

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

Кученов Д. С.

Преподаватель

Капустин Д. А.

« » _____ 2020 г.

Санкт-Петербург
2021

Содержание

| | |
|---|----|
| Задание | 3 |
| 1. Описание ключевых элементов схемы | 4 |
| 1.1. Разъемы..... | 4 |
| 1.2. Защита от напряжения обратной полярности..... | 4 |
| 1.3. Преобразователь напряжения..... | 4 |
| 1.4. Световая индикация. | 6 |
| 2. Расчет параметров электронных компонентов. | 7 |
| 2.1. Расчет максимальной частоты переключения $f_{SW}(\max)$ и резистора R_{RT}/CLK | 7 |
| 2.2. Расчет минимального значения индуктивности..... | 8 |
| 2.3. Расчет выходной емкости. | 8 |
| 2.4. Расчет входной емкости..... | 9 |
| 2.5. Выбор конденсатора между выводами BOOT и SW. | 9 |
| 2.6. Расчет резисторов делителя напряжения на выводе EN. | 9 |
| 2.7. Расчет резисторов делителя напряжения на выводе FB..... | 10 |
| 2.8. Расчет резистора на выводе COMP. | 11 |
| 2.9. Расчет конденсаторов на выводе COMP. | 12 |
| 2.10. Расчет конденсатора на выводе SS/TR..... | 12 |
| 2.11. Расчет резистора для стабилитрона..... | 13 |
| 2.12. Расчет резистора для светодиода..... | 13 |
| 3. Перечень выбранных компонентов..... | 15 |
| Заключение | 16 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ..... | 17 |

Задание

Разработать понижающий преобразователь напряжения DC/DC 12В/5В на основе микросхемы TPS54561-Q1. Мощность преобразователя 10Вт. Преобразователь должен обеспечивать работу в диапазоне входных напряжений от 10В до 16В. Преобразователь должен быть защищен от подачи напряжения обратной полярности, а также от подачи напряжения больше 16В. В устройстве должно присутствовать индикация напряжения питания на выходе. Выход преобразователя должен быть защищен предохранителем.

Предоставить файлы проекта Altium Designer, перечень электронных компонентов, файлы для производства печатной платы, принципиальную электрическую схему изделия в формате pdf, отчет о лабораторной работе в формате pdf.

1. Описание ключевых элементов схемы

1.1.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. Были выбраны два разъема. На входе устройства — разъем семейства Micro-Fit от фирмы Molex 4-1775099-0, который используется в цепях питания материнских плат по стандарту ATX. На выходе устройства — разъем USB 2.0 type A 292303-5 от фирмы TE Connectivity.

1.2.Защита от напряжения обратной полярности.

Для защиты от переплюсовки используется полевой транзистор VT1 CSD19532Q5B. В случае правильного подключения питания и земли транзистор откроется, в противном случае он будет закрыт.

Напряжение затвор-исток данного транзистора не должно превосходить 20 В, а входное напряжение 16 В, поэтому для стабилизации напряжения используется резистор R1 с сопротивлением 20 кОм и стабилитрон VD1 BZD17C15P с номинальным напряжением стабилизации 15 В. Также для защиты данного стабилитрона в случае переплюсовки предусмотрен диод Шоттки VD2 SL13-E3/5AT.

На выходе микросхемы перед разъемом USB установлен предохранитель — диод Шоттки. С учетом возможных напряжений и тока нагрузки выбран диод VD4 SS3P4L-M3/87A с импульсным обратным напряжением 40 В, максимальным допустимым прямым током 3 А и пиковым падением напряжения 0,47 В.

1.3.Преобразователь напряжения.

Микросхема TPS54561-Q1 [1] — это понижающий преобразователь напряжения со встроенным высокочастотным МОП-транзистором. Способен управлять током нагрузки до 5 А при входном напряжении от 4,5 до 60 В. Устройство выдерживает импульсы сброса нагрузки до 65 В. Устройство

реализует постоянную частоту, управление токовым режимом, что снижает выходную емкость и упрощает внешнюю частотную компенсацию. Широкий диапазон частот переключения позволяет оптимизировать выбор компонентов выходного фильтра. Устройство выполняется в корпусе WSON-10 размером 4 x 4 мм.

Основные характеристики микросхемы преобразователя приведены в таблице 1.

Таблица 1 — Основные характеристики микросхемы TPS54561-Q1

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

Условное графическое изображение (УГО) микросхемы приведено на рисунке 1.

