



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

## UNIVERZÁLNÍ LED ZDROJ PRO TESTOVÁNÍ VLASTNOSTÍ SVĚTLOVODŮ

UNIVERSAL LED SOURCE FOR TESTING OF THE LIGHT GUIDE PROPERTIES

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jaromír Feilhauer

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Lukáš Novák

BRNO 2022

# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Mikroelektronika a technologie**

Ústav mikroelektroniky

**Student:** Jaromír Feilhauer

**ID:** 220799

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2021/22

**NÁZEV TÉMATU:**

## Univerzální LED zdroj pro testování vlastností světlovodů

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Vytvořte univerzální konstantní zdroj proudu. Tento zdroj má sloužit pro testování světlovodů. Výstupní parametry zdroje by měli být nastavitelné, proto zvolte vhodný DC-DC měnič, u kterého lze měnit výstupní parametry. Realizujte a ověřte funkci zařízení a dosažené výsledky zpracujte v bakalářské práci.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

Podle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 7.2.2022

**Termín odevzdání:** 2.6.2022

**Vedoucí práce:** Ing. Lukáš Novák

**doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem LED zdroje pro testování vlastností světlovodů automobilových světlometů. Zahrnuje zejména teorii DC-DC měničů, jejich rozdělení a základní charakteristiku jednotlivých typů zapojení. Praktická část je zaměřena na výběru potřebných čipů, jejich základní popis, charakteristiky a výpočty hodnot důležitých přidružených komponent. Dále se práce zabývá obvodovým zapojením a návrhem desky plošných spojů, vývojem softwaru mikrokontroleru, komunikačního paketu a výsledky měření reálného vzorku.

## **Klíčová slova**

DC-DC měnič, zvyšující měnič, snižující měnič, světlovod, zkoušeč, STM32, nucleo, TPS92682, TPS92520, stavový automat

## **Abstract**

This bachelor thesis deals with the design of the LED source for testing the properties of light guides of car headlights. The thesis mainly includes the theory of the DC - DC converters, their categorization and the basic properties of the individual types of circuits. The design part is focused on the selection of the required chips. The importance of the chip as the basic description, characteristics and calculations of the values associated components are included. Then it follows with the design of the circuit diagram and the printed circuit, software and communication packet development and measurement results of real sample.

## **Keywords**

DC-DC converter, boost converter, buck converter, light pipe, tester, STM32, nucleo, TPS92682, TPS92520, state machine

## **Bibliografická citace**

FEILHAUER, Jaromír. Univerzální LED zdroj pro testování vlastností světlovodů [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-27]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/142775>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky. Vedoucí práce Lukáš Novák.

# Prohlášení autora o původnosti díla

**Jméno a příjmení studenta:** *Jaromír Feilhauer*

**VUT ID studenta:** *220799*

**Typ práce:** *Bakalářská práce*

**Akademický rok:** *2021/22*

**Téma závěrečné práce:** *Univerzální LED zdroj pro testování vlastností světlovodů*

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 2. června 2022

-----  
podpis autora

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Lukáši Novákovi za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci. Chtěl bych také poděkovat kolegům za cenné informace pro návrh a realizaci zdroje.

V Brně dne: 2. června 2022

-----  
podpis autora

# Obsah

<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	<b>8</b>
<b>SEZNAM TABULEK</b> .....	<b>9</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>1. TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>11</b>
1.1 ROZDĚLENÍ DC-DC MĚNIČŮ .....	11
1.2 LINEÁRNÍ MĚNIČ .....	12
1.3 SPÍNANÝ MĚNIČ .....	13
1.3.1 Zvyšující měnič.....	14
1.3.2 Snižující měnič .....	14
1.4 KOMUNIKAČNÍ SBĚRNICE .....	15
1.4.1 UART .....	15
1.4.2 SPI.....	16
1.4.3 I <sup>2</sup> C.....	17
<b>2. PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>18</b>
2.1 NÁVRH SCHÉMATU.....	18
2.1.1 Vstupní obvody.....	18
2.1.2 Zdroj 5 V.....	19
2.1.3 Zvyšující měnič.....	20
2.1.4 Snižující měnič .....	22
2.2 MIKROKONTROLER .....	24
2.2.1 Programové vybavení .....	25
2.2.2 Stavový automat.....	26
2.2.3 Komunikační protokol.....	27
2.2.4 Chybové kódy.....	30
2.3 OVLÁDACÍ PROGRAM PRO MĚŘENÍ PARAMETRŮ .....	32
2.4 VÝSLEDKY MĚŘENÍ .....	33
2.4.1 Účinnost.....	33
2.4.2 Zvlnění proudu.....	33
2.4.3 Přesnost nastavení proudu.....	34
2.4.4 Měření tepelných emisí zdroje .....	34
2.4.5 Měření nástupné a sestupné hrany PWM modulace .....	36
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>37</b>
<b>LITERATURA</b> .....	<b>38</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>40</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH</b> .....	<b>41</b>

# SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Zapojení třísvorkového stabilizátoru jako napěťového a proudového zdroje.....	12
1.2	Schéma zapojení zvyšujícího měniče.....	14
1.3	Schéma zapojení snižujícího měniče.....	14
1.4	Schéma paketu protokolu UART [8].....	15
1.5	Příklad paketu protokolu SPI vysílaného z master do slave [10].....	16
1.6	Schéma zapojení sběrnice SPI klasickou sběrnici (vlevo) a metodou daisy chain (vpravo) [10].....	17
1.7	Schéma paketu protokolu I <sup>2</sup> C [11].....	17
2.1	Blokové schéma zařízení.....	18
2.2	Schéma zapojení vstupního obvodu.....	19
2.3	Schéma zapojení 5V zdroje.....	20
2.4	Detail zapojení výstupní části zvyšujícího měniče.....	20
2.5	Schéma zapojení snižujícího měniče.....	22
2.6	Konfigurační možnosti vstupně-výstupních pinů mikrokontroleru [15].....	24
2.7	Průběh signálu a přechodový jev při přenosové rychlosti 8 Mbit/s.....	26
2.8	Diagram stavového automatu mikrokontroleru.....	27
2.9	Náhled rozhraní ovládací aplikace.....	32
2.10	Účinnost zdroje v závislosti na nastaveném napětí.....	33
2.11	Graf závislosti poměru nastaveného a naměřeného proudu kanálu č.1 na nastaveném proudu.....	34
2.12	Detail zahřívání místa zvyšujícího měniče před kalibrací a úpravě hodnoty registru CHx_ISLOPE.....	35
2.13	Detail zahřívání místa zvyšujícího měniče před kalibrací a úpravě hodnoty registru CHx_ISLOPE.....	35
2.14	Nástupná hrana výstupního proudu s PWM se střídou 50 %.....	36
2.15	Sestupná hrana výstupního proudu s PWM se střídou 50 %.....	36



## SEZNAM TABULEK

1.1	Výhody a nevýhody lineárních a spínaných měničů [1] .....	11
2.1	První část paketu přijímacího módu (hlavičková část).....	28
2.2	Datová část paketu přijímacího módu určující číslo kanálu .....	28
2.4	Datová část paketu přijímacího módu pro nastavení střídání PWM .....	28
2.3	Datová část paketu přijímacího módu pro nastavovací hodnoty .....	29
2.5	Datová část paketu přijímacího módu pro nastavení časovače.....	29
2.6	První část paketu vysílacího módu .....	29
2.7	Datová část paketu vysílacího módu .....	29
2.8	Chybové kódy protokolu .....	31

# ÚVOD

Měření optických vlastností světlovodů je jedním z důležitých zkoušek kvality vyrobených dílů automobilových lamp. V počátcích pro toto měření byly používány zdroje a obvody patřící k dané sestavě příslušného světlovodu, napájecích, řídicích a LED obvodů. S přibývajícím počtem odlišných typů těchto zdrojů s odlišnými parametry lišícími se od potřebných hodnot k měření bylo rozhodnuto o zautomatizování a zjednodušení celého procesu. Měřicí aparatura se tak bude nově skládat z hlavního modulu, postaveného na industriálním panelu Comfile Pi, komunikujícího se světelnými čidly, a univerzálního programovatelného proudového zdroje, jehož návrhem se tato práce zabývá.

V první části této práce bude rozebrána problematika a základní rozdělení DC – DC měničů. Pro napájení bude využito síťového zdroje napětí s výstupním napětím 12 V, které se využije pro napájení všech částí zařízení. Je tedy nutné zajistit snížení a stabilizaci napájecího napětí pro digitální části obvodu a zvýšení napětí pro napájení proudového zdroje LED. V teoretické části budou popsány použitelné měniče spolu s jejich výhodami a případnými problematickými částmi. Použitelné sběrnice

Na teoretický rozbor problematiky navazuje vlastní návrh zařízení zahrnující výběr součástek a připojených komponent podle parametrů doporučenými výrobcem a také jejich propojení v navrhovaném schématu. Budou použity součástky výrobce Texas Instruments pro výkonovou část a vývojová deska Nucleo výrobce STMicroelectronics. Jednoduchým a výhodným programovým řešením řízení komunikace a nastavování s možností dalšího rozšíření je výpočetní model stavového automatu, který bude rozveden v kapitole 2.2.2 spolu s knihovními funkcemi jednotlivých říditelných součástí zdroje. Díky navrženému paketu pro řízení komunikace zdroje s řídicí jednotkou bude možné dekodovat parametry nastavení kanálů a podávat zprávy o stavu zdroje s nalezenými chybami a informovat o měřených výstupních napětích kanálů.

Navržené parametry zdroje budou ověřeny měřením přesnosti výstupního proudu spolu s měřením účinnosti zdroje. Termální emise součástek a samotné desky bude zkontrolováno a vyhodnoceno snímky z termokamery.

# 1. TEORETICKÁ ČÁST

Světelné obvody automobilových lamp zahrnují nejrůznější množství a typy zapojení LED diod. Obvody mohou čítat od jedné po desítku LED diod různých parametrů a vzájemného zapojení. Pro jejich napájení se využívá hlavní zdrojový modul a případné další součástky, které upravují a stabilizují vstupní parametry vstupující do těchto obvodů.

Měniče DC – DC (anglicky direct current – direct current) zajišťují změnu hodnoty stejnosměrného napětí na požadovanou hodnotu. Jsou rozšířeny v obrovském množství aplikací počínaje síťovými zdroji, kde snižují usměrněné síťové napětí, přes měniče, stabilizátory napětí baterií, invertující a galvanicky oddělující obvody.

## 1.1 Rozdělení DC – DC měničů

Podle obvodového zapojení a využitých technologií lze měniče rozdělit do dvou základních kategorií, a to měniče s lineárními součástkami a měniče se spínanými součástkami. Podle použitých komponent jsou dále děleny na: [1]

Lineární

- Třísorkové stabilizátory, regulátory napětí s nízkým úbytkem (LDO)

Spínané

- se spínanými kondenzátory (nábojové pumpy) – kapacitní invertor a dělič,
- s cívkami – snižující měnič, zvyšující měnič, zvyšující a snižující měnič, invertující měnič,
- s transformátory – akumulující měnič, propustný měnič, rezonanční měnič, push – pull zapojení, polomost, plný most

Tabulka 1.1 Výhody a nevýhody lineárních a spínaných měničů [1]

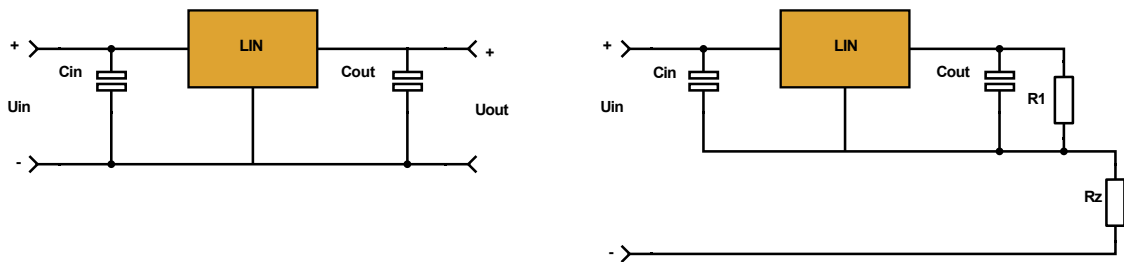
<i>Lineární</i>		<i>Spínané</i>	
<i>Výhody</i>	<i>Nevýhody</i>	<i>Výhody</i>	<i>Nevýhody</i>
<i>Jednoduché obvodové zapojení</i>	<i>Nízká účinnost</i>	<i>Vysoká účinnost</i>	<i>Nutný důraz na EMC</i>
<i>Potlačení vlivu kolísání vstupního napětí</i>	<i>Cena roste s výkonem</i>	<i>Cena konstantní</i>	<i>Vyšší míra výstupního zvlnění</i>
<i>Menší velikost a váha</i>	<i>Není možno izolovat vstup a výstup</i>		<i>Vyšší velikost a váha</i>
<i>Rychlejší odezva na skok</i>	<i>Nemožnost konverze nahoru</i>		<i>Pomalá odezva na skok</i>

## 1.2 Lineární měnič

Z výhod lineárních zdrojů lze vyvodit, že lineární zdroje lze použít v aplikacích, kde nejsou kladeny velké nároky na výkon a je výhodné čerpat stabilizované výstupní napětí s malým rozkmitem hodnot. Jejich funkce je podmíněna napěťovým úbytkem oproti vstupnímu napětí, které by se mělo pro dobrou stabilizaci pohybovat v předepsaných mezích výrobcem. Nutnost napěťového úbytku vychází z vnitřní konstrukce lineárních stabilizátorů, a to zejména na odporu  $R_{DS(on)}$  Darlingtonova zapojení tranzistorů nebo MOSFET tranzistoru. [2]

Nejpoužívanějším typem lineárních měničů jsou třísvorkové stabilizátory, jejich zapojení je možné vidět na obrázku 1.1. Základním předpokladem kvalitního výstupního signálu jsou správně navržené parametry okolní součástky, které jsou předepsány výrobcem. Jedná se především o vstupní a výstupní kondenzátory, které plní funkci RC filtru a při špičkových odběrech, například spínání v digitálních částech obvodu, dodávají potřebnou elektrickou energii a zabraňují poklesu napětí.

