

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

ОТЧЁТ

по лабораторной работе №2

Дисциплина: Программирование микроконтроллеров для управления роботами

Тема: Вторичный источник питания

Студент гр. 3331506/70401

<подпись>

А.А. Ларионов

Преподаватель

<подпись>

Д.А. Капустин

«__»_____2020 г.

Санкт-Петербург

2020

СОДЕРЖАНИЕ

ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ.....	3
ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 Описание ключевых элементов схемы.....	5
1.1 Защита от напряжения обратной полярности и перенапряжения.....	5
1.2 Преобразователь напряжения.....	8
2 Расчет и выбор элементов обвязки.....	10
2.1 Элементы обвязки LM5160-Q1.....	11
2.2 Элементы обвязки TPS2660.....	20
2.3 Светодиоды, кнопка и предохранитель.....	24
3 Расчет стоимости производства печатной платы.....	26
3.1 Стоимость текстолита.....	26
3.2 Стоимость компонентов.....	26
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	29
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	30
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Принципиальная электрическая схема.....	31
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. 3D-модель печатной платы.....	32
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Трассировка печатной платы (верхний и нижний слой).....	33
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Перечень электронных компонентов.....	34

ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ

Разработать понижающий преобразователь DC/DC 12 В/5 В на основе микросхемы LM5160-Q1 ф. Texas Instruments. Мощность преобразователя 10 Вт. Преобразователь должен обеспечивать работу в диапазоне входных напряжений от 10 В до 16 В. Преобразователь должен быть защищен от подачи напряжения обратной полярности, а также от подачи напряжения больше 16 В. В устройстве должна присутствовать индикация напряжения питания на выходе. Выход преобразователя должен быть защищен предохранителем.

Для выполнения задания использовать САПР Altium Designer. Предоставить файлы проекта Altium Designer, принципиальную электрическую схему изделия, файлы для производства печатной платы, перечень электронных компонентов и отчет по лабораторной работе.

ВВЕДЕНИЕ

Зачастую электронная аппаратура или ее составные части требуют для питания постоянного напряжения различной величины и полярности. Среди схем, связанных с преобразованием напряжения, наиболее популярной считается понижающая. Уменьшить входное напряжение можно несколькими способами. Например, с помощью линейного или импульсного преобразователя напряжения. Линейный преобразователь работает по принципу резистивного делителя напряжения, поэтому его недостаток очевиден – чем больше разница напряжений между входом и выходом, тем меньше КПД. Импульсный преобразователь использует ключевой режим работы транзистора и индуктивные накопители энергии, что позволяет свети на нет потери мощности на силовых полупроводниковых компонентах даже при большом соотношении напряжений. Это его главное преимущество. Однако есть и недостатки: пульсирующий характер выходного напряжения, что требует установки фильтров, уменьшающих пульсации; как следствие, большие физические размеры преобразователя. Т.к. каждый из рассмотренных способов обладает своими достоинствами и недостатками, в современном оборудовании используются оба решения, причем взаимно дополняющие друг друга.

В работе ставится задача разработать импульсный понижающий преобразователь. Это позволит приобрести полезные практические навыки проектирования этого важного узла многих электронных устройств.

1 Описание ключевых элементов схемы

Разрабатываемое устройство соответствует схеме, представленной на рисунке 1. На входе и выходе устройства ставятся одинаковые разъемы типа АТХ на четыре контакта, максимальное напряжение и ток которых равны 250 В и 9 А соответственно. Ключевые элементы схемы – защита от напряжения обратной полярности и перенапряжения, а также преобразователь напряжения. Защита организуется на базе микросхемы TPS2660 ф. Texas Instruments. Преобразователь – на основе микросхемы LM5160-Q1, согласно заданию. Элементы обвязки обсуждаются в последующих главах.

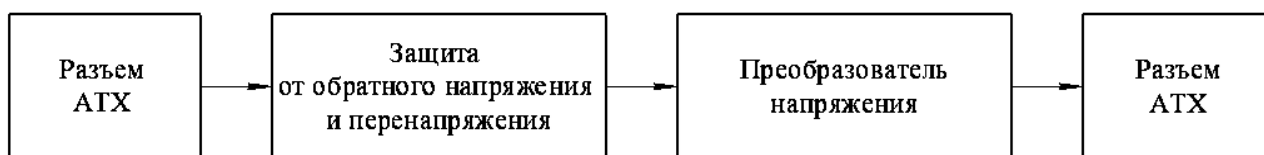


Рисунок 1 – Схема устройства

1.1 Защита от напряжения обратной полярности и перенапряжения

Микросхема TPS2660 [1] представляет собой компактный и многофункциональный электронный предохранитель. Широкий диапазон входных напряжений позволяет применять ее во многих популярных цепях постоянного тока. Микросхема защищает нагрузку от напряжения обратной полярности, интегрированные МОП-транзисторы обеспечивают блокировку обратного тока. Также доступны настраиваемые функции для защиты устройства и источника: перегрузка по току, скорость нарастания выходного напряжения, порог низкого напряжения, перенапряжение. Кроме этого, плата имеет встроенную защиту от перегрева. Функции позволяют реализовать горячее подключение. Есть возможность внешнего управления включение/выключением внутренних транзисторов. Для контроля состояния системы устройство обеспечивает выход неисправностей и тока. Настройка поведения устройства в ответ на неисправность тока включает три варианта: автоматический выключатель, защелкивание и автоматический повтор.

Условное графическое изображение (УГО) микросхемы приведено на рисунке 2. Основные параметры приведены в таблице 1.

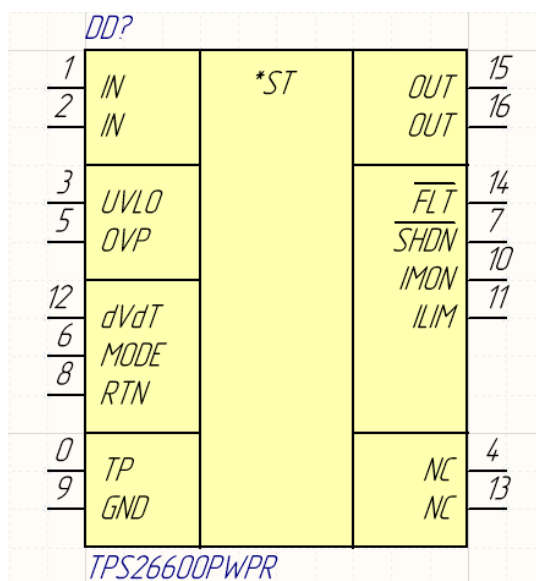


Рисунок 2 – УГО микросхемы TPS2660

Таблица 1 – Параметры микросхемы TPS2660

Параметр	Значение	Размерность
Номинальное напряжение	от 4,2 до 60	В
Максимальное обратное напряжение	-60	В
Номинальный ток	от 0,1 до 2,23	А
Потребление тока (в работе)	300	мкА
Потребление тока (при отключении)	20	мкА
Входное сопротивление	150	МОм
Рабочая температура	-40 до +125	°С
Температура теплового отключения	+157	°С

Входные IN и выходные OUT выводы микросхемы подключаются к источнику питания и нагрузке соответственно.

Вывод RTN является опорным сигналом для внутренних цепей микросхемы. Между RTN и GND находится внутренний блок защиты от напряжения обратной полярности. Подключение RTN к GND отключает эту функцию защиты. Соединение с RTN неактивной площадкой TP под корпусом микросхемы позволит обеспечить лучшие показатели охлаждения.

Вывод UVLO – вход компаратора пониженного напряжения. Вывод не должен оставаться плавающим. Если функция не требуется, вывод должен быть подключен к IN. Подключив вывод к RTN непосредственно, можно включить заводской порог блокировки напряжения 15 В. Чтобы установить иной желаемый порог, необходимо соединить UVLO и RTN через резистивный делитель.