Далее приведено краткое описание контактов микросхемы [1, с.3]:

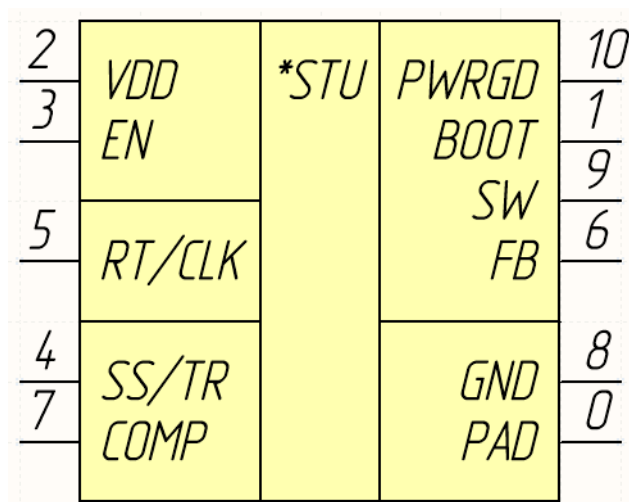


Рисунок 1 — УГО микросхемы TPS54561-Q1

- VDD — контакт для подключения входного напряжения питания с рабочим диапазоном от 4,5 В до 60 В.
- EN — контакт для защиты от пониженного напряжения.

- RT/CLK — контакт для установки частоты переключения.
- SS/TR — контакт для управления плавным стартом.
- COMP — контакт для подключения компонентов частотной компенсации.
- PWRGD — open drain выход, показывающий, достигло ли выходное напряжение своего номинального значения. Согласно документации [1, с. 22] подключен к питанию +5 В через резистор $R6 = 1 \text{ кОм}$.
- BOOT — между выводами BOOT и SW требуется конденсатор накачки. Если напряжение на этом конденсаторе ниже минимума, необходимого для работы высокочастотного МОП-транзистора, выход выключается до тех пор, пока конденсатор не будет перезаряжен.
- SW — коммутационный узел преобразователя.
- FB — вход компаратора обратной связи по выходному напряжению. Подключается к делителю напряжения, с помощью которого устанавливается выходное напряжение.
- GND, PAD — подключаются к «земле».

1.4.Световая индикация.

Для получения обратной связи от устройства предусмотрен светодиод HL1 TLMS1000-GS08 красного цвета. Он сигнализирует о наличии питания на выходе устройства. Перед светодиодом ставится резистор R9 на 220 Ом.

2. Расчет параметров электронных компонентов.

2.1. Расчет максимальной частоты переключения $f_{SW(max)}$ и резистора

$R_{RT/CLK}$.

Вычислим максимальную частоту переключения $f_{SW(max)}$ по формуле (1) [1, с. 19-20].

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

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 VD3 SS36-E3/57T ($V_d = 0,75$ В) и катушку L1 SRN6045-6R8Y ($L = 6,8$ мкГн, $R_{dc} = 0,0473$ Ом).

Из документации на микросхему: $t_{ON} = 100$ нс, $R_{DS(on)} = 87$ мОм.

Из задания $V_{IN} = 12$ В, $V_{OUT} = 5$ В, $I_{OUT} = 2$ А,

Подставив значения в формулу (1), получим

$$f_{SW(max)} = \frac{1}{100 \cdot 10^{-9}} \cdot \left(\frac{2 \cdot 0,0473 + 5 + 0,75}{12 - 2 \cdot 0,087 + 0,75} \right) = 4,67 \text{ МГц}$$

Выберем частоту 1,14 МГц.

Вычислим сопротивление резистора между контактом RT/CLK и GND по формуле (2) [1, с.19].

$$R_{RT/CLK} = \frac{101756}{f_{SW}^{1,008}} = \frac{101756}{1140^{1,008}} = R4 = 84,37 \text{ кОм} \quad (2)$$

Выбираем $f_{SW} = 1140$ Гц и $R_{RT/CLK} = R4 = 86,6$ кОм.

2.2. Расчет минимального значения индуктивности.

