

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

# Отчёт

по курсовому проекту

Дисциплина: Современные методы проектирования электронных узлов  
роботов

Тема: Плата управления нагревом

Студент гр. 3331506/70401

Куликов М. М.

Преподаватель

Капустин Д. А.

«    » \_\_\_\_\_ 2021 г.

Санкт-Петербург  
2021

## Содержание

1	Техническое задание.....	3
2	Плата управления нагревом.....	4
2.1	Описание модуля .....	4
2.2	Основные компоненты.....	4
2.2.1	STM32F103CBT6.....	4
2.2.2	Защита от перенапряжения и переполюсовки .....	5
2.2.3	Преобразователь напряжений.....	7
2.2.4	Нагреватели.....	9
2.2.5	Датчики температуры .....	9
2.2.6	Кулеры .....	9
2.2.7	RS232 .....	9
2.3	Расчет и выбор элементов обвязки LMR16020 .....	10
2.3.1	Расчет резисторов для входа FB .....	10
2.3.2	Расчет частоты переключения $f_{SW}$ .....	11
2.3.3	Расчет значения индуктивности .....	11
2.3.4	Выбор конденсаторов на входе микросхемы .....	11
2.3.5	Расчёт конденсатора на выходе микросхемы.....	11
2.3.6	Выбор резистора для входа PGOOD .....	12
2.3.7	Выбор диода Шоттки.....	12
2.3.8	Выбор конденсатора для выхода BOOT .....	12
2.3.9	Индикация выходного напряжения.....	13
2.4	Расчет и выбор элементов обвязки микросхемы TPS1663.....	14
2.4.1	Расчет резисторов делителя напряжения.....	14
2.4.2	Выбор входного конденсатора.....	15
2.4.3	Расчет конденсатора для выхода dVdT.....	15
2.4.4	Расчет резистора для выхода ILIM.....	15
2.4.5	Режим низкого энергопотребления .....	16
	Заключение .....	17
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	18

# 1 Техническое задание

Требуется разработать плату управления нагревом для конвекционной печи, функциональная схема задания представлена на рисунке 1.

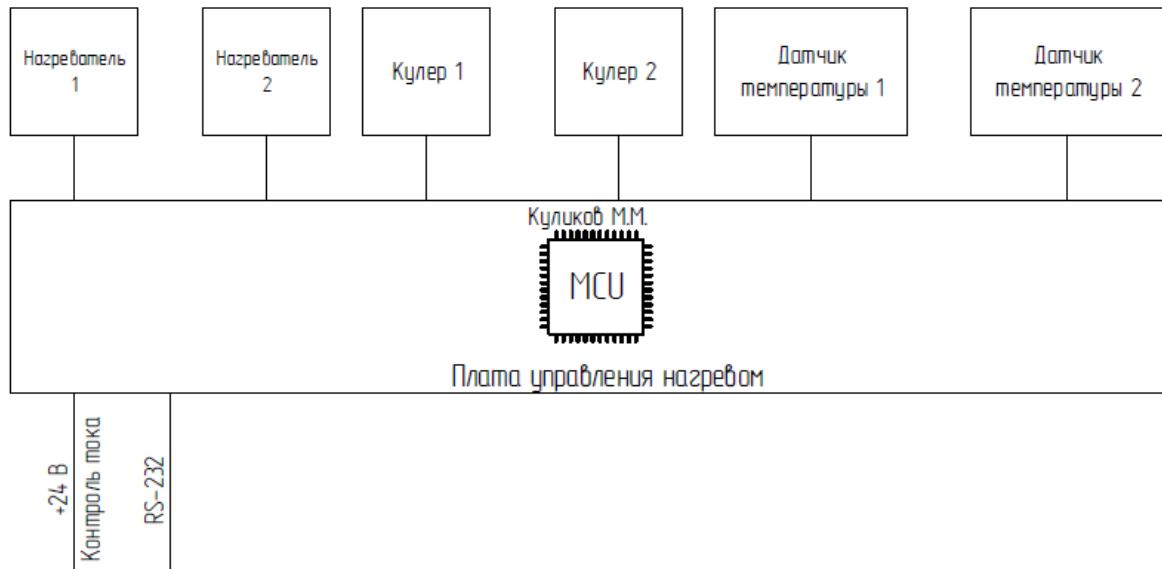


Рисунок 1 — Функциональная схема задания

## **2 Плата управления нагревом**

### **2.1 Описание модуля**

Данный модуль отвечает за подключение элементов нагрева конвекционной печи. Питание модуль получает от платы управления через двухконтактный разъем, связывается с платой управления по интерфейсу RS232, и имеет возможность подключения нагревательных приборов, кулеров и датчиков температуры. Компонент построен на базе микроконтроллера STM32F103CBT6.