Вывод OVP – вход компаратора перенапряжения. Соединив вывод с RTN непосредственно, можно включить заводской порог блокировки напряжения 33 В. Для установки желаемого порога, требуется подключить резистивный делитель от IN к RTN.

Вывод dVdT предназначен для задания скорости нарастания выходного напряжения при подаче питания. Если оставить вывод плавающим, то устанавливается скорость нарастания по умолчанию, равная 29,9 В/1,6 мс. Подключив конденсатор между dVdT и RTN, можно запрограммировать и меньшее значение скорости нарастания.

Вывод ILIM служит для установки ограничения выходного тока. Значение устанавливается с помощью резистора между выводом и RTN.

В зависимости от конфигурации вывода MODE возможны несколько вариантов реагирования на перегрузку. В данной работе реализуется режим активного ограничения тока с автоматическим повтором, когда вывод соединяется с RTN непосредственно. Во время перегрузки устройство регулирует ток до установленного уровня, при этом выходное напряжение падает, что приводит к увеличению рассеиваемой мощности в устройстве. Если температура достигнет значения теплового отключения, то устройство выключит внутренние транзисторы. Цикл повторного включения начнется через 512 мс после снижения температуры устройства на 10 градусов ниже значения теплового отключения.

Вывод FLT с открытым стоком утверждает низкий уровень при различных неисправностях (пониженное напряжение, перегрузка и др.), в режиме низкого тока и во время пуска. Сигнал остается утвержденным, пока неисправность не

будет устранена и устройство не возобновит нормальную работу. Вывод можно оставить плавающим или подключить к RTN, когда он не используется.

Вывод IMON обладает внутренним источником тока, пропорциональным протекающему от входа к выходу току. Ток на выводе может быть преобразован в напряжение с помощью резистора между IMON и RTN, что может быть использовано внешним микроконтроллером как средство контроля протекающего тока. Если вывод не используется, он должен быть плавающим.

Вывод SHDN служит для отключения внутренних транзисторов и, следовательно, тока нагрузки при подаче на него низкого уровня. Чтобы включить устройство, необходимо подтянуть вывод до напряжения 1 В и выше.

1.2 Преобразователь напряжения

Микросхема LM5160-Q1 [2] представляет собой понижающий преобразователь напряжения со встроенными верхним и нижним МОП-транзисторами. Внутренний усилитель обратной связи регулирует выходное напряжения с точностью $\pm 1\%$ во всем диапазоне рабочих температур. Цепи ограничения пикового и минимального тока защищают устройство от перегрузок. Схема блокировки пониженного напряжения обеспечивает регулирование входного напряжения. Преобразователь можно настроить на работу в двух режимах: непрерывная проводимость и прерывистая проводимость. В режиме непрерывной проводимости возможна реализация изолированного понижающего преобразователя с применением многообмоточного дросселя.

Условное графическое изображение микросхемы приведено на рисунке 3. Основные параметры приведены в таблице 2.

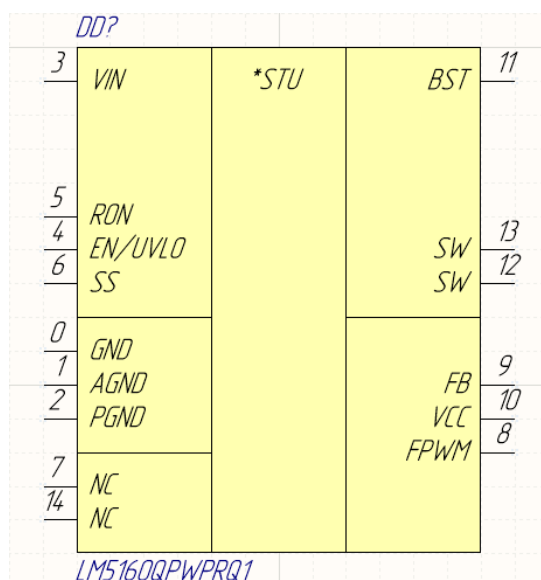


Рисунок 3 – УГО микросхемы LM5160-Q1

Таблица 2 – Параметры микросхемы LM5160-Q1

Параметр	Значение	Размерность
Номинальное напряжение	от 4,5 до 65	В
Номинальный ток	до 2	А
Потребление тока	2,3	мА
Максимальный ток верхнего транзистора	2,875	А
Входное сопротивление	до 0,3	Ом
Частота переключения	до 1	МГц
Рабочая температура	-40 до +150	°С
Температура теплового отключения	+175	°С

Входной VIN и выходные SW выводы микросхемы подключаются к источнику питания и внешней индуктивности соответственно.

Вывод RON служит для установки рабочей частоты переключения транзисторов и, как следствие, среднего значения выходного напряжения. Для задания частоты вывод соединяют с VIN через резистор.

Вывод EN/UVLO предназначен для блокировки пониженного напряжения. Для установки минимального рабочего напряжения следует использовать резистивный делитель от VIN к GND. Если вывод не требуется, его можно подключить к VIN, что установит порог входного напряжения 3,98 В.

Выход SS предназначен для реализации функции плавного пуска, что уменьшает скачки напряжения и тока при включении устройства. Для установки интервала плавного пуска необходимо подключить к выводу конденсатор с емкостью не менее 1 нФ. Интервал плавного пуска заканчивается при зарядке конденсатора до опорного уровня 2 В.

Между выводами BST и SW подключается накопительный конденсатор, обеспечивающий повышение напряжения для включения транзистора.

Выход FB – вход компаратора обратной связи по выходному напряжению. Типичное напряжение на выводе в ходе работы равно 2 В, что обеспечивается резистивным делителем от SW к GND.

Выход VCC – выход линейного регулятора напряжения, который подает питание на внутренние цепи микросхемы. На выводе устанавливается внешний конденсатор для стабилизации возникающих при работе переходных процессов.

В зависимости от конфигурации вывода FPWM устройство может работать в двух режимах: прерывистая или непрерывная проводимость. Режим прерывистой проводимости реализуется при плавающем состоянии вывода или при подключении его к GND. В этом режиме частота переключения уменьшается при незначительных нагрузках, что снижает потери на коммутацию и повышает эффективность. Режим непрерывной проводимости устанавливается при соединении FPWM и VCC. В этом режиме частота переключения остается постоянной при любой нагрузке, что улучшает переходную реакцию на ступенчатое изменение нагрузки, но снижает эффективность при малой нагрузке. В данной работе реализуется режим непрерывной проводимости.

2 Расчет и выбор элементов обвязки

Принципиальная схема разрабатываемого устройства с выбранными элементами обвязки приведена в приложении А.

2.1 Элементы обвязки LM5160-Q1

Проведем расчет и выбор элементов обвязки микросхемы LM5160-Q1 согласно документации [2]. Исходные данные приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Исходные данные для LM5160-Q1

Параметр	Значение	Размерность
Номинальное входное напряжение	12	В
Диапазон входного напряжения	от 10 до 16	В
Выходное напряжение	5	В
Ток нагрузки	2	А
Режим работы	CCM (FPWM = VCC)	—

При заданном выходном напряжении и известном напряжении обратной связи рассчитаем сопротивления резисторов по следующему уравнению

$$\frac{R_{fb2}}{R_{fb1}} = \frac{V_{OUT}}{V_{REF}} - 1, \quad (1)$$

где $V_{OUT} = 5$ – выходное напряжение, В;

$V_{REF} = 2$ – напряжение обратной связи, В.

Из уравнения (1) получим отношение сопротивлений

$$\frac{R_{fb2}}{R_{fb1}} = \frac{5}{2} - 1 = \frac{3}{2}.$$

Согласно отношению, возьмем стандартные номиналы $R_{fb2} = 3$ кОм и $R_{fb1} = 2$ кОм. Выберем резисторы RC0603FR-073KL и RC0603FR-072KL ф. YAGEO Corp. с номинальным напряжением 75В и мощностью 0,1 Вт.

