

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: Преобразователь напряжения

Студент гр. 3331506/70401

Преподаватель

Паньков И.С.

Капустин Д.А.

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

Санкт-Петербург

2021

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1 Цели и задачи.....	5
2 Описание интегральной микросхемы TPS61378-Q1 .....	6
2.1 Основные особенности .....	6
2.2 Предназначение выводов микросхемы .....	7
3 Описание работы устройства.....	10
3.1 Защита от подачи напряжения обратной полярности .....	10
3.2 Индикация подачи напряжения обратной полярности.....	10
3.3 Защита от перенапряжения.....	10
3.4 Преобразование напряжения.....	11
3.5 Защита от короткого замыкания на выходе.....	11
3.6 Индикация напряжения питания на выходе .....	11
4 Расчёт электронных компонентов.....	12
4.1 Расчёт резисторов для делителя напряжения .....	12
4.2 Расчёт резистора для настройки частоты.....	13
4.3 Расчёт резистора для ограничения пикового тока .....	13
4.4 Расчёт катушки индуктивности .....	14
4.5 Расчёт выходного конденсатора .....	17
4.6 Расчёт входного конденсатора.....	18
4.7 Стабилизация и компенсация наклона колебательного контура .....	18
4.8 Расчёт конденсатора накачки .....	19
4.9 Расчёт конденсатора регулятора $V_{SS}$ .....	19
4.10 Выбор подтягивающих резисторов .....	19
4.11 Выбор прочих компонентов .....	20
5 Расчёт стоимости производства устройства.....	21
5.1 Стоимость производства печатной платы.....	21
5.2 Стоимость закупки компонентов.....	21
Заключение .....	23

Список использованных источников .....	24
Приложение А Схема электрическая функциональная .....	25
Приложение Б Схема электрическая принципиальная .....	26
Приложение В 3D-модель печатной платы .....	27
Приложение Г Список электронных компонентов.....	28

## ВВЕДЕНИЕ

Зачастую при построении электрических схем, состоящих из нескольких электронных устройств, возникает задача преобразования постоянного напряжения — его повышение или понижение. Как правило, это связано с тем, что некоторые устройства могут иметь свой индивидуальный уровень питающего напряжения, отличный от других. Обеспечить же для каждого подобного устройства свой источник питания не представляется возможным, в результате чего и решают задачу преобразования напряжения от общего для всей схемы источника. Устройства, применяемые для данных задач, называют вторичными источниками питания, или преобразователями напряжения.

Преобразователи напряжения бывают двух видов — линейные и импульсные. Несмотря на свою простоту и отсутствие помех, линейный стабилизатор напряжения обладает недостатком в виде низкого КПД. В сравнении с линейным импульсный преобразователь напряжения имеет следующие преимущества

- Высокий КПД, особенно при работе в больших диапазонах входных напряжений;
- Малые габариты и масса (высокая удельная мощность);
- Принципиальная возможность гальванической развязки входных и выходных цепей.

Несмотря на все преимущества, импульсный преобразователь напряжения имеет также ряд недостатков:

- Импульсные помехи во входных и выходных цепях;
- Нестабильность выходного напряжения при изменении входного напряжения или тока;
- Длительные переходные процессы;

Тем не менее, его достоинства покрывают эти недостатки. В данной работе будет разрабатываться и рассчитываться именно импульсный преобразователь напряжения.

## 1 Цели и задачи

Целью работы является приобретение основных навыков проектирования преобразователей напряжения: составление функциональной и электрической схемы устройства, подбор и расчёт электронных компонентов, трассировка печатной платы и расчёт стоимости платы.

Задача состоит в разработке импульсного повышающего преобразователя напряжения DC/DC 5 В/12 В на базе интегральной микросхемы TPS61378-Q1. Мощность устройства на выходе — 5 Вт. Преобразователь должен обеспечивать работу в диапазоне входных напряжений от 5 В до 9 В. В устройстве должна присутствовать индикация напряжения питания на выходе. Устройство должно быть защищено от короткого замыкания на выходе источника.

Необходимо создать проект в САПР Altium Designer, состоящий из принципиальной электрической схемы устройства и его печатной платы, подготовить список электронных компонентов и файлы для производства печатной платы, предоставить схему и отчёт по лабораторной работе в формате \*.pdf.

					СПБПУ.3331506.019	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		5

## 2 Описание интегральной микросхемы TPS61378-Q1

### 2.1 Основные особенности

Интегральная микросхема TPS61378-Q1 — это синхронный повышающий преобразователь напряжения с интегрированной функцией отключения нагрузки. Входное напряжение составляет от 2,3 В до 14 В, а максимальная выходное напряжение — до 18,5 В. Пороговое значение тока программируется от 1 А до 4,8 А. Микросхема потребляет ток величиной в 25 мкА с вывода VIN.

Микросхема TPS61378-Q1 осуществляет управление пиковым током с программируемой частотой переключения ключа от 200 кГц до 2,2 МГц. Устройство работает в режиме широтно-импульсной модуляции фиксированной частоты при средней и большой нагрузке. Также возможны два дополнительных режима при легкой нагрузке путем настройки вывода MODE: режим автоматической частотно-импульсной модуляции и режим принудительной широтно-импульсной модуляции для балансировки эффективности и помехоустойчивости. Частота переключения может быть синхронизирована с внешним кварцевым резонатором. Кроме того, в микросхеме используется режим плавного пуска для ограничения пускового тока.