Při vyšších nárocích na výstupní výkon lineárního zdroje je nutné zahrnout do návrhu také vhodnou volbu pouzdra součástky, která zaručuje odvod tepla, které vzniká napěťovým úbytkem na součástce, případně zvážit použití externího chladiče. [2]



Obrázek 1.1 Zapojení třísvorkového stabilizátoru jako napěťového a proudového zdroje

### 1.3 Spínaný měnič

S příchodem technologie podporující vysoké frekvence ve stovkách kilohertzů až jednotky megahertzů došlo k velkému rozšíření a vývoji spínaných zdrojů, jejichž hlavním benefitem je vysoká účinnost pohybující se až okolo 90 %. Oproti lineárním zdrojům pracujících s úbytkem napětí na lineárních součástkách využívají spínané zdroje konverzi elektrické energie na energii elektrického a magnetického pole.

Základním požadavkem je tedy existence kapacitoru nebo induktoru v obvodovém zapojení. Tyto součástky potřebují pro svou činnost napětí nebo proud měnící se v čase. Proto se využívá obdélníkového signálu o předem dané frekvenci, který zajišťuje měnící se napětí na těchto součástkách. Pulzně šířkovou modulací (PWM) lze regulovat výstupní parametry obvodu. Daný obdélníkový signál je připojen k LC filtru. Pro napětí na výstupu platí

$$V_{out} = \frac{T_{on}}{T_p} \cdot V_{peak}, \quad (1.1)$$

kde poměr  $T_{on}$  ku  $T_p$  je poměr doby sepnutí k celkové šířce pulzu a  $V_{peak}$  je vrcholová hodnota napětí pulzu. [3]

V praxi je PWM signál přiveden na řídicí elektrodu tranzistoru, který dále spíná obvod, zajišťuje lepší spínací parametry a proudové zatížení spolu s oddělením zdroje od zdroje řídicího signálu. Pro zajištění největší účinnosti a odolnosti proti rozkmitání obvodu je důležité dávat důraz na preciznost návrhu obvodů a parametrů součástek jak hlavních, tak parazitních, které se projevují zejména při vyšších spínacích frekvencích.

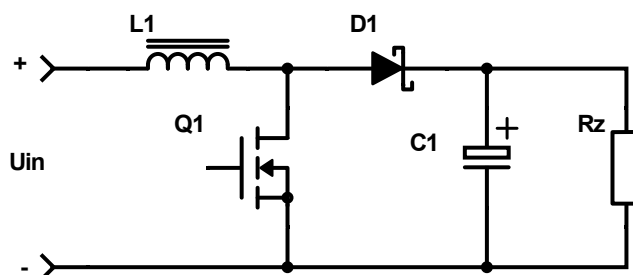
S použitím vyšších frekvencí signálu se však začaly uplatňovat vyzařovací vlastnosti vodičů a konduktivní interference na desce zejména kvůli strmým hranám spínaných signálů. Konduktivní EMI zahrnuje frekvence v rozmezí 150 kHz až 30 MHz, kdežto vyzařovací EMI 30 MHz až jednotky GHz. K zabránění těchto interferencí je důležité brát ohled na pečlivý návrh DPS, výběr součástek s nízkou induktancí a vhodné zapojení pinů, které zajistí lepší vlastnosti EMC, a EMI filtry pohlcující rušení ze zařízení. [4]

Rušivý signál se šíří zařízením dvěma způsoby. Rozdílový mód rušení, ve kterém se uplatňuje magnetické pole rušení, dominuje při směru proudu v napájecích obvodech s navzájem opačnou orientací. Naproti tomu společný mód rušení se vyznačuje shodným směrem toku proudu ve vodičích a je spojován s elektrickým polem. [4]

V následujících kapitolách budou popsány dvě hlavní topologie měničů použitých v projektu.

### 1.3.1 Zvyšující měnič

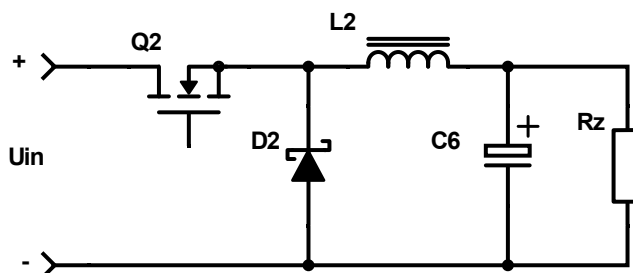
Pro změnu nižšího napětí na požadované vyšší napětí jsou používány měniče, které energii ze vstupu ukládají do výstupního akumulárního prvku. V tomto případě je využíváno magnetické pole cívky jako zdroje energie a výstupního kondenzátoru, který je ve schématu na obrázku 1.2 označen C1, jako akumulárního prvku. Při sepnutí tranzistoru Q1 dojde k zavření diody D1, a tedy k zabránění vybíjení akumulárního kondenzátoru. Zároveň uzavřenou smyčkou L1 a Q1 roste proud, který na cívce akumuluje magnetické pole. Po rozepnutí tranzistoru se proud cívky a vstupního zdroje přeměrovává do výstupního kondenzátoru a zátěže, na kterých je možné dosáhnout většího nebo stejného napětí než na vstupu. [5]



Obrázek 1.2 Schéma zapojení zvyšujícího měniče

### 1.3.2 Snižující měnič

V praxi není potřeba jen zvyšovat nebo stabilizovat napětí, ale snížit ho na požadovanou hodnotu. Efektivním způsobem je zapojení na obrázku 1.3. Při sepnutí tranzistoru protéká cívkou L2 proud do zátěže a paralelního kondenzátoru, jenž je nabíjen na hodnotu vstupního napětí. Dioda je v tomto případě orientována v závěrném směru a brání zkratování obvodu. Proud cívkou vyvolává vznik magnetického pole, tedy elektrická energie je měněna na magnetickou energii. Rozepnutím tranzistoru je odpojeno vstupní napětí z obvodu. Nashromážděná magnetická energie cívky vyvolává vznik elektrického proudu ve stejném směru, jako v prvním případě. Dioda se dostává do propustného směru a uzavírá proudovou smyčku. Elektrický proud cívkou se sčítá s proudem vybíjející kondenzátor a dohromady napájí zátěž. [1]



Obrázek 1.3 Schéma zapojení snižujícího měniče

## 1.4 Komunikační sběrnice

Pro přenos dat z vysílacího přístroje do přijímacího je využíváno signálové sběrnice, kterou představuje skupina vodičů s různými komunikačními funkcemi. Existují dva základní typy sběrnic podle metody přenosu. Paralelní komunikační sběrnice je schopna v jednom časovém okamžiku přenést datové slovo s velikostí závislou na počtu vodičů. Na druhé straně sériová sběrnice využívá jednoho datového vodiče, kterým posílá data uspořádaná za sebou. Bez uvážení parazitních okolních podmínek je tedy sériová komunikace pomalejší, avšak úspornější na počty použitých vodičů. [6]

Z hlediska ochrany proti rušení sběrnice dělíme na dvě topologie. Diferenční sběrnice, která se skládá z dvou datových vodičů s opačnou napětíovou úrovní. Na konci vedení je tato dvojice signálů sečtena, čímž je zesílen přijímaný signál a rušení projevující se u obou vodičů odečteno. Výhodou druhého typu, sběrnici se společnou zemí (anglicky single-ended), je zapojení vodičů bez nutnosti dalších součástí, jako je tomu u rozdílové sběrnice. [7]

Podle možností směrů komunikace je rozlišována jednosměrná komunikace simplex, kde se jedno zařízení prezentuje jako vysílač, druhé pak jako přijímač, střídavá obousměrná komunikace half-duplex, při které se střídají zařízení v komunikaci po jednom datovém vodiči, a souběžná obousměrná komunikace full-duplex, která využívá dvojice datových vodičů pro příjem a vysílání dat. [7]

### 1.4.1 UART

Univerzální asynchronní sběrnice typu přijímač/vysílač patří mezi nejvyužívanější komunikační rozhraní mezi dvěma zařízeními. Jedná se o dvouvodičovou sběrnici skládající se z vodiče RX pro příjem datových paketů a TX pro vysílání dat k příjemci. Předpokladem pro správné dekodování signálu je shodné nastavení tzv. modulační rychlosti (anglicky baud rate). Z tohoto důvodu jsou hodnoty rychlosti standardizovány na hodnoty 1200, 2400, 4800, 9600, 19200, 38400, 57600, 115200 a dále 230400, 460800, 921600, 1000000, 1500000 baudů. Podle kvality přenosového média lze tedy vybrat optimální rychlost přenosu. [8]

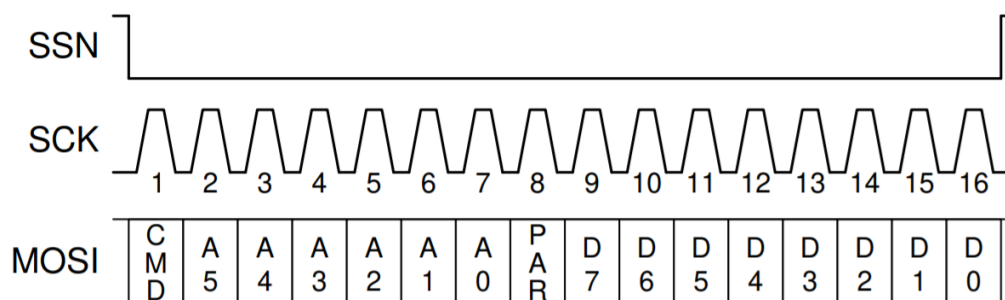
Ve stavu bez dat je na vodičích nejčastěji hodnota napětí 1. Pro spuštění komunikace a zahájení synchronizace je napětíová hladina na vodiči posunuta na hodnotu 0 (tzv. START bit). Následují posílaná data o velikosti nejčastěji 8 nebo 9 bitů. Celou komunikaci uzavírá STOP bit, resp. 2 STOP bity, při kterých se napětíová hladina vrací na hodnotu 1. Volitelným parametrem paketu je bit parity, který je nejjednodušší detekcí chyby přenosu.



Obrázek 1.4 Schéma paketu protokolu UART [8]

### 1.4.2 SPI

Sériové periferní rozhraní se řadí mezi jedno z nejrozšířenějších komunikačních rozhraní mezi mikrokontrolerem a periferními obvody jako například senzory, registry, paměťové moduly nebo AD/DA převodníky. Jedná se o tři nebo čtyř vodičovou sběrnici vedoucí od hlavního zařízení tzv. master k jednomu nebo více ovládaných zařízení nazývanými slave. Komunikace začíná nastavením napěťové úrovně vodiče SSN (výběr slave obvodu) na hodnotu 0 následovanou hodinovým signálem. Pro ukončení komunikace je hladina vodiče SSN posunuta zpět na hodnotu 1 a ukončen hodinový signál. [9]



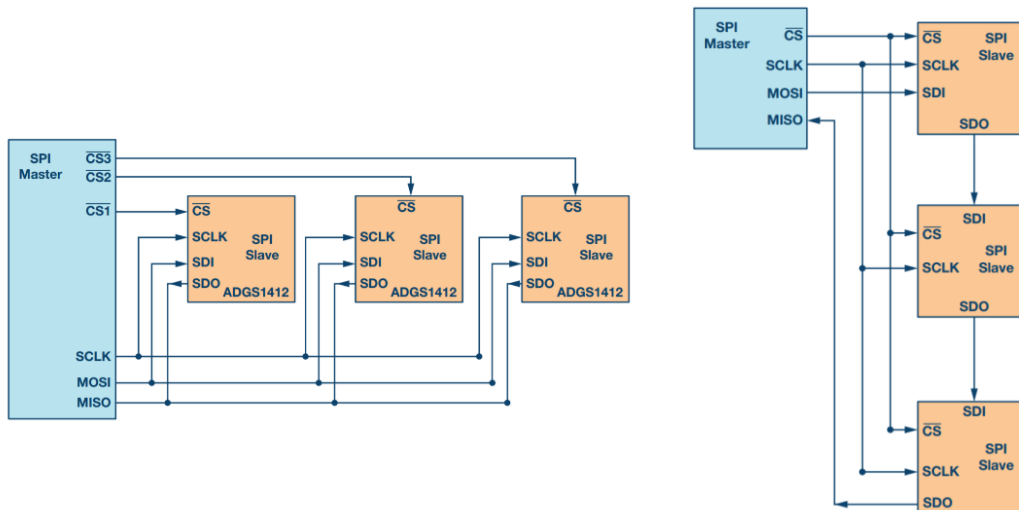
Obrázek 1.5 Příklad paketu protokolu SPI vysílaného z master do slave [10]

SPI rozhraní obsahuje ve vnitřních obvodech posuvný registr, do jehož nejnižšího bitu (LSB) jsou ukládána data přijatá na vstupním pinu obvodu, a nejvyšší bit registru (MSB) je posílán výstupním pinem obvodu.