Вычислим максимальную частоту переключения, которая позволяет избежать критического падения выходного напряжения при минимальном входном напряжении. Используем следующее уравнение

$$F_{SWmax} = \frac{V_{INmin} - V_{OUT}}{V_{INmin} \cdot T_{OFFmin}}, \quad (2)$$

где $V_{INmin} = 10$ – минимальное входное напряжение, В;

$T_{OFFmin} = 170 \cdot 10^{-9}$ – минимальное время отключения, с.

Согласно уравнению (2), максимальная частота равна

$$F_{SWmax} = \frac{10 - 5}{10 \cdot 170 \cdot 10^{-9}} = 2,94 \text{ МГц.}$$

Это значение превышает максимальную частоту переключения микросхемы в 1 МГц.

Проведем дополнительный расчет максимальной частоты при максимальном входном напряжении по формуле

$$F_{SWmax} = \frac{V_{OUT}}{V_{INmax} \cdot T_{ONmin}}, \quad (3)$$

где $V_{INmax} = 16$ – максимальное входное напряжение, В;

T_{ONmin} – минимальное время включения, с.

В документации приведены следующие значения минимального времени включения при различных конфигурациях

$$T_{ONmin} = 937 \text{ нс при } V_{IN} = 8 \text{ В,}$$

$$T_{ONmin} = 625 \text{ нс при } V_{IN} = 24 \text{ В.}$$

Для заданном номинальном входном напряжении 12 В аппроксимируем значение минимального времени включения как $T_{ONmin} = 800$ нс.

Вычислим максимальную частоту по формуле (3)

$$F_{SWmax} = \frac{5}{16 \cdot 800 \cdot 10^{-9}} = 391 \text{ кГц.}$$

Принимая полученное значение за максимально возможную частоту переключения, примем номинальную частоту равной $F_{SW} = 300$ кГц.

Определим сопротивление резистора для установки номинальной частоты переключения на основе следующего уравнения

$$R_{ON} = \frac{V_{OUT}}{F_{SW} \cdot 1 \cdot 10^{-10}}. \quad (4)$$

Согласно (4), сопротивление равно

$$R_{ON} = \frac{5}{300 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 10^{-10}} = 167 \text{ кОм.}$$

Возьмем стандартное значение номинала $R_{ON} = 165 \text{ Ом}$. Выберем резистор RC0603FR-07165KL ф. YAGEO Corp. с номинальным напряжением 75В и мощностью 0,1 Вт. Тогда номинальная частота переключения равна

$$F_{SW} = \frac{V_{OUT}}{R_{ON} \cdot 1 \cdot 10^{-10}} = \frac{5}{165 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 10^{-10}} = 303 \text{ кГц},$$

Рассчитаем время включения для полученной частоты по формуле

$$T_{ON} = \frac{R_{ON} \cdot 1 \cdot 10^{-10}}{V_{IN}}, \quad (5)$$

где V_{IN} – номинальное входное напряжение, В.

Подставим значения в (5), найдем

$$T_{ON} = \frac{165 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 10^{-10}}{12} = 1375 \text{ нс}.$$

Рассчитаем минимальное значение индуктивности, исходя из ограничения среднего пульсирующего тока катушки около 40% от максимального тока нагрузки, по следующей формуле

$$L_{min} = \frac{V_{OUT} \cdot (V_{INmax} - V_{OUT})}{V_{INmax} \cdot F_{SW} \cdot I_{OUTmax} \cdot 0,4}, \quad (6)$$

где $I_{OUTmax} = 2$ – максимальный ток нагрузки, А.

Подставив известные значения в (6), получим минимальное значение индуктивности

$$L_{min} = \frac{5 \cdot (16 - 5)}{16 \cdot 303 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 0,4} = 14 \text{ мкГн}.$$

С учетом изменения с током значения индуктивности возьмем стандартное значение номинала с запасом $L = 22 \text{ мкГн}$.

Пиковый ток через дроссель должен быть меньше максимального тока верхнего транзистора (табл. 2). Определим пульсации тока по следующей формуле

$$\Delta i_L = \frac{V_{OUT} \cdot (V_{IN} - V_{OUT})}{V_{IN} \cdot F_{SW} \cdot L}, \quad (7)$$

где V_{IN} – входное напряжение, В.

По формуле (7) для минимального входного напряжения получим

$$\Delta i_{Lmin} = \frac{5 \cdot (10 - 5)}{10 \cdot 3,03 \cdot 10^5 \cdot 22 \cdot 10^{-6}} = 380 \text{ мА},$$

для максимального входного напряжения получим

$$\Delta i_{Lmax} = \frac{5 \cdot (16 - 5)}{16 \cdot 3,03 \cdot 10^5 \cdot 22 \cdot 10^{-6}} = 520 \text{ мА}.$$

Пиковый ток через дроссель определим из уравнения

$$I_{Lmax} = I_{OUTmax} + \frac{\Delta i_{Lmax}}{2}. \quad (8)$$

Подставив значения в (8), получим

$$I_{Lmax} = 2 + \frac{0,520}{2} = 2,26 \text{ А}.$$

Полученное значение не превышает значение максимального тока верхнего транзистора 2,875 А. Однако необходимо учитывать также и ток насыщения дросселя. С учетом известного максимального тока в устройстве возьмем дроссель с током насыщения, превышающим это значение. Выберем SRP7028A-220M ф. Bourns, Inc. с номиналом 22 мкГн и током насыщения 3,5 А.

Рассчитаем емкость на выходе по пульсациям напряжения на конденсаторе

$$C_{OUT} = \frac{\Delta i_{Lmax}}{8 \cdot F_{SW} \cdot \Delta V_{OUTripple}}, \quad (9)$$

где $\Delta V_{OUTripple}$ – пульсации напряжения на конденсаторе, В.

Примем значение пульсаций напряжения равным $\Delta V_{OUTripple} = 10 \text{ мВ}$.

Согласно (9), вычислим емкость

$$C_{OUT} = \frac{0,520}{8 \cdot 303 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 10^{-3}} = 22 \text{ мкФ}.$$

Выберем конденсатор CC1206MKX7R7BB226 ф. YAGEO Corp. с номиналом 22 мкФ, типом диэлектрика X7R и номинальным напряжением 16В.

Руководствуясь рекомендациями в документации, на выводе VCC выберем конденсатор CC0603KRX7R8BB105 ф. YAGEO Corp. с номиналом 1 мкФ, типом диэлектрика X7R и номинальным напряжением 25 В. Аналогично выберем накопительный конденсатор на выводе BST с номиналом 0,01 мкФ, типом диэлектрика X7R и номинальным напряжением 100 В.

Входной конденсатор служит для ограничения пульсаций входного напряжения до приемлемого уровня. Вычислим емкость по следующей формуле

$$C_{IN} = \frac{I_{OUTmax} \cdot D \cdot (1 - D)}{V_{INripple} \cdot F_{SW}}, \quad (10)$$

где D – поправочный коэффициент;

$V_{INripple}$ – пульсации входного напряжения, В.

Для данной конфигурации примем поправочный коэффициент $D = 0,5$ и пульсации входного напряжения $V_{INripple} = 0,5$ В. Поставим значения в уравнение (10), получим

$$C_{IN} = \frac{2 \cdot 0,5 \cdot (1 - 0,5)}{0,5 \cdot 303 \cdot 10^3} = 3,3 \text{ мкФ}.$$

Вместо одного конденсатора выберем параллельное соединение двух конденсаторов CC1206KKX7R0BB225 ф. YAGEO Corp. с номиналом 2,2 мкФ, типом диэлектрика X7R и номинальным напряжением 100 В. Дополнительно, для подавления высокочастотных составляющих входного напряжения добавим параллельно конденсатор CC0603KRX7R0BB104 ф. YAGEO Corp. с номиналом 0,1 мкФ, типом диэлектрика X7R и номинальным напряжением 100 В.

Паразитная индуктивность проводящих дорожек в сочетании с керамическими конденсатора могут образовать резонансный контур и стать причиной скачков напряжения. Для, своего рода, демпфирования входного сигнала подключим параллельно электролитический конденсатор MAL214699904E3 ф. Vishay Intertechnology, Inc. с номиналом 47 мкФ и номинальным напряжением 100 В.