Микросхема TPS61378-Q1 способна поддерживать различные значения выходного напряжения с помощью внешнего делителя напряжения. Она поддерживает внешнюю компенсацию колебательного контура, так что устойчивость и характер переходного процесса могут быть оптимизированы в более широком диапазоне входных и выходных напряжений. Также микросхема сочетает в себе надёжные функции защиты, включая защиту от короткого замыкания на выходе, защиту от перенапряжения на выходе и защиту от теплового отключения. Микросхема TPS61378-Q1 выпускается в единственном варианте поставки TPS61378-QWRTER1 в 16-контактном корпусе WQFN-16 размером 3,00×3,00×0,80 мм ([1], р. 1). Условно-графическое обозначение микросхемы TPS61378-QWRTER1 представлено на рисунке 2.1. Основные характеристики микросхемы TPS61378-QWRTER1 приведены в таблице 2.1.

					СПБПУ.3331506.019	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		6

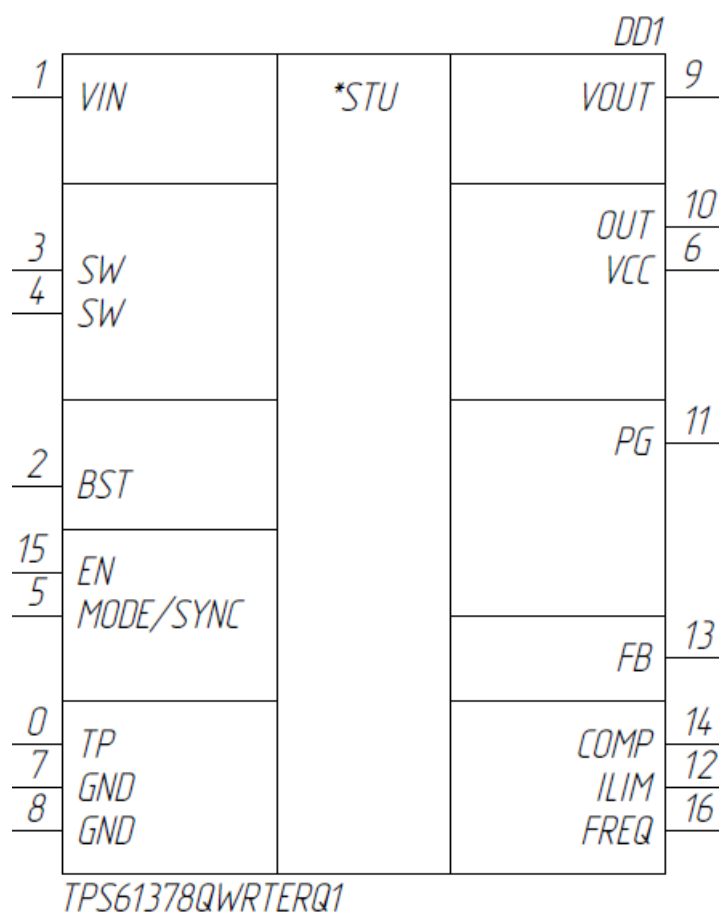


Рисунок 2.1 — Условно-графическое обозначение микросхемы TPS61378-QWRTER1

Таблица 2.1 — Основные характеристики микросхемы TPS61378-QWRTER1

Характеристика	Значение
Диапазон входных напряжений	от 2,3 В до 14,0 В
Диапазон выходных напряжений	от 4,0 В до 18,5 В
Потребляемый ток	25 мкА
Диапазон частот переключения ключа	от 200 кГц до 2,2 МГц
Диапазон рабочих температур	от –40 °С до +125 °С

## 2.2 Предназначение выводов микросхемы

Микросхемы TPS61378-QWRTER1 имеет следующие выводы:

- VIN — вход питания интегральной микросхемы. К этому выводу подводится входное напряжения  $U_{in}$  ;
- BST — вход для обеспечения питанием драйверов затвора верхнего внутреннего N-канального МДП-транзистора. К этому выводу подключается конденсатор накачки  $C_{BST}$  ;

- SW — силовой вход коммутационного узла преобразователя напряжения. Этот вывод подключён к стоку нижнего внутреннего N-канального МДП-транзистора и истоку верхнего внутреннего N-канального МДП-транзистора. К этому выводу подключается катушка индуктивности;
- MODE/SYNC — вход настройки режима модуляции импульсов. При подаче на этот вывод высокого уровня напряжения преобразователь напряжения работает в режиме принудительной широтно-импульсной модуляции, при подаче низкого уровня напряжения или при подвешенном состоянии вывода — автоматическая частотно-импульсная модуляция. К этому выводу также может быть подключен внешний кварцевый резонатор;
- VCC — выход внутреннего регулятора напряжения. К этому выводу подключается конденсатор  $C_{VCC}$  ;
- GND — силовой выход с нулевым потенциалом (земля) интегральной микросхемы. Этот вывод подключён к истоку нижнего внутреннего N-канального МДП-транзистора. Этот вывод должен быть подключен к цепи с потенциалом земли.
- VOUT — силовой выход внутреннего развязывающего МДП-транзистора. С этого вывода снимается выходное напряжение  $U_{out}$  при необходимости получения гальванической развязки между входом и выходом;
- OUT — силовой выход верхнего внутреннего N-канального МДП-транзистора. С этого вывода снимается выходное напряжение  $U_{out}$  (либо он закорачивается с выводом VOUT) при отсутствии необходимости гальванической развязки между входом и выходом и для отключения возможностей отключения нагрузки и защиты от короткого замыкания на выходе;
- PG — выход в режиме «открытый коллектор» (англ. open drain). Этот вывод используется для индикации напряжения на выходе;



- ILIM — вход для настройки порогового значения тока. К этому выводу подключается резистор  $R_{lim}$ ;
- FB — вход цепи обратной связи. К этому выводу подключается внешний делитель напряжения для настройки выходного напряжения  $U_{out}$ ;
- COMP — вход внутреннего усилителя ошибки наклона частотных характеристик колебательного контура. К этому выводу подключается внешняя RC-цепочка для оптимизации устойчивости и времени отклика;
- EN — логический вход включения/отключения преобразователя напряжения;
- FREQ — вход для настройки частоты переключения ключа. К этому выводу подключается резистор  $R_{freq}$ ;
- TP — вывод для отвода тепла. Этот вывод должен быть подключен к цепи с потенциалом земли для рассеяния тепловой энергии.