Jak je možné vidět na obrázku 1.6, díky posuvnému registru lze sběrnici propojit dvěma módy. První z nich je standardní propojení pinů master s danými piny slave obvodů. Výhodou je zejména rychlá komunikace stejně trvajících se všemi periferními obvody. Propojení pinů však vyžaduje velké množství vodičů rostoucí s počtem periférií, jsou však odolné vůči selhání ostatním slave obvodů.

Druhou metodou zapojení je řetězení obvodů (daisy chain). Výstupní datový vodič master obvodu je připojen do vstupního pinu první periferie. Takto přijatá data jsou posuvným registrem poslána výstupním datovým pinem do druhého obvodu, kde celý proces pokračuje až do posledního takto zapojeného obvodu, jehož výstupní pin je propojený se vstupním pinem master obvodu, a tím je datová smyčka uzavřena. Výhodou této metody je menší počet vodičů projevující se zejména při vysokém počtu výstupních periférií. Avšak datový přenos je zatížen řetězeným zpožděním jednotlivých posuvných registrů a při selhání jednoho obvodu je odstaveno celé rozhraní. [9]



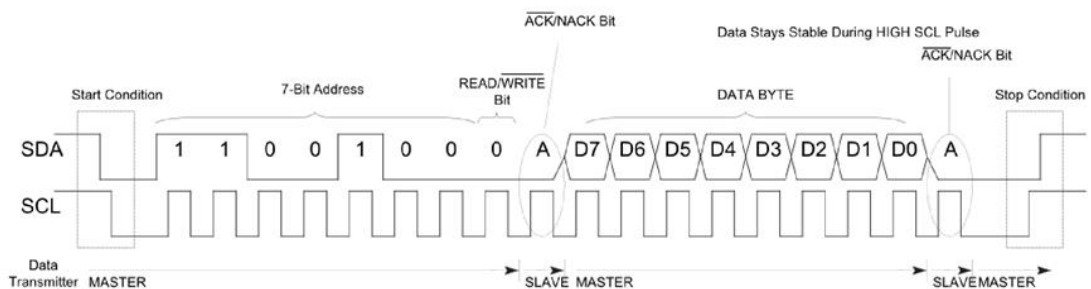


Obrázek 1.6 Schéma zapojení sběrnice SPI klasickou sběrnicí (vlevo) a metodou daisy chain (vpravo) [10]

### 1.4.3 I<sup>2</sup>C

Sběrnice I<sup>2</sup>C (anglicky Inter – Integrated Circuit) je dvou vodičové komunikační rozhraní typu master – slave složené z datového a hodinového kanálu. Datový tok může být oboustranný, je však ovládaný master obvodem, který řídí komunikaci hodinovým signálem. Bez dalšího vodiče je tak možné využít jen metodu cyklického dotazování (anglicky polling). Zařízení jsou připojena na sběrnici pomocí otevřeného kolektoru, a proto potřebují pro svou činnost připojení pull – up rezistorů, které zajistí při rozepnutí tranzistorů vysokou napěťovou úroveň (digitální hodnota 1). Rezistory však výrazně snižují přenosovou rychlost kanálu pohybující se ve stovkách kbits/s. [11]

Pro identifikaci zařízení, se kterým chceme komunikovat, je použito adresní 7bitové pole (jak je možné vidět na obrázku 1.5) pro adresaci až 128 připojených zařízení. Směr toku dat je nastavováno pomocí bitu READ/WRITE a potvrzení doručení zprávy bitem ACK, resp. NACK.



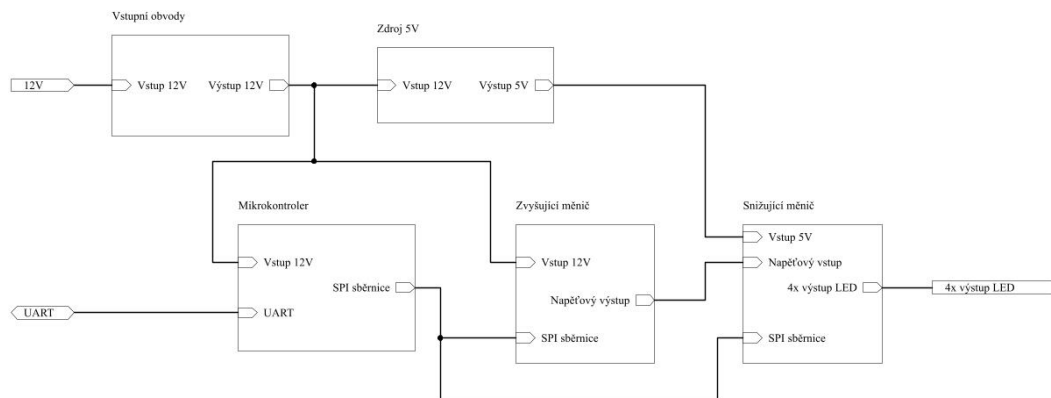
Obrázek 1.7 Schéma paketu protokolu I<sup>2</sup>C [11]

## 2. PRAKTICKÁ ČÁST

### 2.1 Návrh schématu

Navrhovaný zdroj je složen z pěti funkčních bloků, které jsou navzájem propojeny, jak je vidět na obrázku 2.1. Vstupními obvody je napájecí elektrická energie rozvedena do stabilizovaného 5V zdroje pro napájení digitálních i analogových obvodů, do napájecího vstupu mikrokontroleru a také do bloku zvyšujícího měniče. Ten dále napájí snižující měniče, který je v režimu zdroje proudu a dodává nastavený elektrický proud čtyřmi LED kanály.

Dále jsou popsány jednotlivé funkční bloky spolu s návrhem typů a hodnot použitých komponent.



Obrázek 2.1 Blokové schéma zařízení

#### 2.1.1 Vstupní obvody

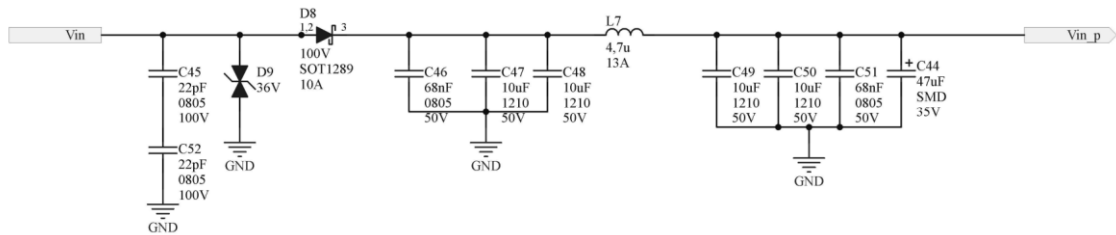
Vstupní obvody zařízení plní zejména funkci ochrany proti rušení a nebezpečným vlivům jak z okolí, tak ovlivňování okolí rušením ze samotného zařízení. Proti elektrostatickým výbojům je zařízení navržena ochrana dvojicí keramických kondenzátorů s hodnotami kapacity 22 pF, které budou na DPS navzájem orientovány kolmo na sebe, a to z důvodu zabezpečení, že při ohybu desky, a tedy zkratování kondenzátoru v jednom směru, je zaručeno oddělení kondenzátorem v druhém směru. Jako přepětovou ochranou byl zvolen tranzil s pracovním napětím 36 V, který je v případě napěťových špiček zkratován a chrání připojené obvody podobně jako Zenerova dioda. Proti přepólování vstupního napětí je do obvodu připojena Schottkyho dioda, která musí být konstruována na celkový odebíraný proud zařízení.

Vstupní filtr sestávající se z kombinace vstupních kondenzátorů, cívky a soustavy výstupních kondenzátorů zajišťuje zejména funkci oddělení zařízení od okolního rušení a pokrytí dočasných napěťových špiček zařízení spolu s filtrací konduktivního záření měniče. Zapojení filtru bylo převzato z katalogového listu zvyšujícího měniče [10]. První část  $\pi$ -článku zapojená blíže k vstupnímu konektoru zajišťuje filtraci konduktivního EMI z měniče, druhá část CLC filtru je filtrem zvlnění napájecího napětí. [12]

Hodnota kapacity kondenzátoru LC filtru ve schématu na obrázku 2.2, vedeného jako skupina C16 až C18, lze vypočítat ze vztahu

$$C_{F2} = \frac{1}{(2\pi \cdot 0,1 \cdot f_{SW})^2 \cdot L_F}, \quad (2.1)$$

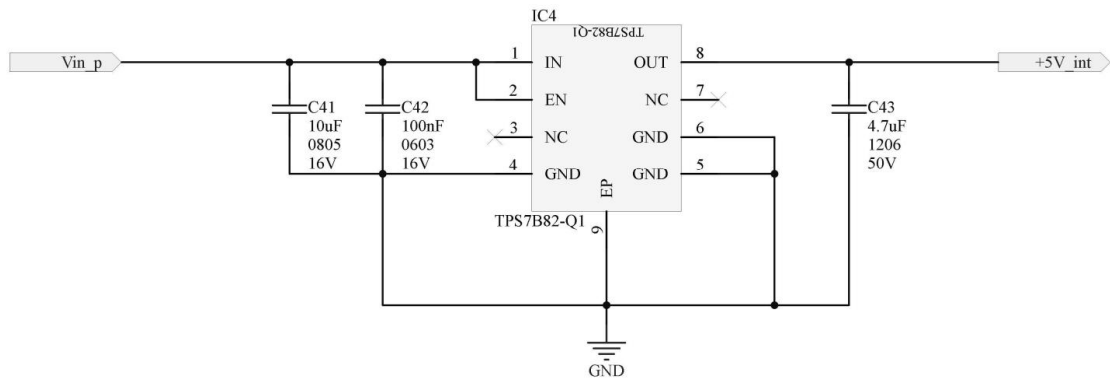
kde  $L_F$  je indukčnost cívky LC [12]. Z katalogového listu měniče je známa nejnižší doporučená frekvence 200 kHz. Po dosažení hodnoty indukčnosti použité cívky  $4,7 \mu\text{H}$  cívka vychází hodnota tohoto kondenzátoru  $13,55 \mu\text{F}$ . Ve schématu je použita paralelní kombinace kondenzátorů C46 filtrující vyšší frekvence a dvojici keramických kondenzátorů dohromady s kapacitou  $20 \mu\text{F}$ . Kapacity  $\pi$ -článku by měly být vyvážené, proto je použito stejných hodnot kapacit, a navíc je připojen elektrolytický kondenzátor dodávající energii při výkonových rázech.



Obrázek 2.2 Schéma zapojení vstupního obvodu

### 2.1.2 Zdroj 5 V

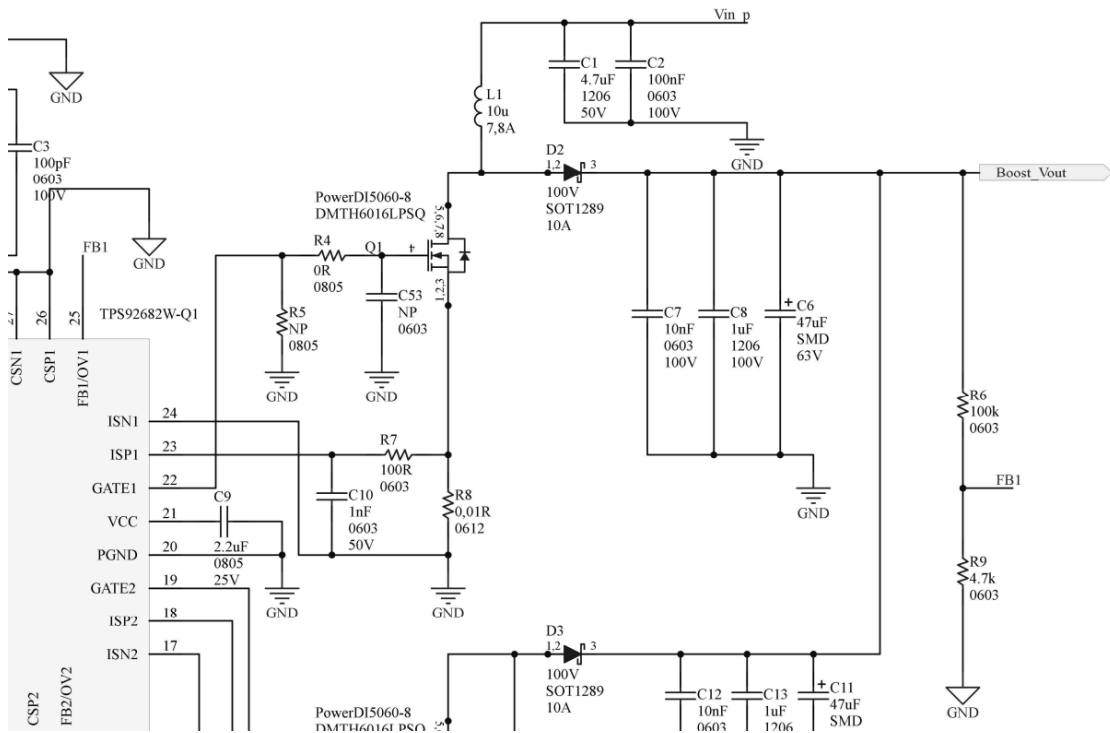
Pro napájení digitálních částí obvodů měničů je od výrobce požadováno 5V stabilizované napětí, které lze docílit například použitím lineárního stabilizátoru. V tomto případě byl do návrhu přidán LDO obvod TPS7B82-Q1. V katalogového listu je doporučeno připojit na vstupní pin dvojici paralelně zapojených keramických kondenzátorů s hodnotami  $10 \mu\text{F}$  a  $100 \text{nF}$  a pro správnou stabilizaci připojit výstupní kondenzátor s hodnotou kapacity od 1 do  $200 \mu\text{F}$  [13].