Определим емкость конденсатора плавного пуска на выводе SS по уравнению

$$C_{SS} = \frac{I_{SS} \cdot T_{startup}}{V_{SS}}, \quad (11)$$

где $I_{SS} = 10 \cdot 10^{-6}$ – ток внутреннего источника, А;

$T_{startup}$ – время плавного пуска, с;

$V_{SS} = 2$ – опорное напряжение, В.

Примем время плавного пуска $T_{startup} = 5$ мс и определим емкость по уравнению (11)

$$C_{SS} = \frac{10 \cdot 10^{-6} \cdot 5 \cdot 10^{-3}}{2} = 0,025 \text{ мкФ.}$$

Возьмем ближайшее большее стандартное значение номинала $C_{SS} = 0,033$ мкФ. Выберем конденсатор CC0603JPX7R7BB333 ф. YAGEO Corp. с типом диэлектрика X7R и номинальным напряжением 16 В. Тогда время плавного пуска равно

$$T_{startup} = \frac{33 \cdot 10^{-9} \cdot 2}{10 \cdot 10^{-6}} = 7 \text{ мс.}$$

Рассчитаем сопротивления резисторов для установки порога пониженного напряжения и гистерезиса по следующим формулам

$$V_{IN \text{ UVLO rising}} = V_{UVLO TH} \cdot \left(1 + \frac{R_{UV2}}{R_{UV1}}\right), \quad (12)$$

$$V_{INhys} = I_{UVLOhys} \cdot R_{UV2}, \quad (13)$$

где $V_{UVLO TH} = 1,24$ – внутренний порог пониженного напряжения, В;

$I_{UVLOhys} = 20 \cdot 10^{-6}$ – ток гистерезиса, А.

Желаемое значение порога пониженного напряжения $V_{IN \text{ UVLO rising}} = 10$ В. Примем значение гистерезиса $V_{INhys} = 2,5$ В. Тогда сопротивления по уравнениям (13) и (12) равны

$$R_{UV2} = \frac{2,5}{20 \cdot 10^{-6}} = 125 \text{ кОм,}$$

$$R_{UV1} = \frac{125 \cdot 10^3}{10/1,24 - 1} = 18,7 \text{ кОм.}$$

Возьмем стандартные значения номиналов $R_{UV1} = 19,1$ кОм и $R_{UV2} = 127$ кОм. Тогда порог пониженного напряжения и гистерезис

$$V_{IN \text{ UVLO rising}} = 1,24 \cdot \left(1 + \frac{127 \cdot 10^3}{19,1 \cdot 10^3}\right) = 9,94 \text{ В,}$$

$$V_{INhys} = 20 \cdot 10^{-6} \cdot 127 \cdot 10^3 = 2,54 \text{ В.}$$

Для стабильной работы изменение напряжения обратной связи во время фазы отключения должно быть достаточно большим, чтобы преобладать на

любым шумом, присутствующим в узле обратной связи. В документации представлены три различных метода для создания требуемых пульсаций. Реализуем метод 3, схема которого приведена на рисунке 4 [2, с. 15]. При такой схеме не требуются пульсации выходного напряжения, что позволяет свести их к минимуму. Здесь создается треугольное изменение тока с помощью резистора R_A , конденсатора C_A и катушкой L_1 , которое затем в виде напряжения передается через конденсатор C_B в цепь обратной связи.

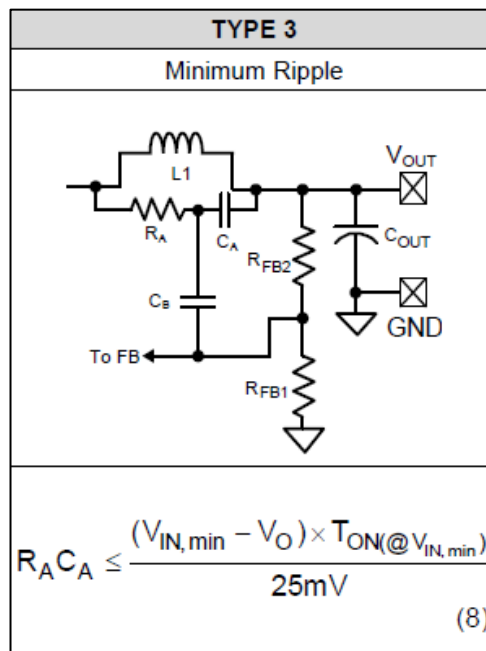


Рисунок 4 – Метод 3

Выберем необходимые номиналы компонентов по руководству [3].

Импеданс конденсатора C_A должен быть небольшим по сравнению с импедансом резистивного делителя обратной связи при заданной частоте переключения. Рассчитаем импеданс делителя напряжения по следующей формуле

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_{fb1}} + \frac{1}{R_{fb2}}. \quad (14)$$

Поставив значения номиналов резисторов обратной связи в (14), получим

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{2 \cdot 10^3} + \frac{1}{3 \cdot 10^3} = 0,8 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}^{-1},$$

$$R = \frac{1}{0,8 \cdot 10^{-3}} \approx 1,25 \text{ кОм.}$$

Исходя из полученного значения, выберем импеданс конденсатора C_A равным 200 Ом на частоте 303 кГц. Тогда можно вычислить емкость конденсатора по выражению

$$C_A = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot F_{SW} \cdot X_C}, \quad (15)$$

где $X_C = 200$ – импеданс конденсатора, Ом.

Подставив значения в (15), получим

$$C_A = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 303 \cdot 10^3 \cdot 200} = 2600 \text{ пФ.}$$

Возьмем стандартное значение номинала $C_A = 2700$ пФ. Выберем конденсатор CC0603KRX7R0BB272 ф. YAGEO Corp. с типом диэлектрика X7R и номинальным напряжением 100 В.

Конденсатор C_A подчиняется следующему соотношению

$$\frac{I}{C_A} = \frac{dV}{dt}, \quad (16)$$

где I – протекающий ток, А;

dV – пульсации напряжения, В;

$dt = T_{ON}$ – время включения при номинальном входном напряжении, с.

Приняв желаемые пульсации $dV = 50$ мВ, из (16) получим значение тока

$$I = 2700 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{50 \cdot 10^{-3}}{1375 \cdot 10^{-9}} = 120 \text{ мкА.}$$

При большой разнице входного и выходного напряжения резистор R_A можно рассматривать как источник тока, поэтому справедливо соотношение

$$I = \frac{V_{IN} - V_{OUT}}{R_A}. \quad (17)$$

Подставив известные значения в (17), найдем сопротивление резистора

$$R_A = \frac{12 - 5}{120 \cdot 10^{-6}} = 58 \text{ кОм.}$$

Возьмем ближайшее стандартное значение номинала $R_A = 57,6 \text{ кОм}$. Выберем резистор RC0603FR-0757K6L ф. YAGEO Corp. с номинальным напряжением 75 В и мощностью 0,1 Вт.

Емкость конденсатора C_B должна превышать таковую у C_A в 3-4 раза. Выберем конденсатор CC0603JRX7R0BB103 с номиналом 0,01 мкФ, типом диэлектрика X7R и номинальным напряжением 100 В.

Проверим правильность проведенных расчетов по формуле (рис. 4)

$$R_A \cdot C_A \leq \frac{(V_{INmin} - V_{OUT}) \cdot T_{ONVmin}}{25 \cdot 10^{-3}}, \quad (18)$$

где T_{ONVmin} – время включения при минимальном входном напряжении, В.