### **2.2 Основные компоненты**

#### **2.2.1 STM32F103CBT6**

Семейство линейки STM32F103xx с производительностью средней плотности включает высокопроизводительное 32-битное ядро RISC ARM® Cortex®-M3, работающее на частоте 72 МГц, высокоскоростную встроенную память (флэш-память до 128 Кбайт и SRAM до 20 Кбайт) , а также широкий спектр усовершенствованных устройств ввода-вывода и периферийных устройств, подключенных к двум шинам APB. Все устройства предлагают два 12-битных АЦП, три 16-битных таймера общего назначения плюс один таймер ШИМ, а также стандартные и расширенные интерфейсы связи: до двух I2C и SPI, три USART, USB и CAN.

Данная микросхема осуществляет подключение и управление нагревательными элементами, получает информацию с датчиков температуры, а также управляет кулерами, необходимыми для контроля температуры печи.

На рисунке 2 представлена схема подключения компонента STM32F103CBT6.

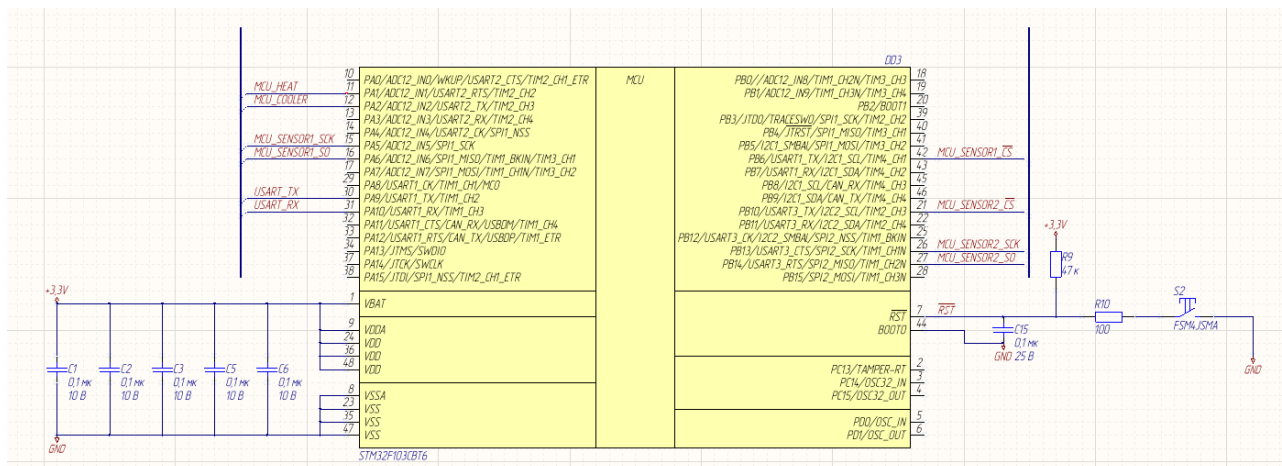


Рисунок 2 — Схема подключения STM32F103CBT6

## 2.2.2 Защита от перенапряжения и переполюсовки

В данной работе используется защитная микросхема TPS1663 [1], которая представляет собой multifunctional электронный предохранитель и обеспечивает защиту от перегрузки по току, защиту от короткого замыкания, контроль скорости нарастания выходного сигнала, защиту от перенапряжения и блокировку пониженного напряжения.

Основные характеристики данной микросхемы приведены в таблице 1.

Таблица 1 — Характеристики микросхемы TPS1663

Параметр	Значение
Номинальное напряжение, В	от 4,5 до 60
Номинальный ток, А	до 6
Рабочие температуры, °C	от -40 до 150
Температура теплового отключения, °C	165

На рисунке 3 представлено условное графическое обозначение микросхемы.