Obrázek 2.3 Schéma zapojení 5V zdroje

### 2.1.3 Zvyšující měnič

Vybraný obvod s číslem TPS92682 firmy Texas instrument je dvoukanálový kontrolér, který podporuje napěťový a proudový režim zdroje. Tato konfigurace je určena volbou připojení externích snímacích obvodů. Střída spínacího signálu je měněna v závislosti na rozdílu napětí na snímacím odporovém děliči a hodnotě registru CHIADJ. Jeho součástí je mimo jiné také indikace otevřeného, a naopak zkratovaného výstupu, nadproudová ochrana výstupu a teplotní varování. Všechny tyto chyby signalizuje pomocí vnitřních registrů [10]



Obrázek 2.4 Detail zapojení výstupní části zvyšujícího měniče

Frekvence vnitřního oscilátoru měniče je nastavována externě připojeným rezistorem na vstup  $R_T$  a vnitřní děličkou frekvence nastavovanou registrem  $SW_{DIV}$ . V návrhu se bude počítat s maximální doporučenou spínací frekvencí 700 kHz a děličkou 1:2. Z katalogového listu je pak znám vztah pro výpočet rezistoru

$$R_T = \frac{10^{12}}{12,5 \cdot SW_{DIV} \cdot f_{SW}}, \quad (2.2)$$

kde  $f_{SW}$  je požadovaná spínací frekvence a  $SW_{DIV}$  je nastavení registru děličky. Odpor  $R_T$  je vypočítán podle vztahu (2.2) na 57 k $\Omega$ , z výrobní řady byl vybrán odpor 100 k $\Omega$ . Spínací frekvence je pak zpětně dopočítána na 400 kHz.

Důležitým parametrem měničů je střída spínacího signálu, který lze pro zvyšující měnič vypočítat ze vztahu

$$D = \frac{V_{out} - V_{in}}{V_{out}}, \quad (2.3)$$

kde  $V_{out}$  je výstupní napětí měniče a  $V_{in}$  je vstupní napětí napájecí měnič. Dosazením maximální hodnoty výstupního napětí 50 V do vztahu (2.1) je zjištěno, že maximální střída řídicího signálu je 0,76, což splňuje maximální přípustnou hodnotu z katalogového listu 0,90.

Proud unipolárními tranzistory lze pro dvoufázový režim vypočítat ze vztahu

$$I_{D(RMS)} = \frac{P_{O(MAX)} \cdot 0,5}{V_{IN(MIN)}} \cdot \sqrt{1 - \frac{V_{IN(MIN)}}{V_{O(MAX)}}}, \quad (2.4)$$

kde  $P_{O(MAX)}$  je maximální celkový výstupní výkon měniče,  $V_{IN(MIN)}$  je minimální vstupní napětí měniče a  $V_{O(MIN)}$  je minimální napětí na výstupu. Vypočtená hodnota proudu  $I_D$  procházejícího jedním MOSFET v dvoufázovém režimu je 12,84 A.

Výběr a návrh výstupního kondenzátoru je důležitý jak pro filtraci spínacího napětí, tak pro ukládání přeměněné energie z cívky a zdroje. Hodnota kapacity je počítána ze vztahu

$$C_O = \left(1 - \frac{V_{IN}}{V_O}\right) \cdot \frac{I_O}{\Delta v_{o-pp} \cdot 2 \cdot f_{SW}}, \quad (2.5)$$

kde  $\Delta v_{o-pp}$  je zvlnění výstupního napětí. Po dosazení hodnot do vzorce je získaná hodnota celkové kapacity rozdělena do vhodné sítě kondenzátorů s nízkými a vyššími hodnotami kapacit (viz obrázek 2.4).

Naprogramování hodnoty výstupního napětí je závislá jak na poměru rezistorů snímacího děliče, tak na hodnotě registru  $CHIADJ$ , jejíž 2,4 násobek odpovídá požadovanému napětí. Výstupní napětí lze vypočítat ze vztahu

$$V_O = \left(1 + \frac{R_{FB2}}{R_{FB1}}\right) \cdot \frac{CHIADJ \cdot 2,4}{255}, \quad (2.6)$$

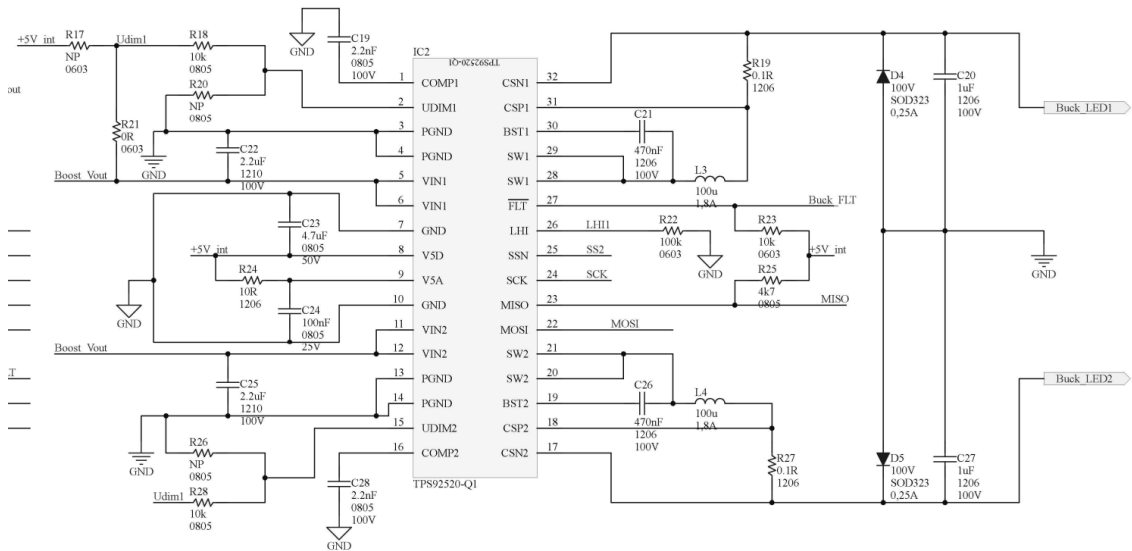
kde  $R_{FB1}$  a  $R_{FB2}$  jsou hodnoty rezistorů děliče zpětné vazby a  $CHIADJ$  je nastavená hodnota téhož registru.

## 2.1.4 Snižující měnič

Pro realizaci snižujícího měniče byl vybrán kontrolér s označením TPS92520-Q1, který poskytuje veškeré potřebné řízení a měření okolních obvodů. Zajišťuje výstupní proud až 1,6 A jedním kanálem při vstupním napětí od 4,5 V do 65 V. Čtení a nastavování hodnot kontroléru je zajištěno sběrnicí SPI s maximální rychlostí 2 MHz. [14]

Na rozdíl od zvyšujícího měniče potřebuje vnitřní logická část kontroléru externí napájení napětím 5 V. Vstupy jsou opatřeny standardními kondenzátory pro filtraci špiček způsobenými spínáním obvodů. [14]

Při použití kabelového vedení větší délky je kvůli možným induktivním zákmitům až do záporné oblasti napětí doporučeno umístit mezi LED kanál a zem Schottkyho diodu zapojenou v závěrném směru, jak je vidět na obrázku 2.5, která zajistí ochranu řídicích vstupů kontroléru. [14]



Obrázek 2.5 Schéma zapojení snižujícího měniče

Hodnotou registru CHTON, která se může pohybovat od 1 do 43, lze nastavit spínací frekvenci měniče, jejíž hodnota je dána vztahem

$$f_{SW} = \frac{CHTON+1}{4 \cdot 10^{-8} \cdot CHTON + 18 \cdot 10^{-6}} \quad (2.7)$$

Střída spínacího signálu vychází z poměru výstupního snímaného napětí a vstupního napětí měniče

$$D = \frac{V_{CSN}}{V_{IN}}, \quad (2.8)$$

kde  $V_{CSN}$  je výstupní napětí kanálu a  $V_{IN}$  je vstupní napětí snižujícího měniče.

Maximální hodnota střidy po dosažení do rovnice (2.8) je 94 %, minimální střída pak odpovídá hodnotě 5,6 %

Měřicí rezistor  $R_{CS}$  zajišťuje průchodem nastaveného proudu napětí měřené svorkami CSN a CSP. Jeho hodnotu lze vypočítat podle vztahu

$$R_{CS} = \frac{0,9 \cdot V_{DAC}}{14 \cdot I_{LED(MAX)}}, \quad (2.9)$$

kde  $I_{LED}$  je výstupní proud kanálem LED a  $V_{DAC}$  je plné napětí vnitřního DAC převodníku. Po dosazení hodnot je získán odpor  $0,098 \Omega$ , přičemž hodnota odporu rezistoru je zvolena na  $0,01 \Omega$  s přesností 1 %.

Indukčnost cívky použité v obvodu je závislá na vstupním napětí, spínací frekvenci a zvlnění výstupního proudu podle vztahu

$$L = \frac{V_{IN}}{4 \cdot f_{SW} \cdot \Delta i_L}, \quad (2.10)$$

kde  $\Delta i_L$  je procentuální vyjádření zvlnění výstupního proudu. Hodnota indukčnosti po dosazení výstupního zvlnění 15 % vychází  $119 \mu H$ . V návrhu je zvolena hodnota  $100 \mu H$  se vypočteným zvlněním 17,95 %.

Výstupní kondenzátor zajišťuje filtraci výstupního průběhu LED kanálu. Jeho celková hodnota kapacity je dána vztahem

$$C_{OUT} = \frac{\Delta i_L}{8 \cdot f_{SW} \cdot r_D \cdot \Delta i_{LED(MAX)}}, \quad (2.11)$$

kde  $r_D$  je sériový odpor zapojených LED diod,  $\Delta i_{LED(MAX)}$  je 5% hodnota výstupního proudu LED. Je počítáno s nejhorší variantou zapojení jedné LED diody na výstupu, tedy odpor  $0,1 \Omega$ . Hodnota kapacity kondenzátoru je vypočítána na  $1,08 \mu F$ . V návrhu je vybrán keramický kondenzátor s hodnotou  $1 \mu F$ .





### 2.2.1 Programové vybavení

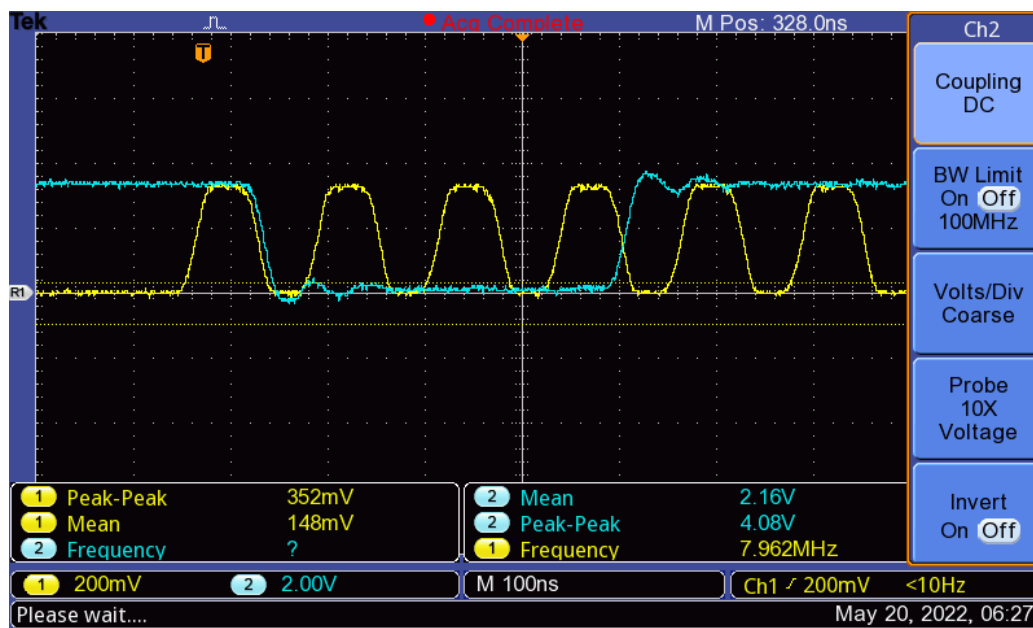
Srdcem programu mikrokontroleru je stavový automat, který je řízen trojicí bitů ovládajících periférií. Jednotlivé funkce jsou rozděleny do pěti knihovních souborů podle reálného zapojení zdroje. Soubor `led_driver` zahrnuje konfiguraci DPS a propojení jednotlivých komponent. Soubor dále používá soubor `spi_interface` pro zprostředkování SPI komunikace s čipy pomocí souborů `tps92682` a `tps92520`. Ty představují nejnižší vrstvu s funkcemi příslušícími zapojeným čipům měničů.