Подставив в формулу (5) значение V_{INmin} , найдем время включения

$$T_{ONVmin} = \frac{165 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 10^{-10}}{10} = 1650 \text{ нс.}$$

Подставим известные значения в (18) и получим

$$57,6 \cdot 10^3 \cdot 2700 \cdot 10^{-12} \leq \frac{(10 - 5) \cdot 1650 \cdot 10^{-9}}{25 \cdot 10^{-3}},$$

$$156 \cdot 10^{-6} \leq 330 \cdot 10^{-6} \rightarrow \text{верно.}$$

Рассчитаем требуемый средний ток источника питания на входе по формуле

$$I_{IN} = \frac{P_{OUT}}{V_{IN} \cdot \mu}, \quad (19)$$

где $P_{OUT} = 10$ – мощность нагрузки, Вт;

μ – КПД, %.

Примем значение КПД произвольно равным $\mu = 85 \%$, тогда из (19) значение тока при минимальном и максимальном входных напряжениях

$$I_{INmin} = \frac{10}{10 \cdot 0,85} = 1,18 \text{ А,}$$

$$I_{INmax} = \frac{10}{16 \cdot 0,85} = 0,74 \text{ А.}$$

Выберем для источника тока значение с запасом $I_{IN} = 1,5 \text{ А}$.

2.2 Элементы обвязки TPS2660

Проведем расчет и выбор элементов обвязки микросхемы TPS2660 согласно документации [1]. Исходные данные приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Исходные данные для TPS2660

Параметр	Значение	Размерность
Номинальное входное напряжение	12	В
Нижний порог входного напряжения	10	В
Верхний порог входного напряжения	16	В
Сопротивление нагрузки на старте*	8	Ом
Ток нагрузки**	2	А
Емкость нагрузки	47	мкФ
Температура окружающей среды	45	°С

* по входным параметрам LM5160-Q1 I_{IN} и V_{IN} , с запасом

** по входному параметру LM5160-Q1 I_{IN} , с запасом

Рассчитаем сопротивление резистора для установки предела тока на выводе ILIM по формуле

$$R_{lim} = \frac{12}{I_{lim}}, \quad (20)$$

где $I_{lim} = 2$ – ток нагрузки, А.

Согласно (20), сопротивление резистора равно

$$R_{lim} = \frac{12}{2} = 6 \text{ кОм.}$$

Возьмем ближайшее стандартное значение номинала $R_{lim} = 6,04 \text{ кОм.}$ Выберем резистор RC0603FR-076K04L ф. YAGEO Corp. с номинальным напряжением 75 В и мощностью 0,1 Вт.

Найдем сопротивления резисторов в делителе напряжения для установки порога пониженного напряжения и порога перенапряжения путем решения следующих уравнений

$$V_{UVLOR} = \frac{R_2 + R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \cdot V_{UV}, \quad (21)$$

$$V_{OVPR} = \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \cdot V_{OV}, \quad (22)$$

где $V_{UVLOR} = 1,19$ – внутренний порог пониженного напряжения, В;

$V_{OVPR} = 1,19$ – внутренний порог перенапряжения, В.

Для заданных исходных данных $V_{UV} = 10$ В и $V_{OV} = 16$ В.

Чтобы раскрыть неопределимость, введем следующее соотношение, определяющее ток через резисторы делителя напряжения

$$I_{R123} = \frac{V_{IN}}{R_1 + R_2 + R_3}, \quad (23)$$

где $V_{IN} = 12$ – номинальное входное напряжения, В.

Согласно документации, значение тока должно быть в 20 раз или более превышающим ток утечки на выводах UVLO и OVP. Ток утечки на выводах имеет наибольшее значение 100 нА, тогда ток через резисторы определим следующим образом

$$I_{R123} = 200 \cdot 100 \cdot 10^{-9} = 20 \text{ мкА.}$$

Из уравнения (23) найдем суммарное сопротивление резисторов

$$R_1 + R_2 + R_3 = \frac{12}{20 \cdot 10^{-6}} = 600 \text{ кОм.}$$

Из уравнения (22) определим сопротивление резистора R_3

$$R_3 = \frac{1,19}{16} \cdot 600 \cdot 10^3 = 44,6 \text{ кОм.}$$

Из уравнения (21) определим сопротивление резистора R_2

$$R_2 = \frac{1,19}{10} \cdot 600 \cdot 10^3 - 44600 = 26,8 \text{ кОм.}$$

Найдем сопротивление резистора R_1 из суммы сопротивлений

$$R_1 = (600 - 44,6 - 26,8) \cdot 10^3 = 528,6 \text{ кОм.}$$

Возьмем ближайшие стандартные значения номиналов $R_1 = 523$ кОм, $R_2 = 26,7$ кОм и $R_3 = 44,2$ кОм. Выберем резисторы RC0603FR-07523KL, RC0603FR-0726K7L и RC0603FR-0744K2L ф. YAGEO Corp. с номинальным напряжением 75 В и мощностью 0,1 Вт.

Тогда действительные значения порога пониженного напряжения и перенапряжения равны

$$V_{UV} = 1,19 \cdot \frac{593,9 \cdot 10^3}{70,9 \cdot 10^3} = 9,96 \text{ В},$$

$$V_{OV} = 1,19 \cdot \frac{593,9 \cdot 10^3}{44,2 \cdot 10^3} = 15,98 \text{ В}.$$

Сбой питания обнаруживается на спадающем фронте напряжения, при такой ситуации порог пониженного напряжения на 7,5% меньше рассчитанного. Его можно определить по формуле

$$V_{PFAIL} = 0,925 \cdot V_{UV}. \quad (24)$$

В данном случае он равен

$$V_{PFAIL} = 0,925 \cdot 9,96 = 9,21 \text{ В}.$$

Для выбора конденсатора на выводе dVdT рассчитаем время нарастания выходного напряжения по уравнению

$$t_{dvdt} = C_{OUT} \cdot \frac{V_{IN}}{I_{inrush}}, \quad (25)$$

где $C_{OUT} = 47 \cdot 10^{-6}$ – емкость нагрузки, Ф;

I_{inrush} – пусковой ток, А.

Возьмем значение пускового тока $I_{inrush} = 0,1$ А. Тогда время нарастания из (25)

$$t_{dvdt} = 47 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{12}{0,1} = 6 \text{ мс}.$$

Емкость конденсатора вычисляет по формуле

$$C_{dvdt} = \frac{t_{dvdt}}{8 \cdot 10^6 \cdot V_{IN}}. \quad (26)$$

Поставим известные значения в (26), получим

$$C_{dvdt} = \frac{6 \cdot 10^{-3}}{8 \cdot 10^6 \cdot 12} = 63 \text{ пФ}.$$

Возьмем ближайшее стандартное значение номинала $C_{dvdt} = 82$ пФ. Выберем конденсатор CC0603JRNPO7BN820 с типом диэлектрика C0G и номинальным напряжением 16 В.

Согласно рекомендациям в документации, выберем в качестве входного конденсатора СС1206ККХ7R0ВВ105 с номиналом 1 мкФ, типом диэлектрика Х7R и номинальным напряжением 100 В.

Рассчитаем полную рассеиваемую мощность устройства на старте по следующим формулам

$$P_{Dinrush} = 0,5 \cdot V_{IN} \cdot I_{inrush}, \quad (27)$$

$$P_{Dload} = \frac{1}{6} \cdot \frac{V_{IN}^2}{R_L}, \quad (28)$$

$$P_{Dstartup} = P_{Dinrush} + P_{Dload}, \quad (29)$$

где $P_{Dinrush}$ – рассеиваемая мощность без нагрузки, Вт;

P_{Dload} – рассеиваемая мощность с нагрузкой, Вт;

$R_L = 8$ – сопротивление нагрузки на старте, Ом.

Поставив значения в формулы (27), (28) и (29), вычислим полную рассеиваемую мощность

$$P_{Dinrush} = 0,5 \cdot 12 \cdot 0,1 = 0,6 \text{ Вт},$$

$$P_{Dload} = \frac{1}{6} \cdot \frac{12^2}{8} = 3 \text{ Вт},$$

$$P_{Dstartup} = 0,6 + 3 = 3,6 \text{ Вт}.$$

Рассеиваемая мощность в течение времени нарастания выходного напряжения не должна превышать предела теплового отключения. Желательно иметь также минимальный запас в 30%, чтобы учесть возможное изменение параметров системы. Судя по графику, приведенному на рисунке 5 [1, с. 32], запуск устройства при $P_{Dstartup} = 3,6$ Вт, $t_{dVdt} = 6$ мс и температуре $T = 45^\circ\text{C}$ пройдет успешно.