Для расчета минимального значения индуктивности используем формулу (3) [1, с.30].

$$L_{min} = \frac{V_{IN} - V_{OUT}}{I_{OUT} \cdot K_{IND}} \cdot \frac{V_{OUT}}{V_{IN} \cdot f_{SW}}, \quad (3)$$

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

Подставив значения в формулу (3), получим

$$L_{min} = \frac{16 - 5}{2 \cdot 0,3} \cdot \frac{5}{16 \cdot 1140 \cdot 10^3} = 5,03 \text{ мкГн}$$

Для расчета тока пульсации используем формулу (4) [1, с.30].

$$I_{RIPPLE} = \frac{V_{OUT} \cdot (V_{IN} - V_{OUT})}{V_{IN} \cdot L \cdot f_{SW}} = \frac{5 \cdot (16 - 5)}{16 \cdot 6,8 \cdot 10^{-6} \cdot 1140 \cdot 10^3} = 0,443 \text{ А} \quad (4)$$

Для расчета пикового тока индуктивности используем формулу (5) [1, с.30].

$$I_{L(peak)} = I_{OUT} + \frac{I_{RIPPLE}}{2} = 2 + \frac{0,443}{2} = 2,222 \text{ А} \quad (5)$$

Оставляем выбранную катушку индуктивности L1 SRN6045-6R8Y ($L = 6,8 \text{ мкГн}$, $R_{dc} = 0,0473 \text{ Ом}$, $I_{sat} = 3,8 \text{ А}$).

2.3. Расчет выходной емкости.

Расчет выходной емкости C_{OUT} по току пульсации выполняется по формуле (6) [1, с.32].

$$C_{OUT} > \frac{1}{8 \cdot f_{SW}} \cdot \frac{I_{RIPPLE}}{V_{OUT(RIPPLE)}}, \quad (6)$$

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

Подставив значения в формулу (6), получим

$$C_{OUT} > \frac{1}{8 \cdot f_{SW}} \cdot \frac{I_{RIPPLE}}{V_{OUT(RIPPLE)}} = \frac{1}{8 \cdot 1140 \cdot 10^3} \cdot \frac{0,443}{25 \cdot 10^{-3}} = 1,94 \text{ мкФ}$$

Эквивалентное последовательное сопротивление конденсатора должно быть меньше значения, которое рассчитывается по формуле (7) [1, с.32].

$$R_{ESR} < \frac{V_{OUT(RIPPLE)}}{I_{RIPPLE}} = \frac{25 \cdot 10^{-3}}{0,443} = 56 \text{ мОм} \quad (7)$$

Используем 2 параллельно соединенных керамических конденсатора С7 и С8 (47 мкФ, 10 В, Х7R).

2.4.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 (8) [1, с.33].

$$I_{CI} = I_{OUT} \cdot \sqrt{\frac{V_{OUT}}{V_{IN(min)}} \cdot \frac{(V_{IN(min)} - V_{OUT})}{V_{IN(min)}}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{5}{10} \cdot \frac{(10 - 5)}{10}} = 1 \text{ А} \quad (8)$$

Выбираем два параллельно соединенных керамических конденсатора С1 и С2 (10 мкФ, 25 В, Х5R).

2.5.Выбор конденсатора между выводами BOOT и SW.

Согласно даташиту в пункте 7.3.4 [1, с.13] для правильной работы схемы между выводами BOOT и SW рекомендуется использовать керамический конденсатор емкостью 0,1 мкФ с диэлектриком Х5R или Х7R и номинальным напряжением не менее 10 В.

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

2.6.Расчет резисторов делителя напряжения на выводе EN.

Вывод EN предназначен для защиты от подачи слишком низкого напряжения. При падении напряжения ниже 4 В на контакте VDD или ниже 1,2 В на контакте EN, микросхема отключается. Для увеличения значения напряжения отключения можно использовать делитель напряжения.

Расчет резисторов делителя напряжения на выводе EN выполняется по формулам (9) и (10) [1, с.14]. Напряжение остановки V_{STOP} должно быть равно минимальному входному напряжению, следовательно, $V_{STOP} = 10$ В. Напряжение старта V_{START} обычно выбирают больше V_{STOP} на 0,5 В, следовательно, $V_{START} = 10,5$ В.

$$R_{UVLO1} = \frac{V_{START} - V_{STOP}}{I_{HYS}}, \quad (9)$$

$$R_{UVLO2} = \frac{V_{(EN)th}}{\frac{V_{START} - V_{ENA}}{R_{UVLO1}} + I_1}, \quad (10)$$

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

Из документации [1, с.5]: $I_{HYS} = 3,4$ мкА, $V_{(EN)th} = 1,2$ В, $I_1 = 1,2$ мкА.

Подставив значения в формулы (1.9) и (1.10), получим

$$R_{UVLO1} = \frac{V_{START} - V_{STOP}}{I_{HYS}} = \frac{10,5 - 10}{3,4 \cdot 10^{-6}} = R2 = 147 \text{ кОм}$$

$$R_{UVLO2} = \frac{1,2}{\frac{10,5 - 1,2}{147 \cdot 10^3} + 1,2 \cdot 10^{-6}} = R3 = 18,61 \text{ кОм}$$

Используем резисторы $R2 = 147$ кОм и $R3 = 18,61$ кОм.

