напряжения от тока и температуры диода Шоттки.

Рассчитаем сопротивления резистора для максимально возможного входного напряжения $U_{\text{вх}} = 24\text{ В}$.

$$R = \frac{24 - 15 - 0,25}{0,05} = 175\text{ Ом}$$

Используем резистор 180 Ом.

Схема защиты от переплюсовки приведена на рисунке 15.

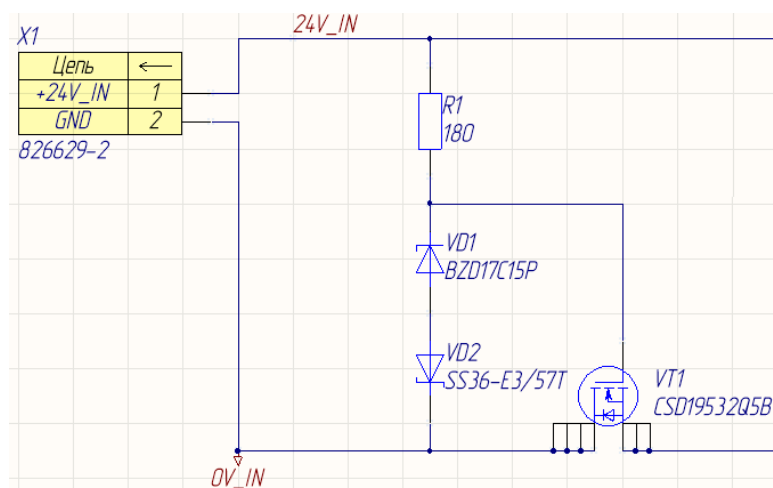


Рисунок 15 – Защита от переплюсовки

1.10 Разъемы

Разъемы для печатных плат — это типы соединительных систем, которые монтируются или обрабатываются на печатной плате. Существует множество разъемов для печатных плат, которые лучше всего подходят для конкретных целей. Для конкретной задачи разъемы выбирались исходя из следующих критериев: дешевизна, простота монтажа и различимость между двумя разъемами. Исходя из этих критериев были выбраны следующие разъемы:

- Два разъема DS1069-3MRW6XA для RS-232, имеющие по три контакта.
- Два разъема 1776275-2 для питания электромагнитного замка и подсветки
- Два разъема 826629-2. Один для подачи питания на палату 24В, другой для подключения концевого выключателя.
- Разъем DS1021-1x6SF11-B для программатора

2 Трассировка платы управления

Трассировка соединений является заключительным этапом конструкторского проектирования радиоэлектронной аппаратуры и состоит в определении линий, соединяющих эквипотенциальные контакты элементов, и компонентов, составляющих проектируемое устройство. Основная задача трассировки формулируется следующим образом: по заданной схеме соединений проложить необходимые проводники на плоскости (плате, кристалле и т. д.), чтобы реализовать заданные технические соединения с учётом заранее заданных ограничений. Основными являются ограничения на ширину проводников и минимальные расстояния между ними.

Были расставлены компоненты на плате и проведена трассировка соединений. 3-Д модель печатной платы приведена в приложении А. Четыре слоя с трассировкой приведены в приложении Б.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