### 3 Описание работы устройства

Функциональная электрическая схема устройства приведена в приложении А. Принципиальная электрическая схема устройства приведена в приложении Б.

Представленная схема решает задачу повышения напряжения с 5...9 В до 12 В и его стабилизации при поддержании на выходе мощности 5 Вт путём построения схемы импульсного повышающего преобразователя напряжения на базе интегральной микросхемы TPS61378-QWRTER1.

#### 3.1 Защита от подачи напряжения обратной полярности

Питание схемы осуществляется путём подключения к контактам VIN и GND клеммной колодки 1776275-2 двух проводов с разностью потенциалов от 5 до 9 В. Защита от подачи напряжения обратной полярности осуществляется путём развязки земель с помощью полевого транзистора CSD19532Q5B, который открывается лишь при подаче питающего напряжения в цепь VIN, к которой подтянут его затвор.

#### 3.2 Индикация подачи напряжения обратной полярности

Для индикации подачи напряжения обратной полярности между цепями GND и VIN установлен светодиод TLMS1000-GS08 с токоограничивающим резистором RC0603FR-07220RL номиналом 220 Ом и дополнительным диодом Шоттки SS36-E3/57T. Необходимость использования диода Шоттки объясняется тем, что при подаче напряжения обратной полярности в случае больших значений этого напряжения рассеиваемая светодиодом мощность может превысить максимальную.

#### 3.3 Защита от перенапряжения

Для защиты от подачи напряжения свыше 9 В между цепями GND и VIN установлен стабилитрон BZD17C9V1P с номинальным напряжением стабилизации 9,1 В при токе 50 мА. Для ограничения тока в цепь также установлен резистор RC0603FR-07220RL номиналом 220 Ом. Для защиты стабилитрона

при подаче напряжения обратной полярности также использован диод Шоттки SS36-E3/57T.

### 3.4 Преобразование напряжения

Преобразование напряжение осуществляется микросхемой TPS61378-QWRTER1, на базе которой построена схема импульсного повышающего преобразователя напряжения.

Для настройки режима работы и обеспечения стабильности функционирования микросхемы, помимо входной и выходной емкостей и катушки индуктивности, необходим ряд вспомогательных конденсаторов и резисторов, расчёт которых приведён в разделе 4.

### 3.5 Защита от короткого замыкания на выходе

Питание нагрузки от схемы осуществляется с путём подключение проводов, идущих её выводов к контактам VOUT и GND клеммной колодки 1776275-2.

Микросхема TPS61378-Q1 обладает внутренней защитой от короткого замыкания на выходе ([1], р. 14). При коротком замыкании на выходе в микросхеме срабатывает внутренний таймер, она снижает значение выходного тока и через 1,8 миллисекунды отключается, после чего перезапускается. Через 67 миллисекунд схема перезагружается.

### 3.6 Индикация напряжения питания на выходе

С помощью вывода PG микросхемы TPS61378-Q1 можно осуществлять индикацию выходного напряжения ([1], р. 14). Для этих целей между выводами PG и потенциалом земли (GND) установлен светодиод TLMS1000-GS08 с токоограничивающим резистором RC0603FR-07220RL номиналом 220 Ом.

## 4 Расчёт электронных компонентов

### 4.1 Расчёт резисторов для делителя напряжения

Микросхема TPS61378-Q1 имеет два способа настройки выходного напряжения  $U_{out}$ : фиксированный и регулируемый. В обоих случаях настройка осуществляется с помощью делителя напряжения, состоящего из двух резисторов — верхнего  $R_{upper}$  и нижнего  $R_{lower}$ . Делитель напряжения подключается между выводом FB и потенциалом земли GND ([1], pp. 16 – 17).

В случаях, когда сопротивление нижнего резистора  $R_{lower}$  внешнего делителя напряжения меньше 16 кОм, микросхема использует внутренний делитель напряжения и работает в фиксированном режиме, выдавая в зависимости от номинала нижнего резистора  $R_{lower}$  напряжение  $U_{out}$  равное 5 В ( $R_{lower} < 2$  кОм), 5,25 В ( $R_{lower} = 2...4$  кОм) или 5,5 В ( $R_{lower} = 4...8$  кОм).

В случаях, когда сопротивление нижнего резистора  $R_{lower}$  внешнего делителя напряжения больше 16 кОм, микросхема использует внешний делитель напряжения и работает в регулируемом режиме, выдавая выходное напряжение  $U_{out}$ , В, которое вычисляется по формуле ([1], eq. 3)

$$U_{out} = U_{ref} \frac{R_{upper} + R_{lower}}{R_{lower}}, \quad (4.1)$$

где  $U_{ref}$  — опорное напряжение, В; для TPS61378-Q1  $U_{ref} = 0,8$  В.

Задавшись выходным напряжением  $U_{out} = 12$  В, путём несложных математических преобразований найдём из формулы (4.1) соотношение между номиналами резисторов:

$$\frac{R_{upper}}{R_{lower}} = \frac{U_{out} - U_{ref}}{U_{ref}} = \frac{12 - 0,8}{0,8} = 14. \quad (4.2)$$

Принимая в учёт соотношение (4.2), рекомендацию по выбору нижнего резистора  $R_{lower} < 100$  кОм и условие для работы микросхемы в регулируемом режиме  $R_{lower} > 16$  кОм, выберем резисторы RC0603FR-07470KL номиналом  $R_{upper} = 470$  кОм и RC0603FR-0733KL номиналом  $R_{upper} = 33$  кОм.