1	IN	*ST	OUT	18
2	IN		OUT	19
3	IN		OUT	20
6	P_IN		SHDN	13
7	UVLO		ILIM	11
8	OVP		dVdT	10
4	NC		PGOOD	16
5	NC		FLT	15
17	NC		IMON	14
9	GND		MODE	12
			TP	0

Рисунок 3 — УГО микросхемы TPS1663

- IN и OUT – контакты, подключаемые к источнику питания и нагрузке соответственно.
- P\_IN - предназначен для питания микросхемы. Подключается напрямую к контактам IN.
- UVLO - контакт для установки программируемого порога блокировки пониженного напряжения.
- OVP – контакт для установки регулируемого порога защиты от перенапряжения.
- dVdT – данный контакт предназначен для задания скорости нарастания выходного напряжения при подаче питания.
- ILIM - контакт для установки ограничения выходного тока. Значение устанавливается с помощью резистора между выводом и GND.
- MODE - предназначен для выбора режима для реакции на перегрузку и неисправность.
- SHDN - контакт для перехода микросхемы в режим отключения при подаче на него низкого уровня.
- IMON - контакт для наблюдения выходного тока. В данной работе не используется, оставлен неподключенным.

- FLT – индикатор неисправностей. В данной работе не используется, оставлен неподключенным.

- PGOOD – индикатор нормальной работы внутреннего полевого транзистора. В данной работе не используется, оставлен неподключенным.

Для защиты от напряжения обратной полярности был использован диод Шоттки. Диод был выбран с запасом по обратному напряжению  $U = 30 \text{ В}$  и максимальному среднему току  $I_F = 1.5 \text{ А}$ .

### 2.2.3 Преобразователь напряжений

LMR16020 — это понижающий DC-DC преобразователь на 60В, 2А со встроенным полевым МОП-транзистором высокого напряжения. Обладая широким диапазоном входного напряжения от 4,3 В до 60 В, он подходит для различных применений для регулирования мощности от нерегулируемых источников. Ток покоя регулятора составляет 40 мкА в спящем режиме, что подходит для систем с батарейным питанием. Сверхнизкий ток 1 мкА в режиме отключения может еще больше продлить срок службы батареи. Широкий регулируемый диапазон частот коммутации позволяет оптимизировать выбор компонентов выходного фильтра. Устройство имеет встроенные функции защиты, такие как поцикловое ограничение тока, определение температуры и отключение из-за чрезмерного рассеивания мощности, а также защиту от перенапряжения на выходе.

Основные характеристики данной микросхемы приведены в таблице 2.

Таблица 2 — Характеристики микросхемы LMR16020

Параметр	Значение
Номинальное напряжение, В	от 4,3 до 60
Номинальный ток, А	до 2
Частота переключения, МГц	от 0,2 до 2,5
Рабочие температуры, °С	от -40 до 125
Температура теплового отключения, °С	170

На рисунке 4 представлено условное графическое обозначение микросхемы.