В случае короткого замыкания или превышения тока нагрузки на выходе микросхемы могут возникать отрицательные скачки напряжения. Для улучшения переходных процессов поставим диод Шоттки поперек выхода. Выберем диод SL13-E3/5AT ф. Vishay Intertechnology, Inc. с импульсным обратным напряжением 30 В.

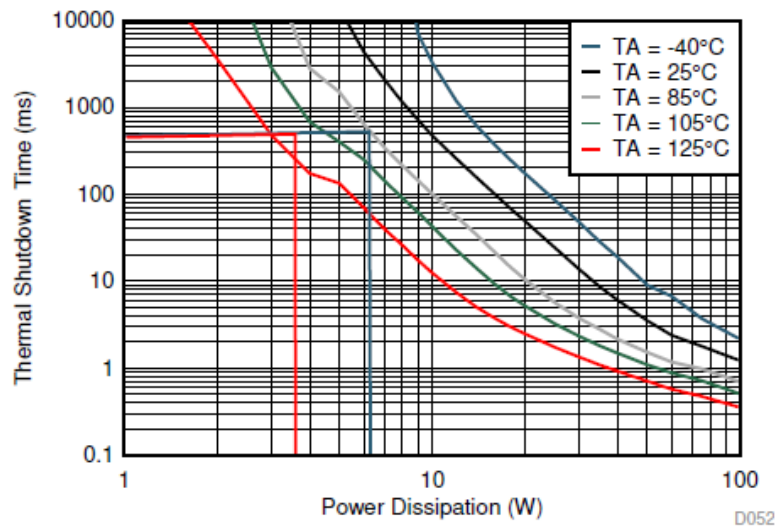


Рисунок 5 – График теплового отключения

Для подавление переходных процессов при превышении максимальных номинальных значений устройства на входе установим двухсторонний стабилитрон. Выберем сборку 1.5SMC62CA ф. Littelfuse, Inc. с напряжением стабилизации 53 В.

2.3 Светодиоды, кнопка и предохранитель

Устройство имеет два сигнальных светодиода. Первый на выходе микросхемы TPS2660, второй – на выходе микросхемы LM5160-Q1. Таким образом, по сигналу светодиодов можно судить о работе той или иной микросхемы. Выберем светодиоды TLMG1100-GS08 и TLMS1000-GS08 ф. Vishay Intertechnology, Inc. соответственно.

Рассчитаем резистор для каждого светодиода. Сопротивление и мощность резистора вычисляется по следующим формулам

$$R = \frac{V_s - V_{led}}{I_{led}}, \quad (30)$$

$$P = I^2 R, \quad (31)$$

где V_s – напряжения питания, В;

V_{led} – номинальное падения напряжения на светодиоде, Вт;

I_{led} – номинальный прямой ток светодиода, А;

I – прямой ток светодиода, А.

Для светодиода TLMG1100-GS08 с номинальным падением напряжения 2,1 В и прямым током 30 мА при максимальном напряжении питания 15,98 В вычислим сопротивление резистора по формуле (30)

$$R = \frac{15,98 - 2,1}{30 \cdot 10^{-3}} = 463 \text{ Ом.}$$

Возьмем с запасом стандартное значение номинала резистора $R = 1 \text{ кОм}$.

Тогда ток через светодиод равен

$$I_{led} = \frac{15,98 - 2,1}{1 \cdot 10^3} = 0,014 \text{ А.}$$

По формуле (31) определим необходимую мощность резистора

$$P = (0,014)^2 \cdot 1 \cdot 10^3 = 0,2 \text{ Вт.}$$

Возьмем с запасом значение мощности резистора $P = 1 \text{ Вт}$. Выберем резистор AA1218FK-071KL ф. YAGEO Corp. с номинальным напряжением 200 В и мощностью 1 Вт.

Для светодиода TLMS1000-GS08 с номинальным падением напряжения 1,8 В и прямым током 15 мА при максимальном напряжении питания 5 В вычислим сопротивление резистора по формуле (30)

$$R = \frac{5 - 1,8}{15 \cdot 10^{-3}} = 213 \text{ Ом.}$$

Возьмем стандартное значение номинала резистора $R = 220 \text{ Ом}$.

Тогда ток через светодиод равен

$$I_{led} = \frac{5 - 1,8}{220} = 0,015 \text{ А.}$$

По формуле (31) определим необходимую мощность резистора

$$P = (0,015)^2 \cdot 220 = 0,05 \text{ Вт.}$$

Возьмем значение мощности резистора $P = 0,1 \text{ Вт}$. Выберем резистор RC0603FR-07220RL ф. YAGEO Corp. с номинальным напряжением 75 В и мощностью 0,1 Вт.

Для возможности перезагрузки микросхемы TPS2660 свяжем ее вывод SHDN с GND через тактовую кнопку. Для предотвращения дребезга контактов кнопки подключим параллельно ей конденсатор. Выберем тактовую кнопку

FSM4JSMA ф. TE Connectivity и конденсатор CC0603KRX7R0BB104 с номиналом 0,1 мкФ, типом диэлектрика X7R и номинальным напряжением 100 В.

На выходе микросхемы LM5160-Q1 перед разъемом установим предохранитель – диод Шоттки. С учетом возможных напряжений и тока нагрузки выберем диод SS3P4L-M3/87A ф. Vishay Intertechnology, Inc. с импульсным обратным напряжением 40 В, максимальным допустимым прямым током 3 А и пиковым падением напряжения 0,47 В.

3 Расчет стоимости производства платы

3D-модель печатной платы с компонентами и нанесенной шелкографией приведена в приложении Б.

3.1 Стоимость текстолита

Спроектированная двухслойная плата имеет размеры 72,5×30×1,5 мм и толщину проводящих слоев 0,035 мм. Минимальная ширина проводников равна 0,3 мм, минимальный диаметр отверстий также 0,3 мм. Трассировка платы приведена в Приложении В.

Проведем расчет примерной стоимости текстолита с помощью калькулятора на сайте www.pcbway.com. Выбранные параметры представлены на рисунке 6. Сформированный на основе файлов производства заказ показан на рисунке 7.

Согласно оценке на сайте, производство 10 единиц текстолита с выбранными параметрами обойдется в 57\$ без учета доставки. Это равняется стоимости в 5,7\$ за единицу.

3.2 Стоимость компонентов

Перечень электронных компонентов приведен в Приложении Г.

Расчет стоимости компонентов проведем с помощью функционала сайта ru.mouser.com. Однако конденсатора CC0603JRNPO7BN820 в наличии не

оказалось, примем его стоимость условно равной 0,5\$. Результаты расчета приведены на рисунке 8. Итоговая стоимость компонентов составляет 37,17\$.

Итого, для производства одной печатной платы требуется 42,87\$ или 3130 руб. по курсу 1\$ = 72,93 руб.