2.7. Расчет резисторов делителя напряжения на выводе FB.

Расчет резисторов R_{HS} и R_{LS} делителя напряжения на выводе FB выполняется по формуле (11) [1, с.14].

$$R_{HS} = R_{LS} \cdot \frac{V_{OUT} - 0,8}{0,8} \quad (11)$$

Рекомендованное значение $R_{LS} = R8 = 11,5 \text{ кОм}$. Подставив значения в формулу (11), получим

$$R_{HS} = 11,5 \cdot 10^3 \cdot \frac{5 - 0,8}{0,8} = R7 = 60,4 \text{ кОм}$$

Используем резисторы $R7 = 60,4 \text{ кОм}$ и $R8 = 11,5 \text{ кОм}$.

2.8. Расчет резистора на выводе COMP.

Расчет резистора на выводе COMP выполняется по формуле (12) [1, с.35].

$$R_{COMP} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_{c0} \cdot C_{OUT}}{gmps} \cdot \frac{V_{OUT}}{V_{REF} \cdot gmea}, \quad (12)$$

где $gmps = 17 \text{ А/В}$; $V_{REF} = 0,8 \text{ В}$; $gmea = 350 \text{ мкА/В}$; f_{c0} рассчитывается по формуле (13) [1, с.34].

$$f_{c0} = \sqrt{f_{p(mod)} \cdot \frac{f_{SW}}{2}}, \quad (13)$$

где $f_{p(mod)}$ рассчитывается по формуле (14) [1, с.34].

$$f_{p(mod)} = \frac{I_{OUT}}{2 \cdot \pi \cdot V_{OUT} \cdot C_{OUT}} = \frac{2}{2 \cdot 3,14 \cdot 5 \cdot 47 \cdot 10^{-6}} = 1355 \text{ Гц} \quad (14)$$

Подставив значения в формулу (13), получим

$$f_{c0} = \sqrt{f_{p(mod)} \cdot \frac{f_{SW}}{2}} = \sqrt{1355 \cdot \frac{1140 \cdot 10^3}{2}} = 27,8 \text{ кГц}$$

Подставив значения в формулу (12), получим

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

$$= \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 27,8 \cdot 10^3 \cdot 47 \cdot 10^{-6}}{17} \cdot \frac{5}{0,8 \cdot 350 \cdot 10^{-6}} = R5 = 23,7 \text{ кОм}$$

Используем резистор $R5 = 23,7 \text{ кОм}$.

2.9. Расчет конденсаторов на выводе COMP.

Расчет конденсаторов на выводе COMP выполняется по формулам (15) и (16) [1, с.35].

$$C_{COMP1} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_{COMP} \cdot f_{p(mod)}} =$$

$$= \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 23,7 \cdot 10^3 \cdot 1355} = C4 = 1 \text{ нФ} \quad (15)$$

$$C_{COMP2} = \frac{1}{R_{COMP} \cdot f_{SW} \cdot \pi} =$$

$$= \frac{1}{23,7 \cdot 10^3 \cdot 1140 \cdot 10^3 \cdot 3,14} = C5 = 18 \text{ пФ} \quad (16)$$

Используем конденсатор $C4 = 1 \text{ нФ}$, 50 В, C0G, и конденсатор $C5 = 18 \text{ пФ}$, 50 В, C0G.

2.10. Расчет конденсатора на выводе SS/TR.

Для расчета емкости конденсатора плавного пуска на выводе SS/TR воспользуемся формулой (17) [1, с.15,33].

$$C_{SS} = \frac{t_{SS} \cdot I_{SS}}{V_{REF} \cdot 0,8}, \quad (17)$$

где t_{SS} – время плавного пуска, с; $V_{REF} = 0,8 \text{ В}$; $I_{SS} = 1,7 \text{ мА}$.

Подставив значения в формулу (17), получим

$$C_{SS} = \frac{t_{SS} \cdot I_{SS}}{V_{REF} \cdot 0.8} = \frac{1,02 \cdot 1,7}{0,8 \cdot 0,8} = C3 = 2,7 \text{ нФ}$$

Используем конденсатор C3 = 2,7 нФ, 50 В, C0G

2.11. Расчет резистора для стабилитрона.

Выбираем стабилитрон BZD17C15P с напряжением стабилизации $U_{\text{стаб}} = 15 \text{ В}$ при силе тока стабилизации $I_{\text{стаб}} = 50 \text{ мА}$.