HAL (Hardwarový abstraktní vrstva) je systémové rozhraní, díky kterému není potřeba implementovat funkce pro práci s hardwarovým zařízením a jeho perifériemi. [16] Led driver využívá několika kategorií HAL. GPIO (General – purpose input/output) slouží k přístupu a ovládání vstupních a výstupních pinů mikrokontroleru, SPI a USART ovládají a nastavují komunikační sběrnice a TIM iniciuje, spouští a zastavuje zvolené časovače. Pro asynchronní přijímání komunikace je použit HAL modul DMA (Direct memory access). Modul při detekci komunikace na sběrnici začne automaticky bez přerušení práce mikrokontroleru zapisovat přicházející komunikaci na předem zvolené místo v paměti a po dokončení komunikace oznamuje hlavnímu programu dokončení přenosu nastavením příznakového bitu a možným přerušením.

Sběrnice `spi` byla testována při nastavení různých přenosových rychlostí. Funkční bezchybný přenos byl detekován při rychlosti nejvýše 4 Mbit/s. Při vyšší rychlosti dochází k chybné reprezentaci dat čtených z AD převodníků. Důvodem může být přechodový jev při změně logické hodnoty signálu, jak je možné pozorovat na obrázku 2.7.

Sériová sběrnice UART je provozována při rychlosti přenosu 38400 Bit/s, kterou limituje mimo jiné také délka a typ použitého USB kabelu a vnějších vlivech rušení. Je využíván přenos nejjednodušší varianty UART packetu: start bit, přenášená data a jeden stop bit. Při požadavku na větší jistotu správnosti přenosu by bylo vhodné použití kontrolních mechanismů, jakými jsou například paritní bit nebo CRC.

Pro účely nastavení parametrů měničů a komunikaci s nimi byly vytvořeny dva knihovní soubory `TPS92682` a `TPS92520`, ve kterých je podle doporučeného postupu programování z katalogových listů provedena inicializace a výchozí nastavení parametrů měničů spolu s funkcemi pro nastavení a spouštění daného kanálu. Před každým zapnutím kanálu je nutné čtením chybových registrů zkontrolovat chybu v obvodech a případně přečtením tyto chyby vymazat.



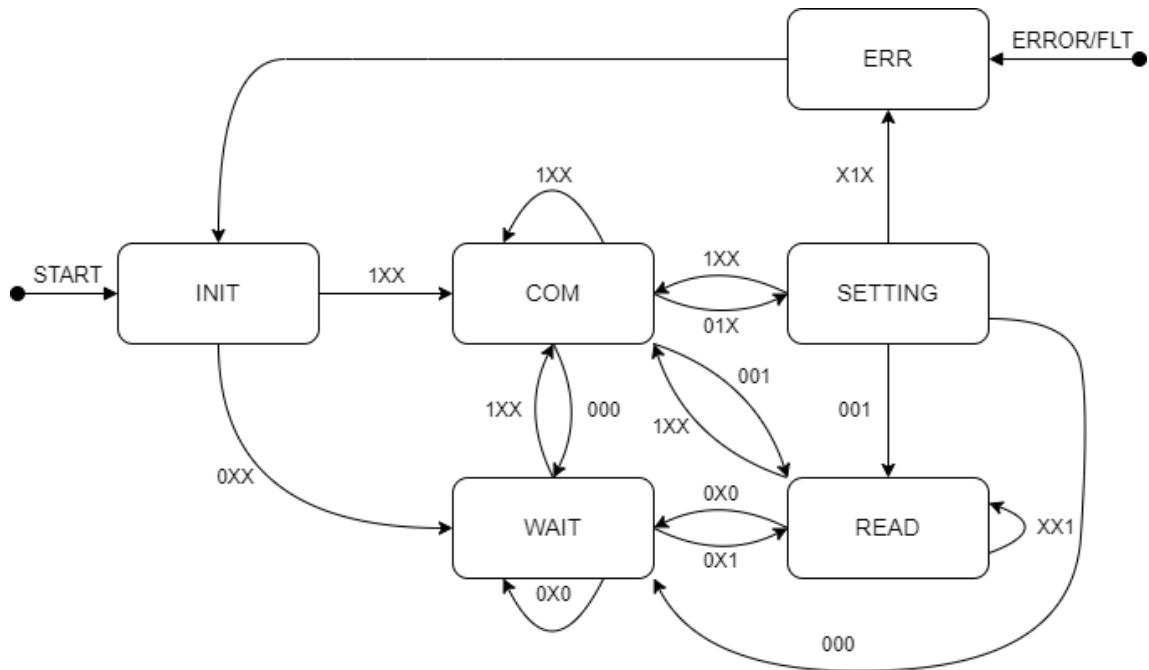
Obrázek 2.7 Průběh signálu a přechodový jev při přenosové rychlosti 8 Mbit/s

## 2.2.2 Stavový automat

Stavový (konečný) automat je výpočetní model jednoduchého počítače, který je složen z konečného počtu stavů, počátečního stavu a přechodových funkcí mezi nimi, které jsou řízeny konečnou množinou vstupních symbolů [17].

Činnost LED driveru lze popsat šesti stavy: INIT, COM, SET, READ, WAIT, ERR. Počáteční stav INIT představuje iniciační funkce, které zadávají výchozí hodnoty nastavení měničů a jejich odblokování po resetu. Je provedeno nastavení výstupních SS (Slave select) pinů sběrnice SPI a také zahájení zachytávání komunikace sběrnice UART pomocí modulu DMA. Stav COM zajišťuje zpracování sériové komunikace mikrokontroleru. Převádí tok bitů do struktury, ze které extrahuje parametry nastavení jednotlivých kanálů zdroje. Zavedení parametrů a ovládání samotných kontrolérů snižujících měničů zajišťuje stav SETTING. Čtení z registrů naproti tomu zajišťuje stav READ, který kontroluje registry chyb měničů a zpracovává hodnoty ADC registrů měření vstupních, výstupních napětí spolu s měřením napětí sepnutého a vypnutého stavu PWM, napájecím napětí logických obvodů čipů a teploty čipů. Stav ERR zpracovává a odesílá chyby jak jednotlivých čipů, tak chyby mikrokontroleru a komunikací SPI a UART a kóduje je do chybového kódu k diagnostice zdroje. Posledním stavem je klidový stav WAIT, který v daném intervalu pravidelně přechází do stavu READ a setrvává v klidu do příchodu komunikace. Přechodové funkce mezi stavy jsou řízeny vstupními symboly zahrnutými v tříbitovém parametru CONTROL. První bit je přiřazen funkci sériové komunikace a je ve vztahu preference před ostatními vstupními symboly hierarchicky nejvyšší. Druhý bit v pořadí představuje funkcionalitu nastavování parametrů a třetí bit odpovídá funkci čtení.

Automat je naprogramován pomocí nekonečné smyčky a příkazu switch, který zajišťuje výběr nastaveného stavu. Před každým cyklem jsou zkontrolovány jak vstupní piny FLT kontrolérů měničů, tak stisk tlačítka reset pro manuální přerušení programu. Vyhodnocení následujícího stavu ze vstupních symbolů se nachází před skončením každého stavu. Jednotlivé přechody mezi stavy v závislosti na vstupních symbolech jsou zpracovány v diagramu na obrázku 2.8.



Obrázek 2.8 Diagram stavového automatu mikrokontroleru

### 2.2.3 Komunikační protokol

Měřicí jednotka založená na modulu Comfile Pi řídí celý proces měření, mimo jiné také nastavování výstupních parametrů zdroje, který napájí LED diody osvětlující světlovody. Zdroj ovšem bude samostatným celkem, je tedy nutné zvolit vhodný komunikační protokol pokrývající všechny potřebné nastavovací a informační funkce, a to s možnou rezervou pro budoucí rozšíření a použití s jinými zařízeními a moduly.

Odesílaná zpráva má z důvodu správného dekódování pevnou délku a je rozdělena na hlavičkovou a datovou část. Hlavičková část obsahuje základní informace potřebné pro přenos fragmentů zprávy jako číslo fragmentu, celkový počet 8bitových fragmentů a příznak signalizující poslední posílaný fragment. Druhou částí hlavičkového fragmentu je příkazová část, ve které je možné nalézt bit povolení zapnutí daného kanálu, povolení PWM modulace a časovače, napěťová nebo proudová nastavovaná hodnota a softwarový restart zdroje.

Tabulka 2.1 První část paketu přijímacího módu (hlavičková část)

PN [3:0]				END	SIZE [2:0]		
OUTON	PWM	T_EN	VORI	RST	-	-	-

PN [3:0] - číslo fragmentu zprávy

END – 1 = poslední vysílaný fragment zprávy

SIZE [2:0] – celkový počet 8bitových fragmentů paketu

OUTON – 1 = kanál zdroje zapnut

PWM – 1 = PWM povoleno (doprovázené datovou částí)

T\_EN – 1 = časovač zapnutého stavu zdroje (doprovázené datovou částí)

VORI – bit pro nastavení proudového nebo napěťového režimu kanálu

RST – 1 = programový restart zdroje

Datovou část zprávy zahajuje fragment specifikující číslo nastavovaného kanálu. Pro zjednodušení přenosu je použito 8bitový rozsah čísla. Jelikož se jedná o čtyř kanálový zdroj, nebude s ohledem na zjednodušení v tomto případě využít efektivně celý rozsah fragmentu. V případě rozšíření zdroje o další kanály je možno toto místo využít.

Tabulka 2.2 Datová část paketu přijímacího módu určující číslo kanálu

LED_OUT [7:0]
---------------

LED\_OUT [7:0] - 8bitové číslo výstupního LED kanálu

Pro nastavení střídání PWM signálu byl zvolen 8bitový rozsah fragmentu, který umožňuje procentuální reprezentaci střídání do 100 %.

Tabulka 2.3 Datová část paketu přijímacího módu pro nastavení střídání PWM

PWM [7:0]
-----------

PWM [7:0] - 8bitové nastavení střídání PWM výstupu vyjádřená v procentech

Fragment IO nastavuje hodnotu výstupního proudu nebo napětí daného kanálu, jehož hodnota bude reprezentována jako 32bitový datový typ s plovoucí desetinnou čárkou (anglicky float).

Tabulka 2.4 Datová část paketu přijímacího módu pro nastavovací hodnoty

IO [31:0]
-----------

IO [31:0] - 32bitová hodnota nastavení hodnot (typ s plovoucí čárkou)

Do možných funkcí zdroje byla přidána funkcionalita časovače, která zajistí, že čas svitu připojeného LED modulu nebude delší než nastavená 16bitová hodnota v milisekundách, maximálně tedy 65536 ms neboli 65,5 sekund. Po uplynutí času je kanál deaktivován.

Tabulka 2.5 Datová část paketu přijímacího módu pro nastavení časovače

TIMER [15:0]
--------------

TIMER [15:0] – 16bitové nastavení časovače v ms

Po přijetí zprávy je potřeba dát vědět vysílači, že zpráva byla přijata správně nebo přenos potřebné zopakovat. K tomu slouží příznak ACK (Acknowledgement), jehož nastavením je potvrzen správný přenos zprávy [18].

Tabulka 2.6 První část paketu vysílacího módu

PN [1:0]	ACK	SIZE [1:0]	SET	ERROR	-
----------	-----	------------	-----	-------	---

PN [1:0] – číslo části paketu

ACK – 1 = potvrzení doručení zprávy

SIZE [1:0] – počet fragmentů vysílaného paketu

SET – 1 = parametry nastaveny

ERROR – 1 = objevena chyba následována daty o chybě

Datová část fragmentu je propagována jen v případě nastavení příznaku ERROR. Je zde uložena 8bitový kód objevené chyby. K dispozici pro charakteristiku stavu zařízení je 255 kódů chyb. Budou dále rozděleny do kategorií podle místa vzniku a vážnosti daného stavu.

Tabulka 2.7 Datová část paketu vysílacího módu

ERROR [7:0]
-------------

ERROR [7:0] – chybový kód

## 2.2.4 Chybové kódy

Chybové kódy slouží pro diagnostiku zdroje v případě jak vnější chyby, tak selhání hardwarové a softwarové části zdroje. Podle místa vzniku chyby jsou kódy rozděleny do kategorií, jak je možné vidět v tabulce 2.8. První hodnota v kategorii lze označit za obecný název chyby a pokrývá neoznačené chyby vzniklé v dané kategorii. Rezervy nevyužitých kódů mohou být v budoucnu využity k rozšíření počtu kanálů a přidání dalších funkčních celků zdroje.

Chyby sběrnice UART jsou z HAL definice rozděleny podle původu na chybu šumu (noise error), chybu rámce (frame error), chyba DMA modulu a chyba zahlcení sběrnice (overrun error). V případě použití kontrolních mechanismů přenosu je možné použít pro zpracování jejich chyb kódy 0x03 až 0x01.

Chyby sběrnice SPI lze rozdělit podle místa detekce chyby na dvě skupiny. SPE bit je posílán měniči, pokud posílaný paket nesplňuje definované parametry a nelze tedy správně interpretovat danou posílanou informaci. Místo detekce je odvozeno z chybového kódu, kde kód 0x09 označuje místo zvyšujícího měniče a následující kódy jsou vzestupně přidělovány jednotlivým snižujícím měničům. Při detekci chyby na straně mikrokontroleru se v přerušení programu odesílá kód 0x0F.

Kategorie zvyšujícího měniče popisuje chyby přečtené z chybových registrů FLT1 a FLT2 na adresách 11h a 12h. Do těchto registrů zapisují obvody kontrolující jak snímané vstupní a výstupní napětí a proudy, tak špatné propojení kritických pinů měniče, které tyto parametry snímají. Při zvýšení teploty nad prahovou hodnotu je aktivována tepelná ochrana a odeslán chybový kód podle tabulky 2.8.