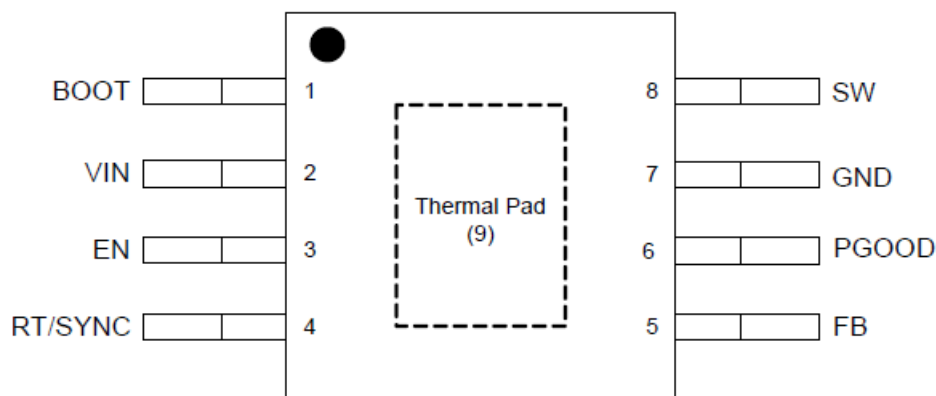


Рисунок 4 — УГО микросхемы LMR16020

- Контакт VIN предназначен для подключения входного напряжения питания с рабочим диапазоном от 4,3 В до 60 В.
- Контакт EN предназначен для защиты от подачи пониженного напряжения. С помощью резистора можно регулировать напряжение, с которого микросхема начинает работать.
- Контакт RT/SYNK предназначен для установки частоты переключения. С помощью внешнего резистора можно регулировать значение частоты переключения.
- Контакт FB — вход компаратора обратной связи по выходному напряжению. Подключается к делителю напряжения, с помощью которого устанавливается выходное напряжение.
- Контакт PGOOD подключается к выходному напряжению через токоограничивающий резистор.
- Контакт SW — коммутационный узел преобразователя. Между выводами BOOT и SW требуется нагрузочный конденсатор. Если напряжение на этом конденсаторе ниже минимума, необходимого для работы высокочастотного МОП-транзистора, выход выключается до тех пор, пока конденсатор не будет обновлен.



## **2.2.4 Нагреватели**

В данной работе используются два нагревателя, подключенные последовательно. Так как в индукционной печи нагрев осуществляется приблизительно до 300–350 градусов Цельсия, для получения необходимой мощности, данные компоненты подключены к цепи питания 220 В с использованием электромагнитного реле 3-1393240-5 компании TE Connectivity.

## **2.2.5 Датчики температуры**

В качестве датчиков температуры используются две термопары типа К, подключенные с помощью микросхемы MAX6675ISA. MAX6675 выполняет компенсацию холодного спая и оцифровывает сигнал термопары типа К. Данные выводятся в 12-битном разрешении, совместимом с SPI формате только для чтения. Этот преобразователь позволяет получать температуру от 0 до +1024 градусов Цельсия.

## **2.2.6 Кулеры**

В данной работе кулеры подключены аналогичным нагревателям образом — питание осуществляется от сети 220 В, что позволяет установить жаростойкие кулеры высокой мощности, управление осуществляется с помощью электромагнитного реле 3-1393240-5 компании TE Connectivity.

## **2.2.7 RS232**

Связь с платой управления осуществляется по интерфейсу RS232, который реализован с использованием микросхемы MAX3232CDW. Устройство MAX3232 состоит из двух линейных драйверов, двух линейных приемников и двойной схемы накачки заряда с защитой от электростатического разряда  $\pm 15$  кВ от клеммы к клемме (клеммы подключения последовательного порта, включая GND). Устройство соответствует требованиям TIA / EIA-232-F и обеспечивает электрический интерфейс между контроллером асинхронной связи и разъемом последовательного порта. Накачка заряда и четыре небольших внешних конденсатора позволяют работать от одного источника питания от 3 до 5,5 В.

Устройство работает со скоростью передачи данных до 250 Кбит / с и максимальной скоростью нарастания выходного сигнала драйвера 30 В / мкс.

## 2.3 Расчет и выбор элементов обвязки LMR16020

Проведем расчет и выбор элементов для микросхемы LMR16020 согласно документации [2]. Исходные данные приведены в таблице 3.

Таблица 3 — Исходные данные для LMR16020

Параметр	Значение
Номинальное входное напряжение, В	24
Диапазон входного напряжения, В	от 20 до 28
Выходное напряжение, В	3,3
Ток нагрузки, А	1

Данная микросхема имеет встроенную защиту от короткого замыкания на выходе, вследствие чего специализированных средств защиты не требуется.

### 2.3.1 Расчет резисторов для входа FB

Выходное напряжение зависит от выбора резисторов  $R_{FBB}$  и  $R_{FBT}$ , которые рассчитываются по формуле (1) представленной в п. 8.2.2.2 документации [2]

$$R_{FBB} = \frac{V_{FB}}{V_{OUT} - V_{FB}} * R_{FBT} \quad (1)$$

где  $V_{FB} = 0,75$  В.

Производитель рекомендует выбрать  $R_{FBT}$  в диапазоне 10 — 100 кОм, выберем  $R_{FBT} = 68$  кОм и рассчитаем  $R_{FBB}$

$$R_{FBB} = \frac{0,75}{3,3 - 0,75} * 68000 = 20000 \text{ Ом}$$

Используем резисторы 68 кОм и 20кОм.