Расчет сопротивления резистора выполняется по формуле (18)

$$R = \frac{U_{\text{вх}} - U_{\text{стаб}}}{I_{\text{стаб}}}, \quad (18)$$

где $U_{\text{вх}}$ – входное напряжение.

Рассчитаем сопротивления резистора для максимально возможного входного напряжения $U_{\text{вх}} = 16 \text{ В}$.

$$R = \frac{16 - 15}{0,05} = 20 \text{ Ом}$$

Используем резистор R1 = 20 Ом.

2.12. Расчет резистора для светодиода.

Устройство имеет сигнальный светодиод на выходе микросхемы. По сигналу светодиода можно судить о наличии питания на выходе микросхемы. Выберем светодиод HL1 TLMS1000-GS08.

Рассчитаем резистор для питания светодиода. Сопротивление и мощность резистора вычисляются по формулам (19) и (20)

$$R = \frac{U_S - U_{LED}}{I_{LED}}, \quad (19)$$

$$P = I^2 R, \quad (20)$$

где U_S – входное напряжение, В; U_{LED} – номинальное падение напряжения на светодиоде, В; I_{LED} – прямой ток светодиода, А.

Для светодиода HL1 TLMS1000-GS08 с номинальным падением напряжения 1,8 В и прямым током 15 мА при максимальном напряжении питания 5 В вычислим сопротивление резистора

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

Возьмем стандартное значение номинала резистора $R9 = 220 \text{ Ом}$

Тогда ток через светодиод равен

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

Определим необходимую мощность резистора по формуле 20

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

Возьмем значение мощности резистора $P = 0,1 \text{ Вт}$. Выберем резистор R9 RC0603FR-07220RL с номинальным напряжением 75 В и мощностью 0,1 Вт.

3. Перечень выбранных компонентов

В таблице 3.1 приведен перечень выбранных компонентов для создания платы.

Таблица 2 — Перечень компонентов

| Производитель | Наименование | Количество |
|--------------------------------|---------------------|------------|
| Murata Manufacturing Co., Ltd. | GRM21BR61E106MA73L | 2 |
| TDK Corporation | C2012C0G1H272J060AA | 1 |
| Murata Manufacturing Co., Ltd. | GRM1555C1H102JA01J | 1 |
| Samsung electro-mechanics | CL21C180JBANNC | 1 |
| Murata Manufacturing Co., Ltd. | GRM155R71A104KA01D | 1 |
| Murata Manufacturing Co., Ltd. | GRM32ER71A476KE15 | 2 |
| Texas Instruments | TPS54561-Q1 | 1 |
| Vishay Intertechnology, Inc. | TLMS1000-GS08 | 1 |
| Bourns, Inc. | SRN6045-6R8Y | 1 |
| YAGEO Corp. | RC0402FR-0718K7L | 2 |
| YAGEO Corp. | RC0603FR-07147KL | 1 |
| YAGEO Corp. | RC0201FR-0786K6L | 1 |
| YAGEO Corp. | RC0201FR-0723K7L | 1 |
| Vishay Intertechnology, Inc. | CRCW04021K00FKED | 1 |
| Vishay Intertechnology, Inc. | CRCW040260K4FKED | 1 |
| Vishay Intertechnology, Inc. | CRCW040211K5FKED | 1 |
| YAGEO Corp. | RC0603FR-07220RL | 1 |
| Vishay Intertechnology, Inc. | BZD17C15P | 1 |
| Vishay Intertechnology, Inc. | SL13-E3/5AT | 1 |
| Vishay Intertechnology, Inc. | SS36-E3/57T | 1 |
| Vishay Intertechnology, Inc. | SS3P4L-M3/87A | 1 |
| Texas Instruments | CSD19532Q5B | 1 |
| TE Connectivity | 4-1775099-0 | 1 |
| TE Connectivity | 292303-5 | 1 |

Заключение

В ходе лабораторной работы был разработан понижающий-повышающий преобразователь напряжения DC/DC 12В/5В на основе микросхемы TPS54561-Q1. Дано описание микросхемы, выполнен выбор электронных компонентов.

Результатами выполнения лабораторной работы являются принципиальная электрическая схема, файлы проекта Altium Designer, файлы производства, а также перечень электронных компонентов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. TPS54561-Q1 4.5-V to 60-V Input, 5-A, Step-Down DC-DC Converter With Eco-mode™ datasheet (Rev. A), URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps54561-q1.pdf>