U snižujícího měniče jsou chyby stejně jako je tomu u zvyšujícího měniče získávány čtením stavových registrů STATUS1 až STATUS3 s adresami paměti 0x03 až 0x05. Místo vzniku je určeno čtveřicí horních bitů, jejichž rozsah lze rozšířit do dalších kódů rezervy. Měnič kontroluje stejně jako v předchozím případě překročení dovolené teploty a podpětí jednotlivých napájecích obvodů. Pokud napětí mezi měřícími body klesne pod hodnotu 2,45 V, obvod dále pokračuje v činnosti bez přerušení a nastavuje bit SHORT detection, který lze použít pro diagnostiku poruchy v obvodu.

Chybové stavy mikrokontroleru jsou zahrnuty v kategorii 0x80, která zahrnuje zbylé chyby systému HAL a objevené hardwarové chyby mikrokontroleru.

Tabulka 2.8 Chybové kódy protokolu

<i>Kategorie chybových kódů</i>	<i>Kódy chyb</i>	<i>Název chyby</i>
<b>0x80</b>		<b>Chyby mikrokontroleru (128)</b>
	0x81 – 0xFF	Prostor pro HAL error kódy
<b>0x40</b>		<b>Rezerva (64)</b>
<b>0x20</b>		<b>Chyby snižující měnič (32)</b>
	0x21, 0x31	Tepelná ochrana
	0x22, 0x32	Podpětí vstupního napětí (Vin undervoltage)
	0x23, 0x33	Podpětí Bootstrap (Bst undervoltage)
	0x24, 0x34	Proudový limit HS tranzistoru (HSIlim)
	0x25, 0x35	Proudový limit LS tranzistoru (LSIlim)
	0x26, 0x36	Podpětí 5V napájení (V5A Undervoltage)
	0x27, 0x37	Chyba při vstupní napětí restartu (PC bit)
	0x28, 0x38	Detekce zkratu (short)
<b>0x10</b>		<b>Chyby zvyšující měnič (16)</b>
	0x11	Přepětí výstupu (Output OV)
	0x12	Podpětí výstupu (Output UV)
	0x13	Proudový limit (Ilim)
	0x14	Podpětí vstupního napětí (Input undervoltage)
	0x15	1,5x než nastavený proud (OC)
	0x16	0,5x než nastavený proud (UC)
	0x17	Otevřený obvod pinu IS (ISOpen)
	0x18	Otevřený obvod pinu RT (RTOpen)
	0x19	Otevřený obvod pinu FB (FBOpen)
	0x1A	Tepelná ochrana
<b>0x08</b>		<b>Chyby SPI sběrnice (8)</b>
	0x09 – 0x0E	Přijatý SPI chybový bit (SPE) s místem vzniku
	0x0F	Detekovaná chyba SPI na straně kontroléru
<b>0x04</b>		<b>Chyby přenosu UART (4)</b>
	0x05	Šum
	0x06	Zahlcení
	0x07	Chyba rámce
	0x08	Chyba DMA
<b>0x02</b>		<b>Rezerva (2)</b>
<b>0x01</b>		<b>Rezerva (1)</b>
<b>0x00</b>		<b>Stav bez chyby</b>

## 2.3 Ovládací program pro měření parametrů

LED zdroj je navržen pro komunikaci s různými druhy ovládacích zařízení pomocí navrženého protokolu. Pro účely měření byla vytvořena HTML aplikace pro jednoduché nastavování parametrů zdroje. Funkce komunikace a zpracování dat jsou realizovány programovacím jazykem JavaScript, který pro sériovou komunikaci používá Web Serial API. Umožňuje sériovou komunikaci se zařízeními připojenými k počítači, které napodobují (emulují) sériový port. Tím se více přibližují požadavkům operačních systémů, které preferují komunikaci pomocí vysokoúrovňového API, než je tomu například u nízkoúrovňového USB API. [19]

Tlačítkem Connect lze vybrat daný COM port počítače, na který je LED driver připojen. Posuvným přepínačem jsou povoleny zadané kanály a nastavené výstupní parametry potvrzeny a poslány tlačítkem SET. Změřená napětí a teploty zdroje jsou pravidelně aktualizovány a přepisovány do boxů na pravé straně. Pro kontrolu komunikace a ladění programu je spodní část aplikace přidáno okno konzole, která zobrazuje zachycenou komunikaci.

Výhodou testovací aplikace v prohlížeči je její nezávislost na systému a spuštění bez instalace programu. Aplikaci je možné dále modifikovat a rozšiřovat v textových editorech bez nutnosti speciálních vývojových prostředí. Prohlížeč však musí podporovat rozhraní Web Serial API a také povolené spouštění skriptů v prohlížeči.

**LED driver controller**

**Channel 1**

Current  1.6 A

PWM  100 %

Timer  ms

**Channel 2**

**Channel 3**

Current  0 A

PWM  100 %

Timer  ms

**Channel 4**

TEMP

VDD voltage

Input voltage

LED voltage 1

LED voltage PWM ON 1

LED voltage PWM OFF 1

LED voltage 2

LED voltage PWM ON 2

LED voltage PWM OFF 2

TEMP

VDD voltage

Input voltage

LED voltage 1

LED voltage PWM ON 1

LED voltage PWM OFF 1

LED voltage 2

LED voltage PWM ON 2

LED voltage PWM OFF 2

Obrázek 2.9 Náhled rozhraní ovládací aplikace

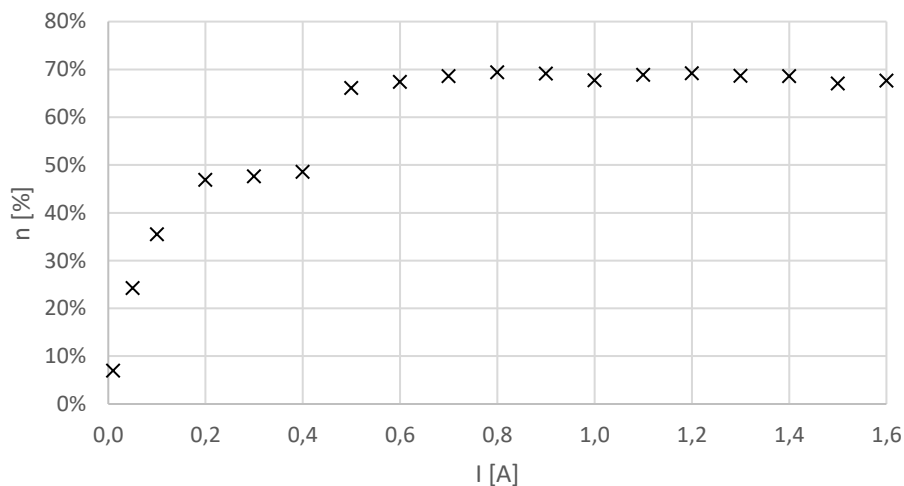


## 2.4 Výsledky měření

Správná funkce zdroje a jeho parametry byly testovány se zátěží LED modulem připojeným na kanál číslo 1. Jedná se o sériové zapojení dvou LED diod, u nichž se úbytek napětí na diodách pohyboval od 5,3 V do 6,6 V v celé škále nastavovaného proudu. Měření bylo provedeno na prototypové desce se standardním materiálem FR4, teplotou  $T_g$  130 – 140 °C a tloušťkami vnitřních vrstev 0,5 oz a vnějších vrstev 1 oz.

### 2.4.1 Účinnost

Závislost účinnosti zdroje na nastavovaném proudu s krokem 50 mA byla změřena proudovou sondou Agilent N2782A 0,1 V/A a osciloskopem Tektronix tbs1102b-edu a zanesena do grafu na obrázku 2.10. Z průběhu je patrné strmý vzestup účinnosti do hodnoty 0,4 A, který je zapříčiněn velkým rozdílem nastavované malé hodnoty a fixní hodnoty proudu, který zdroj potřebuje pro napájení řídicích obvodů. Účinnost zdroje v nominální hodnotě nastaveného proudu 1 A byla odečtena na 69 %.



Obrázek 2.10 Účinnost zdroje v závislosti na nastaveném napětí

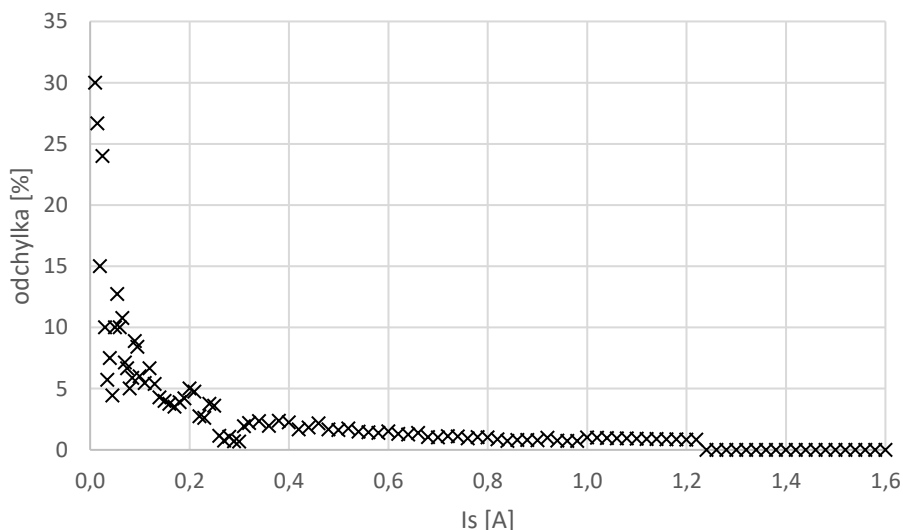
### 2.4.2 Zvlnění proudu

Důležitým parametrem spínaného zdroje konstantního proudu je výsledné zvlnění proudu, jež bylo měřeno při nastaveném výstupním proudu kanálu 1,6 A. Proudovou sondou Agilent N2782A byl zobrazen časový průběh výstupního proudu na osciloskopu Tektronix TBS1102B-EDU a odečteno zvlnění 250 mA o frekvenci 100 kHz. Napěťovou sondou bylo odečteno zvlnění napětí 65 mV o frekvenci 400 kHz a 284 mV o frekvenci 100 kHz.

Pro zlepšení zvlnění výstupních parametrů by bylo vhodné v pozdějších verzích upravit parametry výstupního filtru zdroje.

### 2.4.3 Přesnost nastavení proudu

Odchylka výstupního proudu od nastaveného byla měřena v celé nastavovací škále. Do nastavení hodnoty 70 mA se odchylka snižovala se vzrůstajícím proudem a dosáhla 30 % v nejnižší hodnotě nastavení. Od 70 mA do proudu 1,2 A se odchylka pohybovala okolo 8 % a od nastavené hodnoty 1,2 A se z důvodu změny rozsahu měřidla ocitla mimo měřitelný rozsah.



Obrázek 2.11 Graf závislosti poměru nastaveného a naměřeného proudu kanálu č.1 na nastaveném proudu

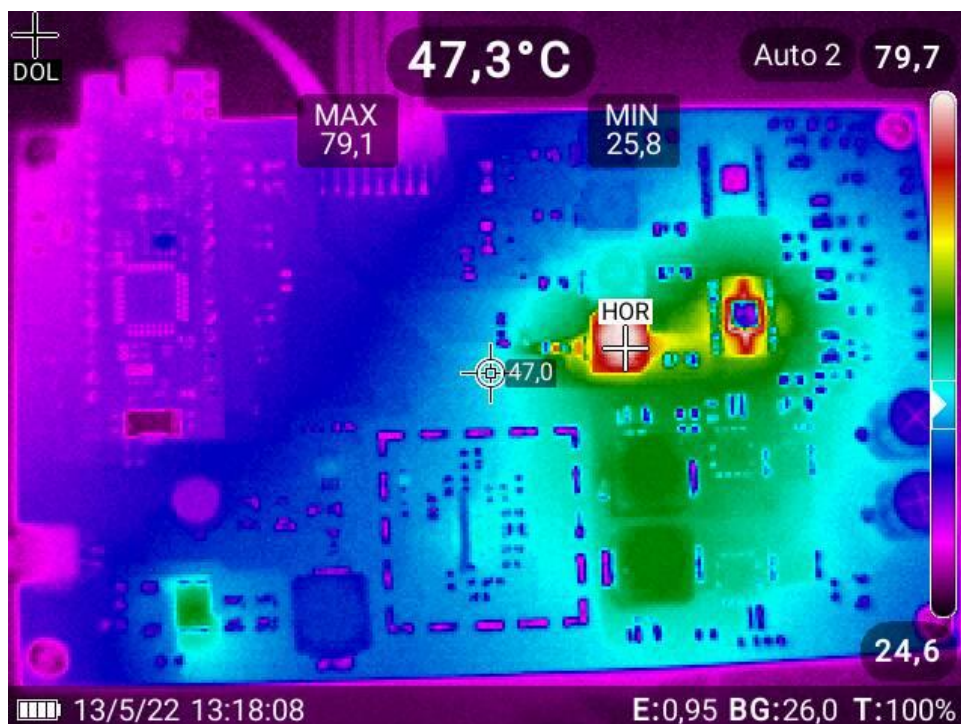
### 2.4.4 Měření tepelných emisí zdroje

Emise teplého záření produkovaného ze zdroje spadá mezi kritické a výkonově limitující parametry zařízení. Tepelné chování zdroje bylo měřeno při napětí výstupním proudu 1,6 A a napětí na LED diodách 6,3 V, tedy při výkonu asi 10 W termokamerou Fluke Ti400.