## 4.2 Расчёт резистора для настройки частоты

Микросхема TSP61378-Q1 осуществляет фиксированный контроль частоты переключения ключа  $f_{sw}$ , которая может принимать значения от 200 кГц до 2,2 МГц и настраивается с помощью резистора  $R_{freq}$ , подключенного между выводом FREQ и потенциалом земли GND ([1], р. 13). Частота переключения связана с номиналом резистора по эмпирической формуле ([1], eq. 1)

$$f_{sw} = \frac{41,9}{R_{freq} + 1,05}, \quad (4.3)$$

где  $f_{sw}$  — частота переключения ключа (транзистора), МГц;

$R_{freq}$  — сопротивление резистора, кОм.

Зададимся частотой переключения  $f_{sw} = 1,0$  МГц и рассчитаем номинал резистора:

$$R_{freq} = \frac{41,9}{f_{sw}} - 1,05 = 40,85 \text{ кОм.}$$

Возьмём ближайший по ряду E24 резистор RC0603FR-0739KL номиналом  $R_{freq} = 39$  кОм и пересчитаем частоту переключений:

$$f_{sw} = \frac{41,9}{39 + 1,05} = 1,046 \text{ МГц.}$$

## 4.3 Расчёт резистора для ограничения пикового тока

Микросхема TSP61378-Q1 осуществляет внутренний контроль пикового тока и переводит ключ в закрытое состояние при достижении током порога  $I_{lim}$ . Он может быть настроено с помощью резистора  $R_{lim}$ , подключенного между выводом ILIM и потенциалом земли GND ([1], р. 13). Пороговое значение тока связано с номиналом резистора по эмпирической формуле ([1], eq. 2)

$$R_{lim} = 1,184 + \frac{90,56}{I_{lim}}$$

где  $I_{lim}$  — пороговое значение пикового тока, А;

$R_{lim}$  — сопротивление резистора, кОм.

Зададимся пороговым значением тока  $I_{\text{lim}} = 3,5 \text{ А}$  и рассчитаем номинал резистора:

$$R_{I_{\text{lim}}} = 1,184 + \frac{90,56}{4,8} = 27,1 \text{ кОм.}$$

Возьмём ближайший по ряду E24 резистор RC0603FR-0727KL номиналом  $R_{I_{\text{lim}}} = 27 \text{ кОм.}$

#### 4.4 Расчёт катушки индуктивности

Для работы импульсному повышающему преобразователю напряжения необходима катушка индуктивности для запасания энергии ([1], р. 17). Размах пульсации тока в катушке  $\Delta I_L$ , А может быть вычислен по формуле ([1], eq. 4)

$$\Delta I_L = \frac{U_{in} D}{L f_{sw}} = \frac{(U_{out} - U_{in})(1 - D)}{L f_{sw}}, \quad (4.4)$$

где  $U_{in}$  и  $U_{out}$  — входное и выходное напряжения преобразователя, В;

$D = \tau/T$  — коэффициент заполнения импульса;

$\tau$  и  $T$  — длительность и период импульса соответственно, с;

$L$  — индуктивность катушки, Гн;

$f_{sw}$  — частота переключения ключа (транзистора), Гц.

Поскольку мощности на входе и на выходе преобразователя напряжения связаны соотношением

$$W_{out} = \eta W_{in},$$

где  $W_{in}$  и  $W_{out}$  — мощности на входе и на выходе преобразователя напряжения соответственно, Вт;

$\eta$  — коэффициент полезного действия преобразователя напряжения;

можно выразить размах пульсации тока с учётом  $W_{in} = U_{in} I_{in}$  как ([1], eq. 5)

$$\Delta I_L = \delta \cdot I_{in} = \delta \cdot \frac{W_{out}}{\eta U_{in}}, \quad (4.5)$$

где  $\delta$  — коэффициент пульсации тока;

$I_{in}$  — входной ток, А.

Из формул (4.4) и (4.5) можно получить выражение для индуктивности катушки, которое принимает вид ([1], eq. 6)

$$L = \frac{1}{\delta} \frac{\eta U_{in}}{W_{out}} \frac{U_{in} D}{f_{sw}}, \quad (4.6)$$

Из формулы (4.4) также несложно выразить коэффициент заполнения как

$$D = (U_{out} - U_{in}) / U_{out}. \quad (4.7)$$

Подставив формулу (4.7) в (4.6), получим

$$L = \frac{1}{\delta} \frac{\eta U_{in}^2}{W_{out}} \frac{(U_{out} - U_{in})}{U_{out} f_{sw}}. \quad (4.8)$$

Определим зависимость индуктивности катушки от входного напряжения:

$$\frac{\partial L}{\partial U_{in}} = \frac{1}{\delta} \frac{\eta U_{in}}{W_{out}} \frac{(2U_{out} - 3U_{in})}{U_{out} f_{sw}},$$

откуда ясно, что величина требуемой индуктивности как функция входного напряжения  $U_{in}$  имеет локальный максимум в точке  $U_{in} = 2U_{out}/3 = 8$  В, и, в силу ограниченности входного напряжения, условные минимумы в точках  $U_{in \min} = 5$  В и  $U_{in \max} = 9$  В. При этом в точке  $U_{in} = 5$  В индуктивность имеет глобальный максимум на рассматриваемом диапазоне входных напряжений

Задавшись значениями  $\delta = 0,3$ ,  $\eta = 0,9$ ,  $U_{out} = 12$  В,  $W_{out} = 5$  Вт и  $f_{sw} = 1,0$  МГц вычислим минимальное и максимальное значения требуемой индуктивности соответственно при  $U_{in} = 5$  В и  $U_{in} = 8$  В по формуле (4.8):

$$L_{\min} = \frac{1}{0,3} \frac{0,9 \cdot 5^2}{5} \frac{(12 - 5)}{12 \cdot 1,0 \cdot 10^6} = 8,75 \text{ мкГн},$$

$$L_{\max} = \frac{1}{0,3} \frac{0,9 \cdot 8^2}{5} \frac{(12 - 8)}{12 \cdot 1,0 \cdot 10^6} = 12,8 \text{ мкГн}.$$

Определим другие параметры катушки.