The image shows a web-based interface for selecting PCB specifications. The main section is titled "PCB Specification Selection" and includes a "Calculate" button. The interface is divided into several sections for configuration:

- Board type:** Single pieces (selected), Panel by Customer, Panel by PCBWay.
- Different Design in Panel:** 1 (selected), 2, 3, 4, 5, 6, e.g.
- * Size (single):** 72.5 X 30 mm (selected), inch-mm.
- * Quantity (single):** 10 pcs.
- Layers:** 1 Layer, 2 Layers (selected), 4 Layers, 6 Layers, 8 Layers, 10 Layers, 12 Layers, 14 Layers.
- Material:** FR-4 (selected), Aluminum, Rogers, HDI (Buried/blind vias) 4 Layers, Copper Base.
- FR4-TG:** TG 130-140, TG 150-160 (selected), TG 170-180.
- Thickness:** 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.6 (selected), 2.0, 2.4, 2.6, 2.8, 3.0, 3.2. Unit: mm.
- Min Track/Spacing:** 3/3mil, 4/4mil, 5/5mil, 6/6mil, 8/8mil (selected).
- Min Hole Size:** 0.15mm, 0.2mm, 0.25mm, 0.3mm (selected), 0.8mm, 1.0mm, No Drill.
- Solder Mask:** Green (selected), Red, Yellow, Blue, White, Black, Purple, Matte black, Matte green, None.
- Silkscreen:** White (selected), Black, None.
- Gold fingers:** Yes, No (selected).
- Surface Finish:** HASL with lead (selected), HASL lead free, Immersion gold (ENIG), OSP, Hard gold, Immersion silver (Ag), ENEPIG, None (Plain copper).
- Via Process:** Tenting vias (selected), Plugged vias, Vias not covered.
- Finished Copper:** Bare board (0 oz Cu), 1 oz Cu (selected), 2 oz Cu, 3 oz Cu, 4 oz Cu, 5 oz Cu, 6 oz Cu, 7 oz Cu, 8 oz Cu, 9 oz Cu, 10 oz Cu, 11 oz Cu, 12 oz Cu, 13 oz Cu.
- Extra pcb product number:** Not to add extra pcb product number on board (extra+\$3) (selected).


On the right side, there is a "Pricing And Build Time" section showing a price comparison table:

Build Time	Qty	Total
3-4 days	10	\$ 67
Express 48hours	10	\$ 82
Express 24hours	10	\$ 104

Below the table, there is a "Shipping Cost" section with a dropdown menu for "RUSSIAN FEDERATION, THE" and a "Save to Cart" button.

Рисунок 6 – Параметры заказа производства текстолита

☒ Add Time: 2020-12-15 Service: Remi | Contact sales-rep (0 unread)



View

2 Layers Size 72.5x30mm 1.6mm
 Product No.: W310625AS1N3
 Solder Mask: Black ▾
 Silkscreen: White ▾

[PCB Production]
 ⌚ Build Time: 3-4 days
 ≡ View Detail

- 10 +

\$ 57.00
 (0.08kg)

✓ pcb.zip
[Share&Sell](#)

● Pass, Payment
 Edit PO No.
 Remove

Рисунок 7 – Готовый заказ

	№ Mouser	№ произв.	Производитель	Заказанное кол-во	Цена (USD)	Доп.: (USD)
1	603-CC126KKX7R0BB105	CC1206KKX7R0BB105	Yageo	1	\$0.697	\$0.70
2	603-CC1206KR0BB225	CC1206KKX7R0BB225	Yageo	2	\$1.57	\$3.14
3	603-CC603KRX7R0BB104	CC0603KRX7R0BB104	Yageo	2	\$0.341	\$0.68
4	603-CC603JFX7R78B333	CC0603JFX7R78B333	Yageo	1	\$0.211	\$0.21
5	594-MAL214699904E3	MAL214699904E3	Vishay	1	\$2.62	\$2.62
6	603-CC0603JRX70BB103	CC0603JRX7R0BB103	Yageo	2	\$0.195	\$0.39
7	603-CC603KRX7R8BB105	CC0603KRX7R8BB105	Yageo	1	\$0.471	\$0.47
8	603-CC0603KRX7R0BB27	CC0603KRX7R0BB272	Yageo	1	\$0.195	\$0.20
9	603-CC1206MKX778B226	CC1206MKX7R78B226	Yageo	1	\$2.36	\$2.36
10	595-TPS26600PWPR	TPS26600PWPR	Texas Instruments	1	\$7.41	\$7.41
11	595-LM5160QPWPRQ1	LM5160QPWPRQ1	Texas Instruments	1	\$8.04	\$8.04
12	78-TLMG1100	TLMG1100-GS08	Vishay	1	\$0.714	\$0.71
13	78-TLMS1000	TLMS1000-GS08	Vishay	1	\$0.697	\$0.70
14	652-SRP7028A-220M	SRP7028A-220M	Bourns	1	\$1.90	\$1.90
15	603-RC0603FR-07523KL	RC0603FR-07523KL	Yageo	1	\$0.163	\$0.16
16	603-RC0603FR-0726K7L	RC0603FR-0726K7L	Yageo	1	\$0.163	\$0.16
17	603-RC0603FR-0744K2L	RC0603FR-0744K2L	Yageo	1	\$0.163	\$0.16
18	603-RC0603FR-076K04L	RC0603FR-076K04L	Yageo	1	\$0.163	\$0.16
19	603-RC0603FR-0719K1L	RC0603FR-0719K1L	Yageo	1	\$0.163	\$0.16
20	603-RC0603FR-07127KL	RC0603FR-07127KL	Yageo	1	\$0.163	\$0.16
21	603-RC0603FR-07165KL	RC0603FR-07165KL	Yageo	1	\$0.163	\$0.16
22	603-AA1218FK-071KL	AA1218FK-071KL	Yageo	1	\$0.958	\$0.96
23	603-RC0603FR-0757K6L	RC0603FR-0757K6L	Yageo	1	\$0.163	\$0.16
24	603-RC0603FR-073KL	RC0603FR-073KL	Yageo	1	\$0.163	\$0.16
25	603-RC0603FR-072KL	RC0603FR-072KL	Yageo	1	\$0.163	\$0.16
26	603-RC0603FR-07220RL	RC0603FR-07220RL	Yageo	1	\$0.163	\$0.16
27	506-FSM4JSMA	FSM4JSMA	TE Connectivity	1	\$0.389	\$0.39
28	576-1.5SMC62CA	1.5SMC62CA	Littelfuse	1	\$1.02	\$1.02
29	625-SL13-E3/5AT	SL13-E3/5AT	Vishay	1	\$0.779	\$0.78
30	625-SS3P4L-M3/87A	SS3P4L-M3/87A	Vishay	1	\$0.973	\$0.97
31	571-4-1775099-0	4-1775099-0	TE Connectivity	2	\$0.632	\$1.26
					Заказ:	\$36,67

Рисунок 8 – Расчет стоимости компонентов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе лабораторной работы был разработан понижающий преобразователь напряжения. Дано описание ключевых компонентов и обоснование выбора элементов обвязки, рассчитана стоимость изготовления печатной платы. Предоставлены принципиальная электрическая схема, файлы производства, перечень электронных компонентов и файлы проекта Altium Designer.

Выполнение работы позволило получить практические навыки проектирования преобразователей напряжения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. TPS2660x 60-V, 2-A Industrial eFuse With Integrated Reverse Input Polarity Protection datasheet (Rev. G), URL:

<https://www.ti.com/product/TPS2660?HQS=TI-null-null-octopart-df-pf-manuf-ww>

2. LM5160-Q1 Wide Input 65-V, 2-A Synchronous Buck / Fly-Buck™ DC/DC Converter datasheet (Rev. C), URL:

<https://www.ti.com/product/LM5160-Q1?qgpn=lm5160-q1>

3. AN-1481 Controlling Output Ripple and Achieving ESR Independence in Constant On-Time (COT) Regulator Designs, URL:

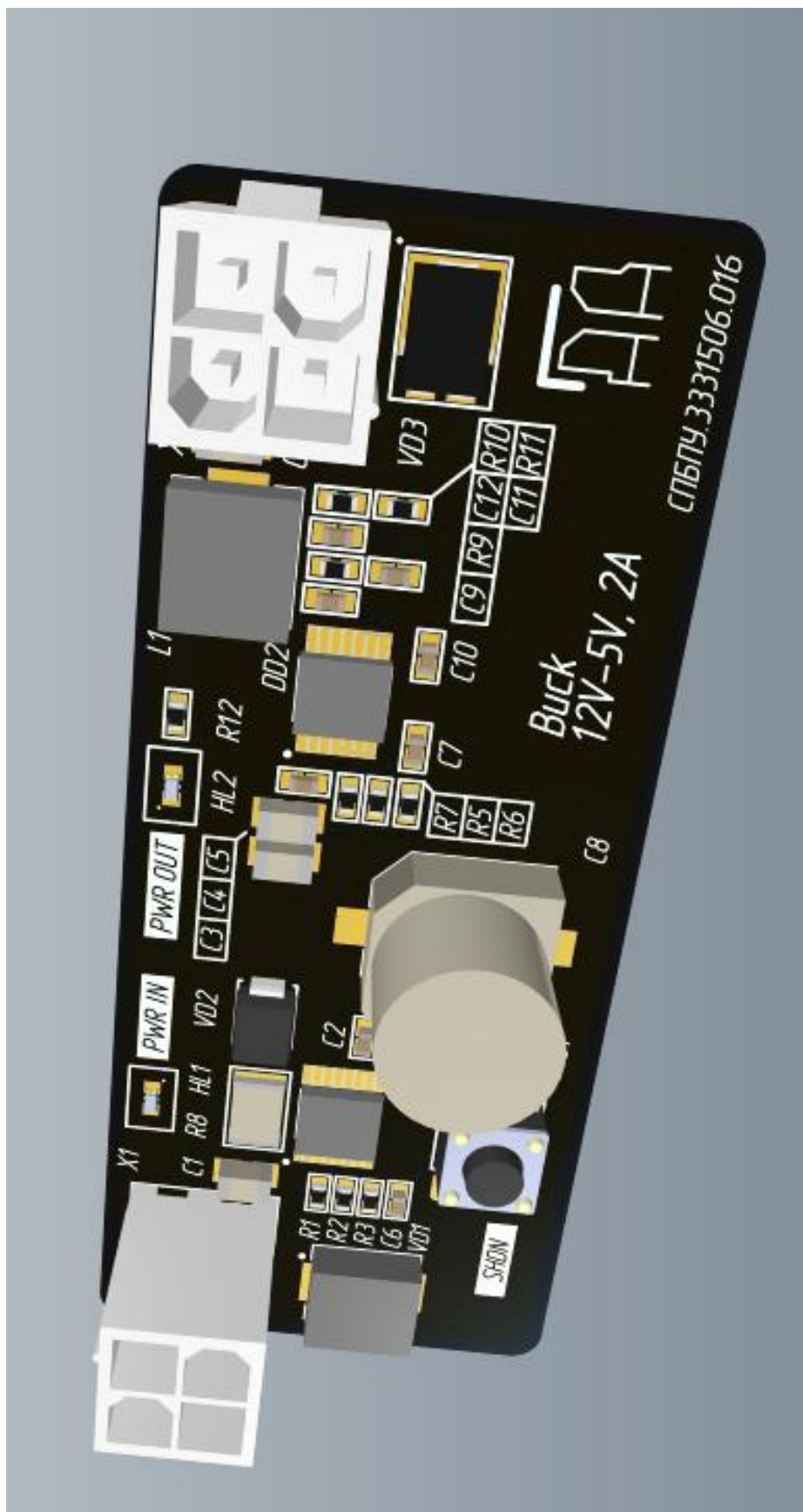
https://www.ti.com/lit/an/snva166a/snva166a.pdf?ts=1607950697287&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FLM5007%253FkeyMatch%253DLM5007%2526tsearch%253DSearch-EN-everything%2526usecase%253DGPN

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Принципиальная электрическая схема

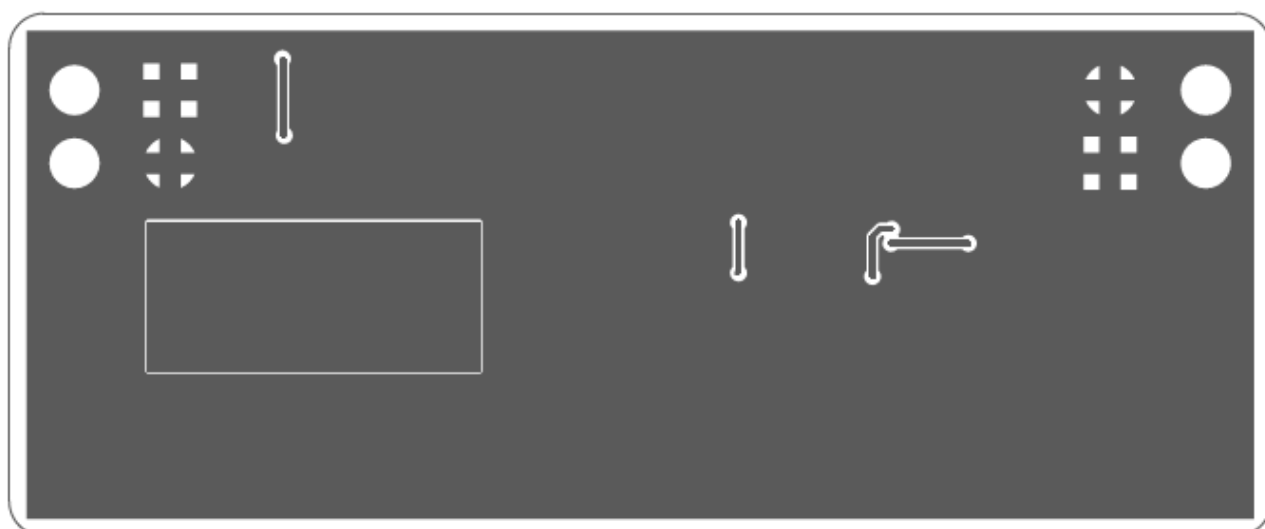
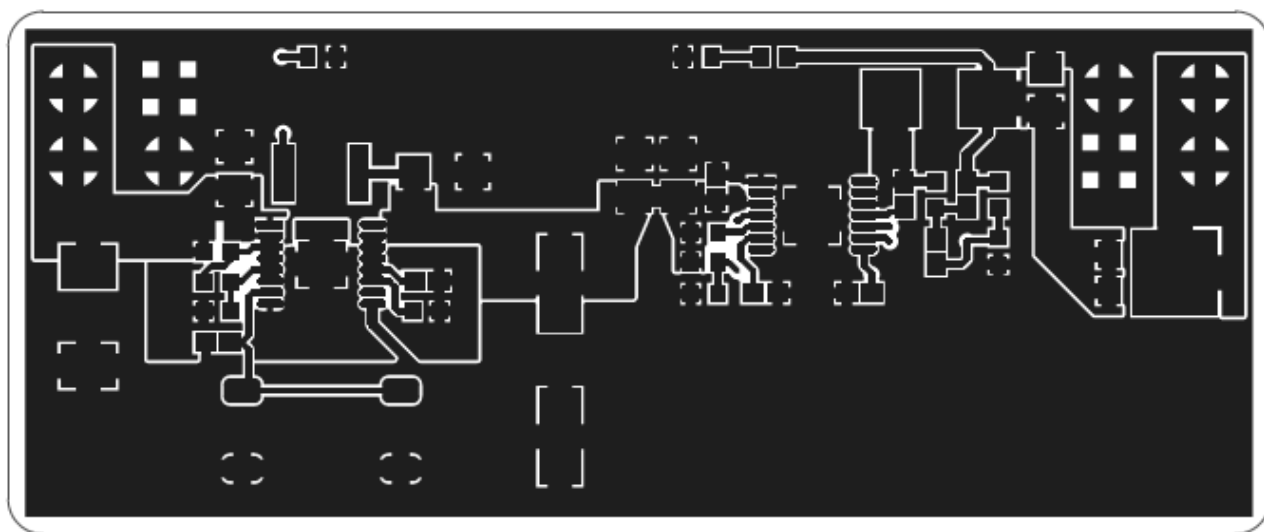
ПРИЛОЖЕНИЕ Б

3D-модель печатной платы



ПРИЛОЖЕНИЕ В

Трассировка печатной платы (верхний и нижний слой)



ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Перечень электронных компонентов