### 2.3.2 Расчет частоты переключения $f_{SW}$

Частота переключения преобразователя зависит от выбора резистора  $R_T$ , номинал которого вычисляется по формуле (2) представленной в п. 8.2.2.3 документации [2].

$$R_T[\text{кОм}] = 42904 \times f_{SW}[\text{кГц}]^{-1,088} \quad (2)$$

Выберем частоту  $f_{SW} = 522,36$  кГц, тогда

$$R_T[\text{кОм}] = 42904 \times 522,36^{-1,088} = 47,353 \text{ кОм}$$

Выбираем ближайшее значение  $R_T = 47$  кОм и используем резистор 47 кОм.

### 2.3.3 Расчет значения индуктивности

Для расчета значения индуктивности согласно п. 8.2.2.6 документации [2] используем формулу (3).

$$L_{MIN} = \frac{V_{IN\_MAX} - V_{OUT}}{I_{OUT} \times K_{IND}} \times \frac{V_{OUT}}{V_{IN\_MAX} \times f_{SW}} \quad (3)$$

Подставив значения, получим:

$$L_{MIN} = \frac{60 - 3,3}{1 \times 0,4} \times \frac{3,3}{60 \times 522,36} = 14,1 \text{ мкГн}$$

Выбираем близнее значение 15 мкГн и выбираем катушку индуктивности с  $L = 15$  мкГн.

### 2.3.4 Выбор конденсаторов на входе микросхемы

Согласно рекомендациям из п. 8.2.2.4 даташита [2] выберем  $C_{IN} = 4.7$  мкФ с напряжением 25 В.

### 2.3.5 Расчёт конденсатора на выходе микросхемы

Для расчета значения конденсатора на выходе микросхемы, согласно п. 8.2.2.6 документации [2], используем формулы (4) и (5).

$$C_{OUT} > \frac{3 \times (I_{OH} - I_{OL})}{f_{SW} \times V_{US}} \quad (4)$$

$$C_{OUT} > \frac{I_{OH}^2 - I_{OL}^2}{(V_{OUT} + V_{OS})^2 - V_{OUT}^2} \times L \quad (5)$$

Подставив значения, получим:

$$C_{OUT} > \frac{3 \times (1 - 0,1)}{522,36 \times 0,165} = 31,3 \text{ мкФ} \quad (4)$$

$$C_{OUT} > \frac{1^2 - 0,1^2}{(3,3 + 0,165)^2 - 10,89} \times 10 = 8,87 \text{ мкФ} \quad (5)$$

Согласно документации, необходимо поставить конденсаторы емкостью не ниже суммы полученных значений. Выбираем, с запасом по номинальному напряжению в 2 раза, 2 конденсатора 47 мкФ, 16 В.

### 2.3.6 Выбор резистора для входа PGOOD

Согласно п. 8.2.2.13 документации [2] если выходное напряжение не превышает 7 В, то подтянем контакт PGOOD к выходу дросселя через резистор  $R_{PGOOD} = 100 \text{ кОм}$ .

### 2.3.7 Выбор диода Шоттки

Согласно п. 8.2.2.5 документации [2], номинальный пиковый ток должен быть выше, чем максимальный ток нагрузки. Выбираем диод Шоттки 60 В, 3 А.

### 2.3.8 Выбор конденсатора для выхода BOOT

Согласно рекомендациям п. 8.2.2.8 из даташита [2] выберем конденсатор  $C_{BOOT} = 0.1 \text{ мкФ}$  и номинальным напряжением выше 16 В.

### 2.3.9 Индикация выходного напряжения

В качестве индикации выходного напряжения микросхемы параллельно выходу установим индикаторный светодиод красного цвета. Светодиод TLMS1000-GS08 имеет параметр падения напряжения  $V_F = 1.8$  В и номинальный прямой ток  $I_F = 15$  мА. Ток, протекающий через резистор, рассчитывается по формуле (10).

$$I_{LED} = \frac{V_{OUT} - V_F}{R_{LED}} \quad (10)$$

Из условия  $I_{LED} \leq I_F$  найдем  $R_{LED}$ .

$$R_{LED} \geq \frac{V_{OUT} - V_F}{I_F} = \frac{3.3 - 1.8}{0.015} = 100 \text{ Ом}$$

Выберем резистор  $R_{LED} = 100$  Ом.