Пиковый ток катушки индуктивности  $I_{peak}$ , А вычисляется по формуле ([1], eq. 7)

$$I_{peak} = I_{in} + \frac{1}{2} \Delta I_L, \quad (4.9)$$

или, с учётом уравнений (4.4), (4.5) и (4.7) ([1], eq. 9),

$$I_{peak} = \frac{W_{out}}{\eta U_{in}} + \frac{1}{2} \frac{U_{in}}{f_{sw} L} \frac{(U_{out} - U_{in})}{U_{out}} \quad (4.10)$$

Рассчитаем минимальное и максимальное значения пикового тока соответственно при  $U_{in} = 8$  В и  $U_{in} = 5$  В:

$$I_{peak\ max} = \frac{5}{0,9 \cdot 8} + \frac{1}{2} \frac{8}{1,0 \cdot 10^6 \cdot 10 \cdot 10^{-6}} \frac{(12 - 8)}{12} = 0,83 \text{ А},$$

$$I_{peak\ min} = \frac{5}{0,9 \cdot 5} + \frac{1}{2} \frac{5}{1,0 \cdot 10^6 \cdot 10 \cdot 10^{-6}} \frac{(12 - 5)}{12} = 1,26 \text{ А}.$$

Действующее (среднеквадратичное) значение тока катушки индуктивности  $I_{L\ RMS}$ , А вычисляется по формуле ([1], eq. 10)

$$I_{L\ RMS} = \sqrt{I_{in}^2 + \frac{1}{12} \Delta I_L^2}, \quad (4.11)$$

или, с учётом уравнений (4.4), (4.5) и (4.7),

$$I_{L\ RMS} = \sqrt{\left( \frac{W_{out}}{\eta U_{in}} \right)^2 + \frac{1}{12} \left( \frac{U_{in}}{f_{sw} L} \frac{(U_{out} - U_{in})}{U_{out}} \right)^2}. \quad (4.12)$$

Рассчитаем минимальное и максимальное действующие значения тока соответственно при  $U_{in} = 8$  В и  $U_{in} = 5$  В:

$$I_{L\ RMS\ min} = \sqrt{\left( \frac{5}{0,9 \cdot 8} \right)^2 + \frac{1}{12} \left( \frac{8}{1,0 \cdot 10^6 \cdot 10 \cdot 10^{-6}} \frac{(12 - 8)}{12} \right)^2} = 0,70 \text{ А},$$

$$I_{L\ RMS\ max} = \sqrt{\left( \frac{5}{0,9 \cdot 5} \right)^2 + \frac{1}{12} \left( \frac{5}{1,0 \cdot 10^6 \cdot 10 \cdot 10^{-6}} \frac{(12 - 5)}{12} \right)^2} = 1,11 \text{ А}.$$

Важно, чтобы пиковые значений тока не превышали ток насыщения катушки индуктивности, а действующие значения тока не превышали её номинального тока. Исходя из этих соображений выберем катушку индуктивности DEM8045Z-100M номиналом 10 мкГн.

Теперь проверим, что во всех локальных экстремумах значение коэффициента пульсации тока не превышает допустимых значений, то есть удовлетворяет условию



$$\delta = \frac{\Delta I_L}{I_{in}} = \frac{\eta U_{in}^2 (U_{out} - U_{in})}{W_{out} U_{out} L f_{sw}} \leq [\delta] = 0,2 \dots 0,4 :$$

$$\delta|_{U_{in}=5B} = \frac{0,9 \cdot 5^2}{5} \frac{(12-5)}{12 \cdot 10,0 \cdot 10^{-6} \cdot 1,0 \cdot 10^6} = 0,26 \leq [\delta] = 0,2 \dots 0,4 ;$$

$$\delta|_{U_{in}=8B} = \frac{0,9 \cdot 8^2}{5} \frac{(12-8)}{12 \cdot 10,0 \cdot 10^{-6} \cdot 1,0 \cdot 10^6} = 0,38 \leq [\delta] = 0,2 \dots 0,4 ;$$

Как видно, условие не нарушается, а значит, выбранная катушка индуктивности удовлетворяет поставленным требованиям.

#### 4.5 Расчёт выходного конденсатора

Также импульсному преобразователю напряжения необходим выходной конденсатор для запасаения энергии, обеспечения стабильности колебательного контура и уменьшения выбросов напряжения при переходных процессах ([1], р. 19). Требуемая ёмкость выходного конденсатора  $C_{out}$ , Ф может быть вычислена по формуле ([1], eq. 11)

$$C_{out} = \frac{I_{out} (U_{out} - U_{in})}{f_{sw} U_{out} \Delta U}, \quad (4.13)$$

или, с учётом  $W_{out} = U_{out} I_{out}$ ,

$$C_{out} = \frac{W_{out} (U_{out} - U_{in})}{f_{sw} U_{out}^2 \Delta U}, \quad (4.14)$$

где  $U_{in}$  и  $U_{out}$  — входное и выходное напряжения преобразователя, В;

$W_{out}$  — выходная мощность преобразователя, Вт;

$I_{out}$  — выходной ток преобразователя, А;

$f_{sw}$  — частота переключения ключа (транзистора), Гц;

$\Delta U$  — требуемый размах пульсаций выходного напряжения, В.

Задавшись размахом пульсаций выходного напряжения  $\Delta U = 10$  мВ, рассчитаем требуемую ёмкость выходного конденсатора по формуле (4.14):

$$C_{out \min} = \frac{5 \cdot (12 - 5)}{1,0 \cdot 10^6 \cdot 12^2 \cdot 10 \cdot 10^{-3}} = 24,3 \text{ мкФ.}$$

В качестве выходной ёмкости будем использовать несколько конденсаторов СС0805KRX5R9BB106 номиналом 10 мкФ. Вследствие температурного изменения ёмкости в  $\pm 15\%$  от номинальной и собственного отклонения ёмкости в  $\pm 10\%$  от номинальной используем не три, а четыре таких конденсатора, получив выходную ёмкость  $C_{out} = 40$  мкФ.