Po prvním spuštění zdroje bylo kamerou detekováno zahřívání MOSFET tranzistoru zvyšujícího měniče, jak je vidět na obrázku 2.12, kdy teplota po 15 minutách dosáhla hodnoty 99 °C. S tím se také pojila nízká účinnost zdroje pohybující se okolo 58 %. Po diagnostice programu byl upravena hodnota registru ISlope na 100 mV a kalibračními registry vyrovnáno rozdělení proudů tranzistorů v dvoufázovém režimu spínání. Po této úpravě se tepelné emise zvyšujícího měniče snížily na vyhovující úroveň. Pro budoucí verze DPS je doporučeno prokovení plochy sousedící s chladicí ploškou tranzistorů pro zvýšení chladicí plochy. Při vyšších nárocích na výkon je potřeba počítat s externím chladičem snižujících měničů nebo použití verze pouzdra s chlazením do desky.



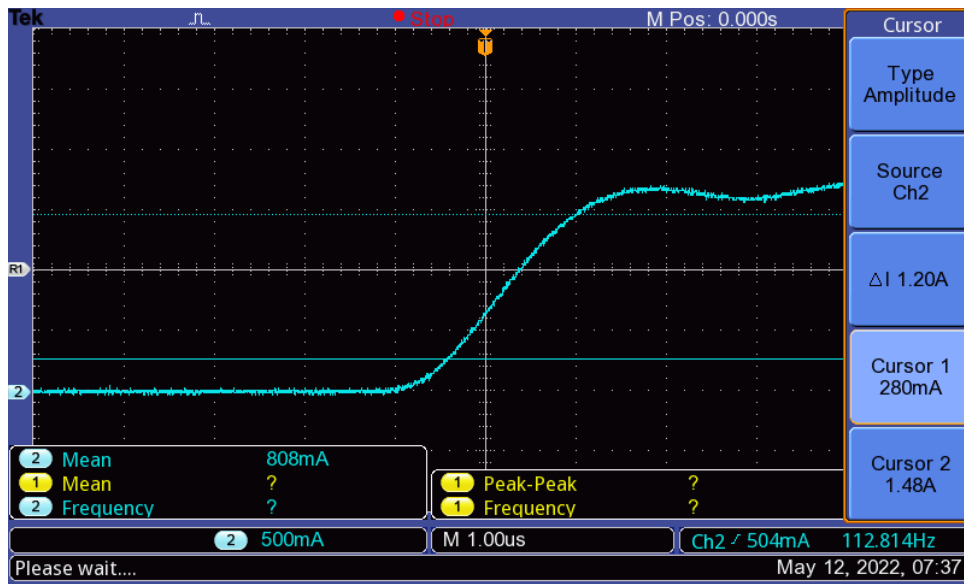
Obrázek 2.12 Detail zahříváného místa zvyšujícího měniče před kalibrací a úpravě hodnoty registru CHx\_ISLOPE



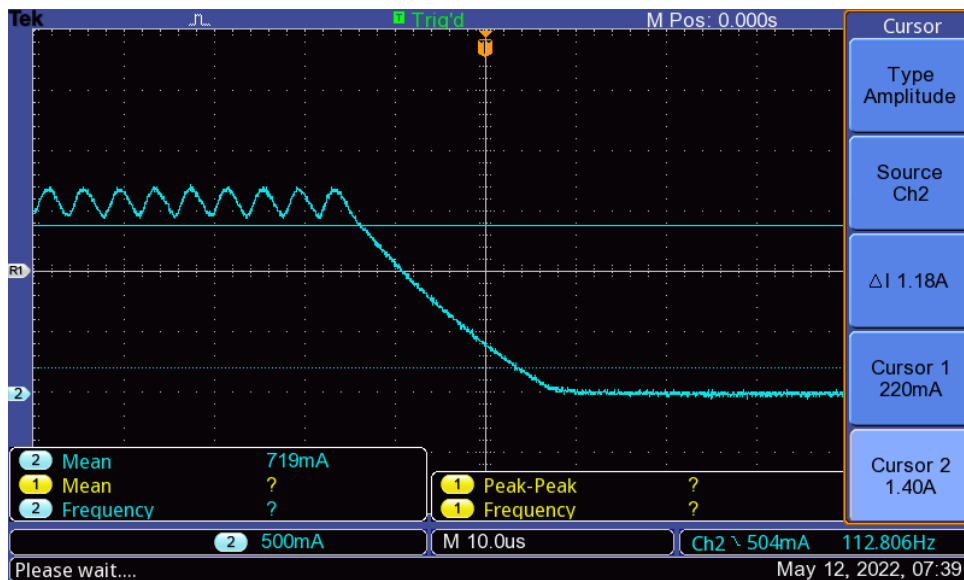
Obrázek 2.13 Detail zahříváného místa zvyšujícího měniče před kalibrací a úpravě hodnoty registru CHx\_ISLOPE

## 2.4.5 Měření nástupné a sestupné hrany PWM modulace

Parametrem PWM modulace výstupního proudu je rychlost přeběhu SR, kterou ovlivňuje zejména velikost kapacity výstupního kondenzátoru. Hodnota PWM modulace byla nastavena na 50 % a z časového průběhu proudu byly odečteny hodnoty SR pro náběžnou hranu 850 mA/μs, pro sestupnou hranu 70 mA/μs. Hodnoty odpovídají požadavkům aplikace.



Obrázek 2.14 Nástupná hrana výstupního proudu s PWM se střídou 50 %



Obrázek 2.15 Sestupná hrana výstupního proudu s PWM se střídou 50 %

## ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo navrhnout univerzální LED zdroj, který bude komunikovat s připojeným řídicím modulem a zajišťovat napájení připojovaných obvodů s LED diodami s předem známými, avšak rozdílnými vstupními parametry.

Teoretická část práce rozebírá problematiku DC – DC a jejich rozdělení podle využívaných součástek a technologií. Z hlediska výhod a nevýhod jsou porovnány lineární a spínané měniče. Dále jsou detailněji charakterizovány typy měničů použitých v této práci, je vysvětlen princip fungování zvyšujícího a snižujícího měniče, které jsou v navazujícím návrhu zakomponovány.

Druhá část práce je věnována samotnému návrhu jak schématu zapojení, tak výběru řídicího modulu mikrokontroleru. V blokovém schématu je zdroj rozdělen do funkčních bloků zajišťujících úpravu vstupního napětí a signálů, napájení digitálních a analogových částí a zvýšení napětí měničem, který napájí snižující měnič pracující v režimu proudového zdroje. Ze schématu je vytvořen návrh desky plošných spojů, který byl po výrobě a osazení oživen a byla zkontrolována funkčnost jednotlivých bloků.

Z životního cyklu zdroje bylo definováno šest stavů zařízení spolu se třemi vstupními symboly, které rozhodují o přechodech mezi těmito stavy. Spolu s programem mikrokontroleru byl navrhnout komunikační aplikační protokol pro výměnu nastavovacích a stavových informací mezi navrhovaným zdrojem a připojenou ovládací jednotkou. Pomocí datových zpráv, posílaných a přijímaných v 8bitových datových fragmentech po sběrnici UART, jsou získávána data o výstupních napětích měřeními AD převodníky snižujících měničů a detekovány chybové a poruchové stavy komunikujících čipů.

Správná činnost zdroje byla testována měřením účinnosti, přesnosti nastavení výstupního proudu, zvlnění proudu a rychlosti přeběhu PWM modulace spolu s termálními emisemi zdroje. Z hlediska funkčnosti je zdroj schopen nastavovat parametry v celé katalogovém listem garantované škále do 1,6 A. Pro následující verze desky plošných spojů jsou doporučeny úpravy teplotního managementu snižujícího měniče, zvýšení tloušťky vodivých vrstev a úpravy výstupního filtru z důvodu snížení zvlnění proudu v následujících verzích DPS.

## LITERATURA

- [1] KREJČÍŘÍK, Alexandr. *DC/DC měniče*. 1. vydání. Praha: BEN, 2001, 112 s. ISBN 80-730-0045-8.
- [2] FWU, Wilson a Aaron PAXTON. *LDO Basics: Texas Instruments* [online]. [cit. 2021-12-05]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/eb/slyy151a/slyy151a.pdf>
- [3] CASTALDO, Adam. *Switching regulator fundamentals: Texas Instruments* [online]. [cit. 2021-12-05]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/an/snva559c/snva559c.pdf>
- [4] REGARTY, Timothy, Robert LOKE a David PACE. *Understanding EMI and mitigating noise in DC/DC converters: Texas Instruments* [online video]. In: . [cit. 2021-12-13]. Dostupné z: <https://training.ti.com/understanding-emi-and-mitigating-noise-dcdc-converters>
- [5] KREJČÍŘÍK, Alexandr. *Napájecí zdroje I*. 2. vydání dotisk. Praha: BEN - technická literatura, 1998, 351 s. ISBN 80-860-5602-3.
- [6] VLČEK, Jiří. *Měření a sběr dat pomocí PC* [online]. [cit. 2021-12-13]. Dostupné z: [https://www.tzb-info.cz/docu/texty/0001/000102\\_mereni\\_a\\_sber\\_dat\\_pomoci\\_pc.pdf](https://www.tzb-info.cz/docu/texty/0001/000102_mereni_a_sber_dat_pomoci_pc.pdf)
- [7] ALICKE, Falk, Matthias FEULNER, Frank DEHMELT, Ankur VERMA a G. BECKE. *Comparing Bus Solutions: Texas Instruments* [online]. [cit. 2021-12-13]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/an/slla067c/slla067c.pdf>
- [8] PEÑA, Eric a Mary LEGASPI. *UART: A Hardware Communication Protocol Understanding Universal Asynchronous Receiver/Transmitter: Analog Devices* [online]. [cit. 2021-12-05]. Dostupné z: [www.analog.com/media/en/analog-dialogue/volume-54/number-4/uart-a-hardware-communication-protocol.pdf](http://www.analog.com/media/en/analog-dialogue/volume-54/number-4/uart-a-hardware-communication-protocol.pdf)
- [9] DHAKER, Piyu. *Introduction to SPI Interface: Analog Devices* [online]. [cit. 2021-12-05]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/analog-dialogue/volume-52/number-3/introduction-to-spi-interface.pdf>
- [10] TEXAS INSTRUMENTS. *TPS92682-Q1 Dual-Channel Constant-Voltage and Constant-Current Controller with SPI Interface* [online]. 2021 [cit. 2021-11-16]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps92682-q1.pdf>
- [11] AFZAL, Sal. I2C Primer: What is I2C? (Part 1). In: *Analog Devices* [online]. 2021 [cit. 2021-12-06]. Dostupné z: <https://www.analog.com/en/technical-articles/i2c-primer-what-is-i2c-part-1.html>

- [12] KLEIN, Stefan, FAE; ATSC. *Design and Application Considerations of Input Filter to reduce Conducted Emissions caused by DC/DC converter: Rohm Semiconductor* [online]. [cit. 2021-12-13]. Dostupné z: [https://fscdn.rohm.com/en/products/databook/applinote/ic/power/input-filter-for-dcdc-converter\\_an-e.pdf](https://fscdn.rohm.com/en/products/databook/applinote/ic/power/input-filter-for-dcdc-converter_an-e.pdf)
- [13] TEXAS INSTRUMENTS. *TPS7B82-Q1 Automotive 300-mA, High-Voltage, Ultra-Low-IQ Low-Dropout Regulator* [online]. 2021 [cit. 2021-11-30]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps7b82-q1.pdf>
- [14] TEXAS INSTRUMENTS. *TPS92520-Q1 4.5-V to 65-V Dual 1.6-A Synchronous Buck LED Driver with SPI Control* [online]. 2021 [cit. 2021-11-16]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps92520-q1.pdf>
- [15] NUCLEO-G031K8. In: *ARM MBED* [online]. 2021 [cit. 2021-12-06]. Dostupné z: <https://os.mbed.com/platforms/ST-Nucleo-G031K8/>
- [16] STMICROELECTRONICS. *Description of STM32F4 HAL and low-layer drivers* [online]. [cit. 2022-05-17]. Dostupné z: [https://www.st.com/resource/en/user\\_manual/dm00105879-description-of-stm32f4-hal-and-ll-drivers-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/user_manual/dm00105879-description-of-stm32f4-hal-and-ll-drivers-stmicroelectronics.pdf)
- [17] KYBIC, Jan. *Konečný automat* [online]. [cit. 2022-05-17]. Dostupné z: [https://cw.fel.cvut.cz/b181/\\_media/courses/b3b33alp/prednasky/07a\\_konecny\\_automat.pdf](https://cw.fel.cvut.cz/b181/_media/courses/b3b33alp/prednasky/07a_konecny_automat.pdf)
- [18] KAMMER, David, Gordon MCNUTT, Brian SENESE a Jennifer BRAY, ed. *Bluetooth Application Developer's Guide: The Short Range Interconnect Solution*. United States of America: Elsevier, 2002. ISBN 978-1-928994-42-8.
- [19] Read from and write to a serial port. In: *Web.dev* [online]. [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://web.dev/serial/>

# SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

## Zkratky:

PWM	Pulzně šířková modulace
LDO	Regulátory napětí s nízkým úbytkem
EMC	Elektromagnetická kompatibilita
EMI	Elektromagnetická interference
I <sup>2</sup> C	Dvou vodičová datová sběrnice
SPI	Sériové periferní rozhraní
MOSI	Master výstup – slave vstup
MISO	Master vstup – slave výstup
SSN	N výběr slave obvodu (N slave select)
UART	Univerzální asynchronní přijímač/vysílač
HAL	Hardware abstraction layer
GPIO	General-purpose input/output