## 2.4 Расчет и выбор элементов обвязки микросхемы TPS1663

Проведем расчет и выбор элементов, необходимых для работы микросхемы TPS1663 согласно документации [1]. Исходные данные для расчета представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Исходные данные для TPS1663

Параметр	Значение
Нижний порог входного напряжения ( $V_{UV}$ ), В	20
Верхний порог входного напряжения ( $V_{OV}$ ), В	28

### 2.4.1 Расчет резисторов делителя напряжения

Расчёт резисторов для делителя напряжения происходит по формулам (11) и (12) из п. 10.2.2.2 документации [1].

$$V_{OVPR} = \frac{R3}{R1 + R2 + R3} * V_{OV} \quad (11)$$

$$V_{UVLOR} = \frac{R2 + R3}{R1 + R2 + R3} * V_{UV} \quad (12)$$

Из документации [1]  $V_{OVPR} = V_{UVLOR} = 1.2$  В.

Выберем  $R3 = 15$  кОм и из (11) найдем  $R1 + R2$

$$R1 + R2 = \frac{R3 * V_{OV}}{V_{OVPR}} - R3 = \frac{15000 * 28}{1.2} - 15000 = 335000 \text{ Ом}$$

Подставим полученное выражение в формулу (12) и выразим  $R2$

$$\begin{aligned} R2 &= \frac{V_{UVLOR}(R1 + R2 + R3)}{V_{UV}} - R3 = \frac{1.2(335000 + 15000)}{20} - 15000 \\ &= 6000 \text{ Ом} \end{aligned}$$

Выберем  $R2 = 6,04$  кОм и рассчитаем  $R1$

$$R1 = 335000 - R2 = 335000 - 6000 = 329000 \text{ Ом}$$

Выберем ближайшее значения для  $R1 = 330 \text{ кОм}$ .

#### 2.4.2 Выбор входного конденсатора

Согласно рекомендациям из п. 10.2.2.3.1 даташита [1] выберем входной конденсатор  $C_{IN} = 1 \text{ мкФ}$  и двойным запасом по входному напряжению  $V_{cIN} = 100 \text{ В}$ .

#### 2.4.3 Расчет конденсатора для выхода dVdT

Расчет конденсатора для выхода dVdT происходит по формуле (13) из п. 9.3.1 даташита [1]

$$C_{dVdT} = \frac{t_{dVdT}}{20.8 * 10^3 * V_{IN}} \quad (13)$$

где  $t_{dVdT}$  находится по формуле (14).

$$t_{dVdT} = \frac{V_{IN} * C_{OUT}}{I_{INRUSH}} = \frac{24 * 47 * 10^{-6}}{300 * 10^{-3}} = 0.0037 \text{ с} \quad (14)$$

Подставим найденное  $t_{dVdT}$  в формулу (13) и получим

$$C_{dVdT} = \frac{0.0037}{20.8 * 10^3 * 24} = 0.0074 \text{ мкФ}$$

Выбираем конденсатор  $C_{dVdT} = 6800 \text{ пФ}$

#### 2.4.4 Расчет резистора для выхода ILIM

Произведем расчёт резистора  $R_{ILIM}$  согласно формуле (15) п.10.2.2.1 документации [1].

$$R_{ILIM} = \frac{18}{I_{LIM}} = \frac{18}{4} = 4,5 \text{ кОм} \quad (15)$$

Выберем резистор  $R_{ILIM} = 4,5 \text{ кОм}$

### **2.4.5 Режим низкого энергопотребления**

При необходимости микросхема может быть переведена в режим низкого электропотребления. Так же переводом в данный режим можно сбросить состояние микросхемы в случае какой-либо ошибки.

Для реализации данного функционала была установлена тактовая кнопка и параллельно ей конденсатор  $C_{BUTTON} = 0.1 \text{ мкФ}$  для защиты от дребезга контактов



## **Заключение**

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

В результате выполнения работы были предоставлены принципиальная электрическая схема и файлы проекта Altium Designer.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. TPS1663x 60-V, 6-A eFuse with Adjustable Output Power Limiting,  
URL: <https://clck.ru/UgkPs>
2. LMR16020 SIMPLE SWITCHER® 60 V, 2 A Step-Down Converter With  
40  $\mu\text{A}$   $I_Q$  (Rev. A), URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmr16020.pdf>