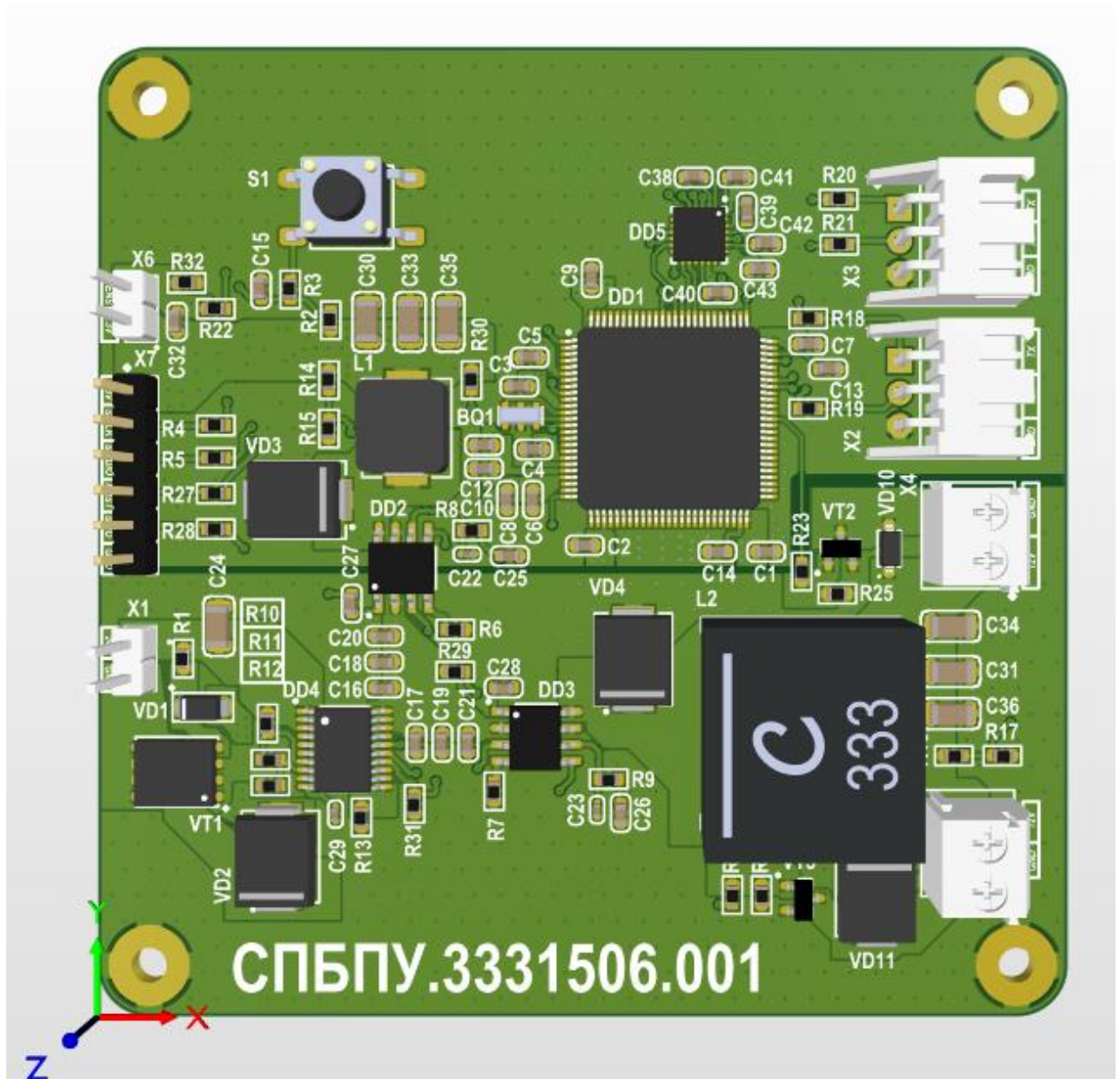
В курсовой работе была разработана плата управления, обеспечивающая все необходимые требования. Дано описание ключевых компонентов, выполнен расчет электронных компонентов схемы.

В результате выполнения работы были предоставлены принципиальная электрическая схема, файлы производства, перечень электронных компонентов и файлы проекта Altium Designer.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Микропереключатели ПМ22 [Электронный ресурс]. URL: <https://doc.platan.ru/pdf/datasheets/russia/pm22.pdf> (дата обращения: 18.04.2021).
2. TPS16630PWPR | Buy TI parts | TI.com [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ti.com/store/ti/en/p/product/?p=TPS16630PWPR> (дата обращения: 18.04.2021).
3. TPS54560B data sheet, product information and support | TI.com [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ti.com/product/TPS54560B> (дата обращения: 18.04.2021).
4. TRS3122E data sheet, product information and support | TI.com [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ti.com/product/TRS3122E> (дата обращения: 18.04.2021).

3Д-модель печатной платы



ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Трассировка печатной платы