#### 4.6 Расчёт входного конденсатора

Для фильтрации импульсных помех на входе импульсному преобразователю напряжения необходим входной конденсатор. При этом, чем больше номинал входного конденсатора, тем больший размах пульсаций этот конденсатор способен отфильтровать ([1], р. 20).

С целью обеспечения размаха пульсаций входного напряжения равным  $\Delta U = 10$  мкВ в качестве входной ёмкости также используем набор из четырёх конденсаторов СС0805KRX5R9BB106 суммарной ёмкостью  $C_{in} = 40$  мкФ.

#### 4.7 Стабилизация и компенсация наклона колебательного контура

Микросхема TSP61378-Q1 осуществляет управление пиковым током с фиксированной частотой. Для подавления субгармонических колебаний в ней используется внутренняя адаптивная компенсация наклона амплитудно-частотной (АЧХ) и фазо-частотной (ФЧХ) характеристик колебательного контура при номинальном входном напряжении ([1], pp. 20 – 23).

Не вдаваясь в подробности осуществления компенсации наклона, заметим, что она осуществляется путём подключения к выводу COMP RC-цепочки, состоящей, собственно, из резистора и конденсатора. Номиналы этих компонентов подбираются таким образом, чтобы наклон ФЧХ колебательного контура при номинальном входном напряжении был более  $45^\circ/\text{дек}$ , а АЧХ при тех же условиях — более  $10 \text{ дБ/дек}$ .

Для стабилизации и компенсации колебательного контура выберем резистор RC0603FR-07100KL номиналом  $R_{comp} = 100$  кОм и конденсатор СС0603KRX7R9BB222 номиналом  $C_{comp} = 2,2$  нФ.

#### 4.8 Расчёт конденсатора накачки

Для накачки затвора МДП-транзистора, расположенного внутри микросхемы TPS61378-Q1, используется конденсатор накачки конденсатор  $C_{BST}$ , который подключается между выводами BST и SW. На его роль рекомендуются высококачественные керамические конденсаторы с низким эквивалентным последовательным сопротивлением номиналом от 0,1 мкФ до 1 мкФ ([1], р. 23).

В качестве конденсатора накачки выберем конденсатор CC0603KPX5R9BB224 номиналом  $C_{BST} = 0,22$  мкФ.

#### 4.9 Расчёт конденсатора регулятора $V_{CC}$

Для обеспечения питанием драйвера и нагрузочного конденсатора и поддержания стабильности работы регулятора  $V_{CC}$  микросхемы TPS61378-Q1 используется конденсатор  $C_{VCC}$  между выводом VCC и потенциалом земли GND. На его роль рекомендуются высококачественные керамические конденсаторы с низким эквивалентным последовательным сопротивлением номиналом, превышающим номинал конденсатора накачки  $C_{BST}$  хотя бы в 10 раз ([1], р. 23).

В качестве конденсатора регулятора  $V_{CC}$  выберем конденсатор CC0603KPX5R9BB225 номиналом  $C_{VCC} = 2,2$  мкФ.

#### 4.10 Выбор подтягивающих резисторов

Для работы преобразователя напряжения на базе микросхемы TPS61378-Q1 на её вывод EN необходимо подать высокий уровень напряжения ([1], р. 12). Для этого необходимо выполнить подтяжку к питанию VCC. Также выполнить подтяжку к питанию необходимо для вывода PG, так как работает в режиме «открытый коллектор» (англ. open drain в случае использования МДП-транзисторов) ([1], р. 14).

В качестве подтягивающих резисторов, как правило, выбирают резисторы номиналом от 10 кОм и выше. Выберем резисторы RC0603FR-0710KL номиналом 10 кОм.

#### 4.11 Выбор прочих компонентов

Для включения/выключения преобразователя напряжения между выводом EN и потенциалом земли GND установлен двухпозиционный движковый переключатель SDA01H1SBD. Этот переключатель является нормально закрытым ключом, что соответствует замыканию вывода EN на потенциал земли GND и подачу на него низкого уровня напряжения, то есть отключению преобразователя напряжения.

Также для работы микросхемы необходимо подключить конденсатор номиналом от 0,22 мкФ до 1 мкФ между выводом OUT и потенциалом земли GND ([1], р. 20). В качестве него выбран конденсатор CC0603KPX5R9BB224 номиналом 0,22 мкФ.

					СПБПУ.3331506.019	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		20

## 5 Расчёт стоимости производства устройства

### 5.1 Стоимость производства печатной платы

Произведём оценку стоимости производства печатной платы. Спроектированная плата имеет два проводящих слоя толщиной 35 мкм и размеры  $50,0 \times 25,0 \times 1,5$  мм. Диаметр переходных отверстий — 0,3 мм. Маска и маркировка (шелкография) нанесены с обеих сторон платы.

При заказе производства серии из 10 плат с указанными выше параметрами в компании «Резонит» стоимость партии оценивается в 3362 руб. 52 коп. (см. рисунок 5.1).

**РЕЗОНИТ**

Срочные печатные платы

Серийные печатные платы

HighTech печатные платы

Трафареты для монтажа

Монтаж печатных плат

Срочный заказ модулей

8 800 777-81-18  
8 495 777-80-80

Главная → Печатные платы

### Печатные платы

Размеры:

X  мм

Количество штук:

Сроки производства:

Количество слоев:

Маска:

Маркировка:

Рассчитать

Предварительная стоимость  
**3 362.52 Р**

Заказать

Расширенный калькулятор в личном кабинете →

**Поставка крупных серий печатных плат**

- персональный расчет за 24 часа
- инженерная поддержка
- подбор оптимальной логистики (авиа, ж/д, морская доставка)
- годовое планирование объемов

Запросить стоимость

Рисунок 5.1 — Калькулятор заказов на сайте компании «Резонит» (<https://www.rezonit.ru/>)

### 5.2 Стоимость закупки компонентов

Список электронных компонентов приведён в приложении В.

Произведём оценку стоимости закупки компонентов. С помощью инструмента Price and Availability Assistant выполним расчёт стоимости компонентов. Информация о стоимости компонентов приведена в таблице 5.1.

В соответствии с таблицей 5.1, суммарная стоимость компонентов составляет \$26,567, что по курсу  $\$1 = 73,54$  руб. соответствует 1953 руб. 74 коп.

Таким образом, стоимость производства платы и закупки компонентов (то есть стоимость устройства) составляет величину порядка 2289 руб. 00 коп.

					СПБПУ.3331506.019	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		21

Таблица 5.1 — Стоимость компонентов

Part Number Mouser	Part Number производителя	Производитель	Количе- ство	Цена за штуку	Стои- мость
603-CC805KRX5R9BB106	CC805KRX5R9BB106	Yageo	8	\$0.682	\$5.46
603-CC0603KRX5R9BB22	CC0603KRX5R9BB224	Yageo	2	\$0.291	\$0.58
603-C0603KRX7R9BB222	CC0603KRX7R9BB222	Yageo	1	\$0.163	\$0.16
603-CC0603KRX59BB225	CC0603KRX5R9BB225	Yageo	1	\$0.567	\$0.57
595-TPS61378QWRTERQ1	TPS61378QWRTERQ1	Texas Instruments	1	\$5.15	\$5.15
78-TLMS1000	TLMS1000-GS08	Vishay	1	\$0.649	\$0.65
78-TLMG1100	TLMG1100-GS08	Vishay	1	\$0.714	\$0.71
81-DEM8045Z-100M=P3	DEM8045Z-100M=P3	Murata	1	\$1.46	\$1.46
603-RC0603FR-07220RL	RC0603FR-07220RL	Yageo	3	\$0.163	\$0.49
603-RC0603FR-0710KL	RC0603FR-0710KL	Yageo	2	\$0.163	\$0.33
603-RC0603FR-0727KL	RC0603FR-0727KL	Yageo	1	\$0.163	\$0.16
603-RC0603FR-0739KL	RC0603FR-0739KL	Yageo	1	\$0.163	\$0.16
603-RC0603FR-07100KL	RC0603FR-07100KL	Yageo	1	\$0.163	\$0.16
603-RC0603FR-07470KL	RC0603FR-07470KL	Yageo	1	\$0.163	\$0.16
603-RC0603FR-0733KL	RC0603FR-0733KL	Yageo	1	\$0.163	\$0.16
611-SDA01H1SBD	SDA01H1SBD	C&K Switches	1	\$1.99	\$1.99
625-SS36-E3	SS36-E3/57T	Vishay	2	\$0.827	\$1.65
78-BZD17C9V1P	BZD17C9V1P-E3-08	Vishay	1	\$0.207	\$0.207
595-CSD19532Q5B	CSD19532Q5B	Texas Instruments	1	\$4.08	\$4.08
571-1776275-2	1776275-2	TE Connectivity	2	\$1.14	\$2.28
				Итого:	\$26.567

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения работы был изучен принцип функционирования импульсного повышающего преобразователя напряжения. Также были изучены основы расчёта электрических компонентов преобразователя.

Был произведён расчёт электрических компонентов, необходимых для функционирования преобразователя напряжения в требуемом режиме — с заданными значениями выходных тока и напряжения, а также диапазона входных напряжений.

Была рассчитана стоимость производства печатной платы и закупки электронных компонентов для поверхностного монтажа.

Были представлены принципиальная электрическая схема, файлы для производства печатной платы, список электронных компонентов и файлы проекта САПР Altium Designer.

В результате выполнения работы были получены навыки расчёта и проектирования импульсных преобразователей напряжения.

					<i>СПБПУ.3331506.019</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		23

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. TPS61378-Q1 25- $\mu$ A Quiescent Current Synchronous Boost Converter with Load Disconnect [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps61378-q1.pdf> (дата обращения: 01.01.2021).

2. Basic Calculation of a Boost Converter's Power Stage [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://www.ti.com/lit/an/slva372c/slva372c.pdf> (дата обращения: 01.01.2021).

3. Working with Boost Converters [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://www.ti.com/lit/an/snva731/snva731.pdf> (дата обращения: 01.01.2021).

					СПБПУ.3331506.019	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		24



**Приложение А**  
**Схема электрическая функциональная**

					<i>СПБПУ.3331506.019</i>	<i>Лист</i>
						25
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		

**Приложение Б**  
**Схема электрическая принципиальная**

					<i>СПБПУ.3331506.019</i>	<i>Лист</i>
						26
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		

## Приложение В

### 3D-модель печатной платы

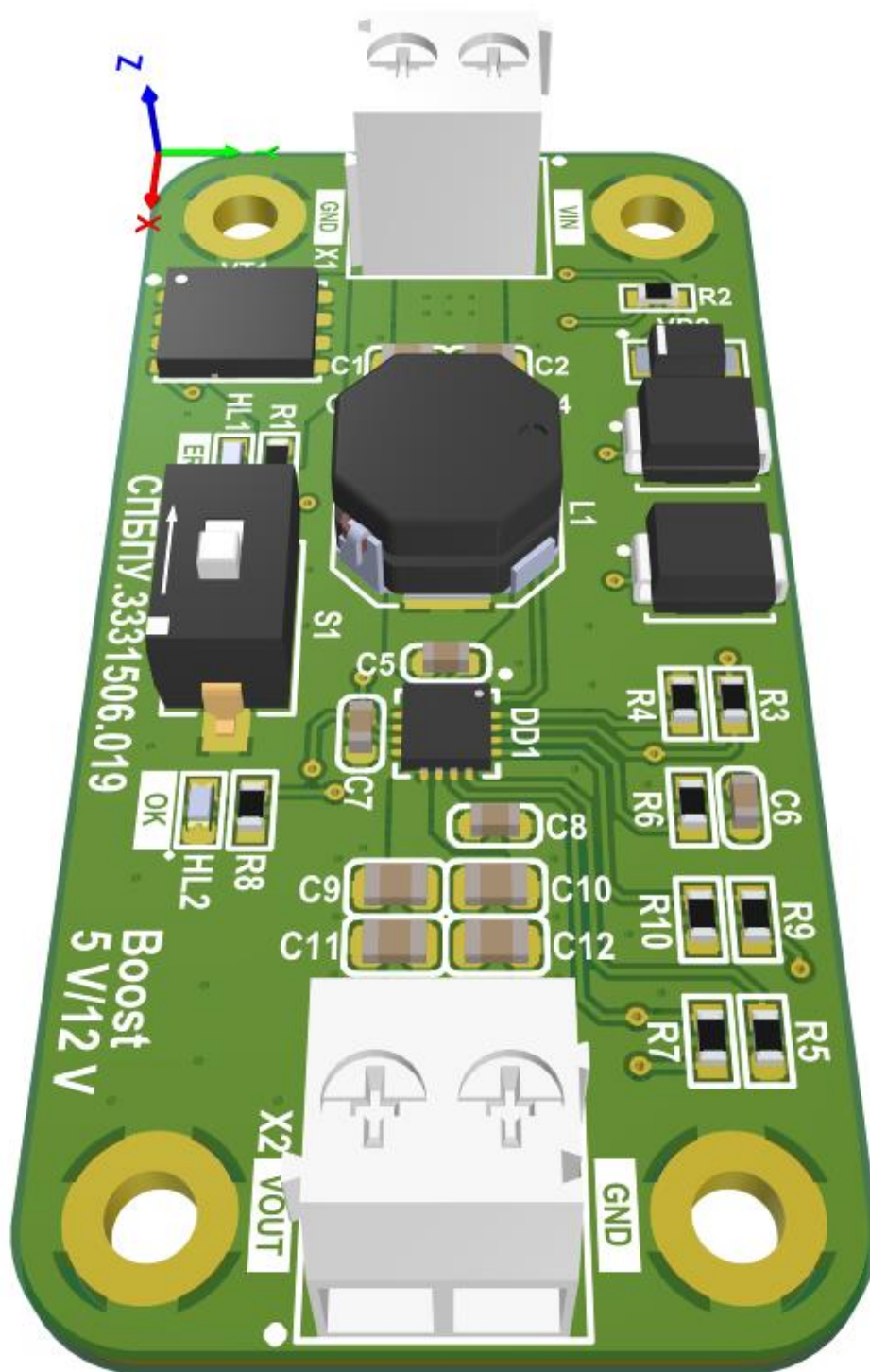


Рисунок В.1 — 3D-модель печатной платы

## Приложение Г

### Список электронных компонентов

Таблица Г.1 — Список электронных компонентов

Описание	Наименование	Производитель	Количество
Конденсатор чип 0805 10 мкФ 50 В $\pm 10\%$	CC0805KRX5R9BB106	YAGEO Corp.	8
Конденсатор чип 0603 220 нФ 50 В $\pm 10\%$	CC0603KPX5R9BB224	YAGEO Corp.	2
Конденсатор чип 0603 2,2 нФ 50 В $\pm 10\%$	CC0603KRX7R9BB222	YAGEO Corp.	1
Конденсатор чип 0603 2,2 мкФ 50 В $\pm 10\%$	CC0603KRX5R9BB225	YAGEO Corp.	1
Повышающий преобразователь напряжения 18,5 В и 4,8 А	TPS61378QWRTERQ1	Texas Instruments	1
Светодиод чип 0603 красный	TLMS1000-GS08	Vishay Intertechnology, Inc.	1
Светодиод чип 0603 зеленый	TLMG1100-GS08	Vishay Intertechnology, Inc.	1
Катушка индуктивности 10 мкГн $\pm 20\%$	DEM8045Z-100M	Murata Manufacturing Co., Ltd.	1
Резистор чип 0603 220 Ом $\pm 1\%$ 0,1 Вт	RC0603FR-07220RL	YAGEO Corp.	3
Резистор чип 0603 10 кОм $\pm 1\%$ 0,1 Вт	RC0603FR-0710KL	YAGEO Corp.	2
Резистор чип 0603 27 кОм $\pm 1\%$ 0,1 Вт	RC0603FR-0727KL	YAGEO Corp.	1
Резистор чип 0603 39 кОм $\pm 1\%$ 0,1 Вт	RC0603FR-0739KL	YAGEO Corp.	1
Резистор чип 0603 100 кОм $\pm 1\%$ 0,1 Вт	RC0603FR-07100KL	YAGEO Corp.	1
Резистор чип 0603 470 кОм $\pm 1\%$ 0,1 Вт	RC0603FR-07470KL	YAGEO Corp.	1
Резистор чип 0603 33 кОм $\pm 1\%$ 0,1 Вт	RC0603FR-0733KL	YAGEO Corp.	1
2-х позиционный движковый переключатель	SDA01H1SBD	C&K	1
Диод Шоттки 60 В 3 А	SS36-E3/57T	Vishay Intertechnology, Inc.	2
Стабилитрон 9,1 В	BZD17C9V1P	Vishay Intertechnology, Inc.	1
Транзистор полевой N-канальный 100 В 17 А	CSD19532Q5B	Texas Instruments	1
Клеммная колодка с 2 выво- дами с шагом 3,5 мм	1776275-2	TE Connectivity	2