## Symboly:

$R_{DS(on)}$	odpor vodivého kanálu unipolárního tranzistoru	( $\Omega$ )
$r_D$	dynamický odpor diody	( $\Omega$ )
$f_{SW}$	spínací frekvence	(Hz)
$L_F$	indukčnost cívky	(H)
$V_{in}$	vstupní napětí	(V)
$V_{out}$	výstupní napětí	(V)
$I_D$	proud MOSFET tranzistorem	(A)
$P_O$	výstupní výkon	(W)
D	střída signálu	(-)
SR	Rychlost přeběhu (slew rate)	(V/ $\mu$ s)



# SEZNAM PŘÍLOH

## **PŘÍLOHA A – DOKUMENTACE DPS**

- A1 BLOKOVÉ SCHÉMA
- A2 VSTUPNÍ OBVODY
- A3 5V ZDROJ
- A4 ZVYŠUJÍCÍ MĚNIČ
- A5 SNIŽUJÍCÍ MĚNIČ
- A6 DOKUMENTACE DPS
- A7 NÁVRH VRSTEV DPS

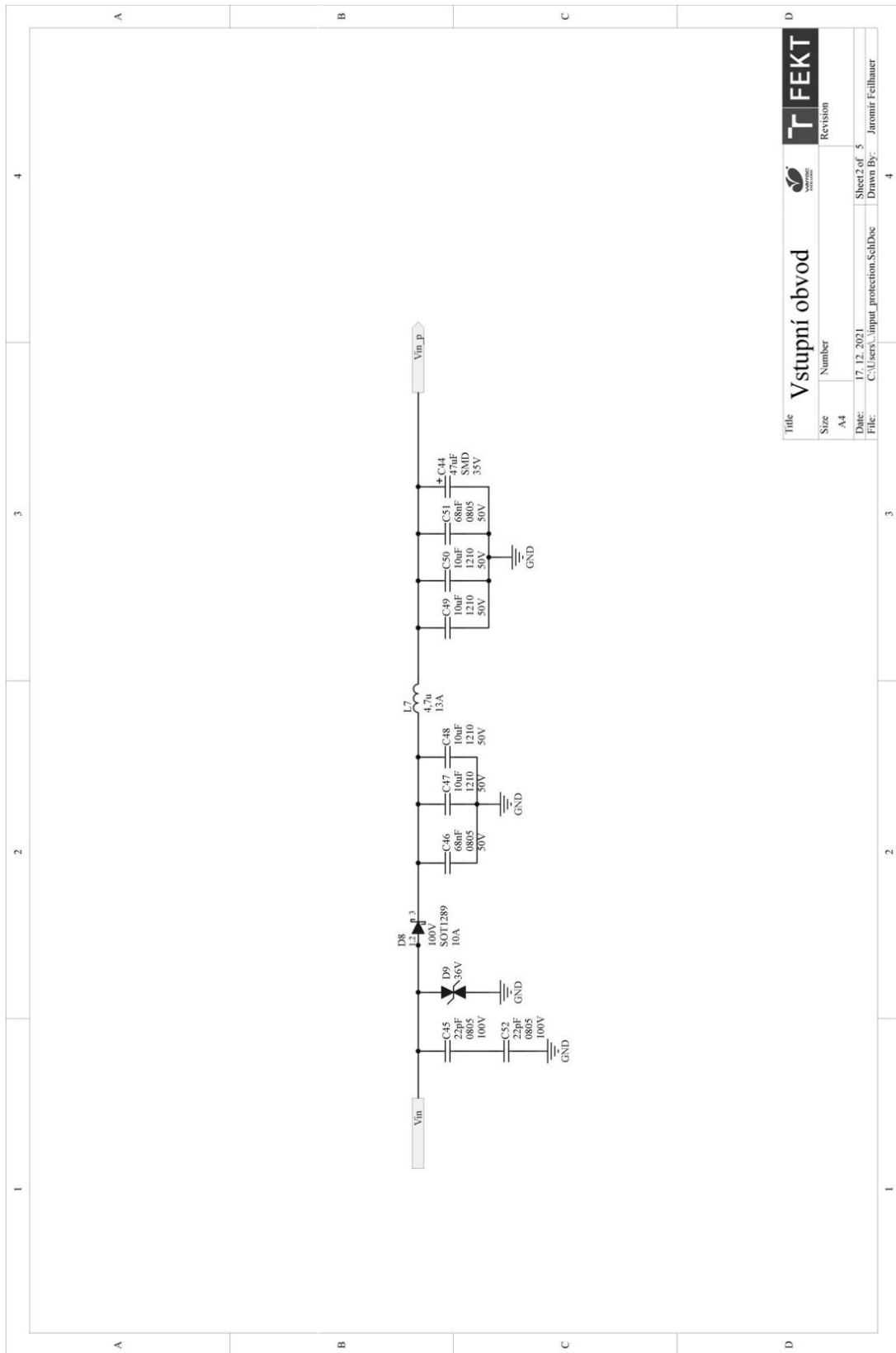
## **PŘÍLOHA B – ALTIUM PROJEKT (LED\_driver\_altium)**

## **PŘÍLOHA C – ZDROJOVÝ KÓD STM32 PROJEKT (LED\_driver\_stm32)**

## **PŘÍLOHA D – ZDROJOVÝ KÓD TESTOVACÍHO PROGRAMU (LED\_driver.html)**



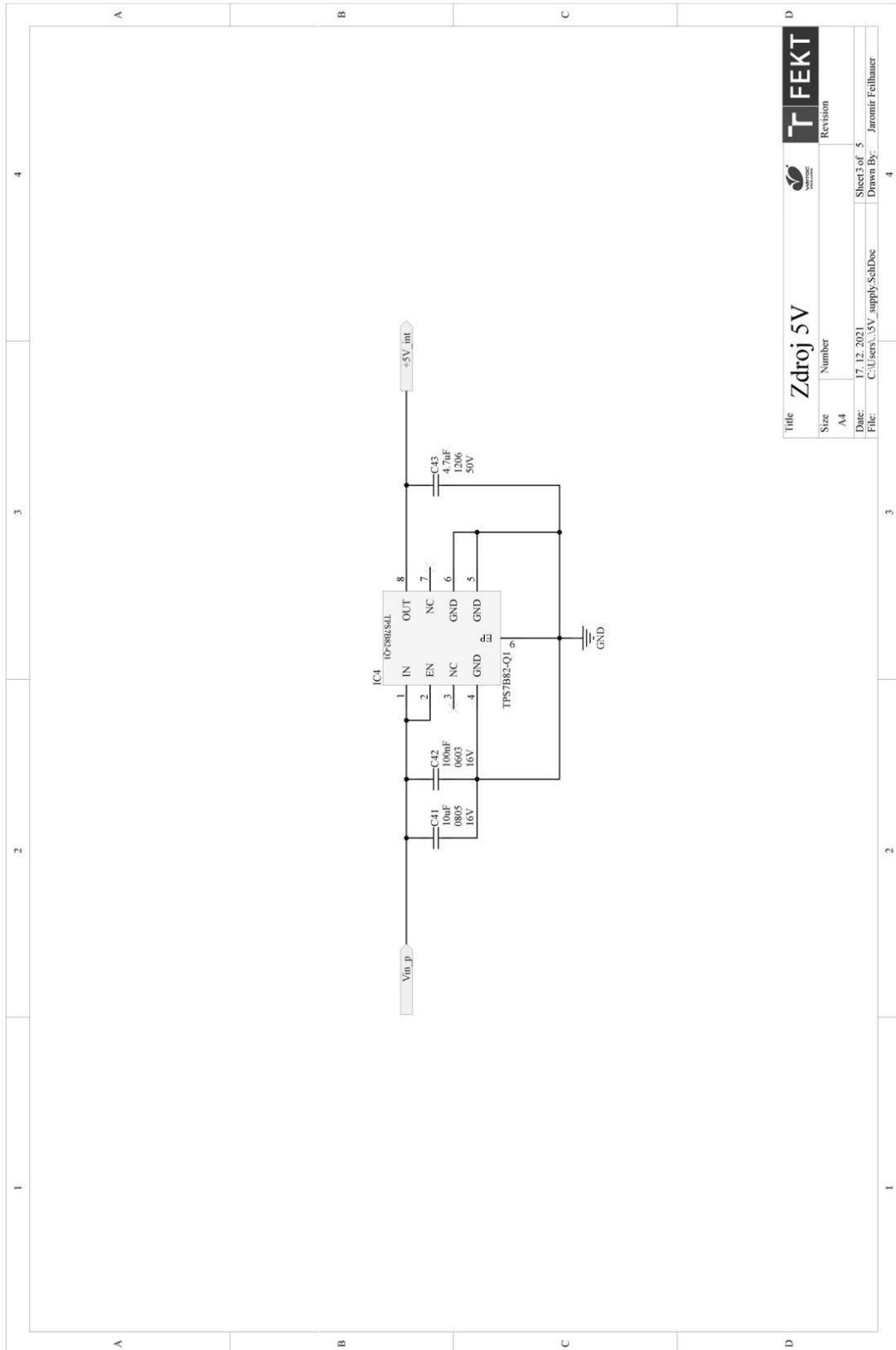
## A.2 Vstupní obvody



Title		Vstupní obvod	
Size	Number	Revision	
A4			
Date:	17.12.2021	Sheet 2 of 5	Drawn By: Janomir Fellbauer
File:	C:\Users\...input_protection.SchDoc		



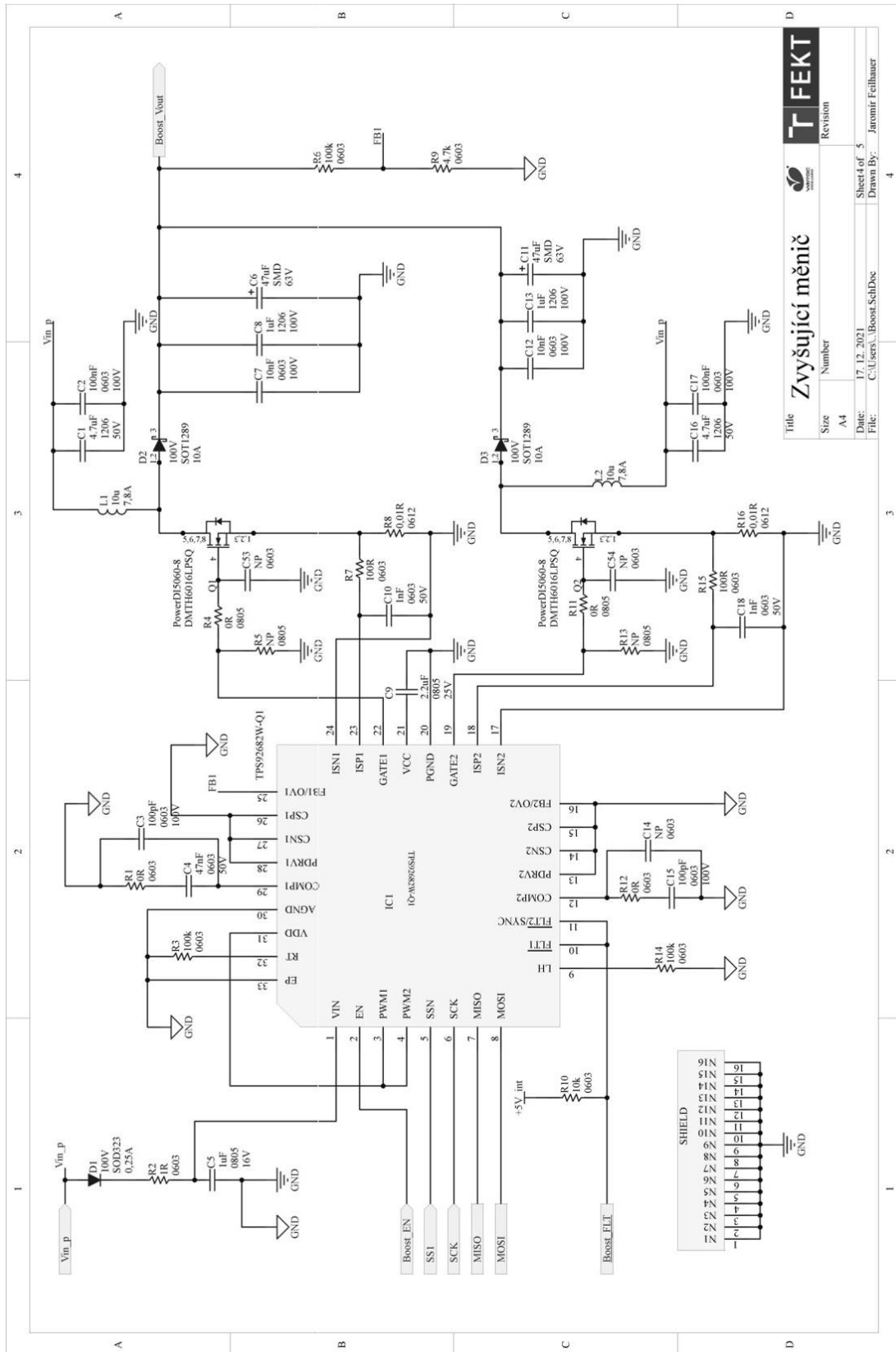
## A.3 5V zdroj



Title		Zdroj 5V	
Size	Number	Revision	
A4			
Date:	17. 12. 2021	Sheet 3 of	5
File:	C:\Users\...5V_supply_SchDoc	Drawn By:	Jaromir Feilbauer



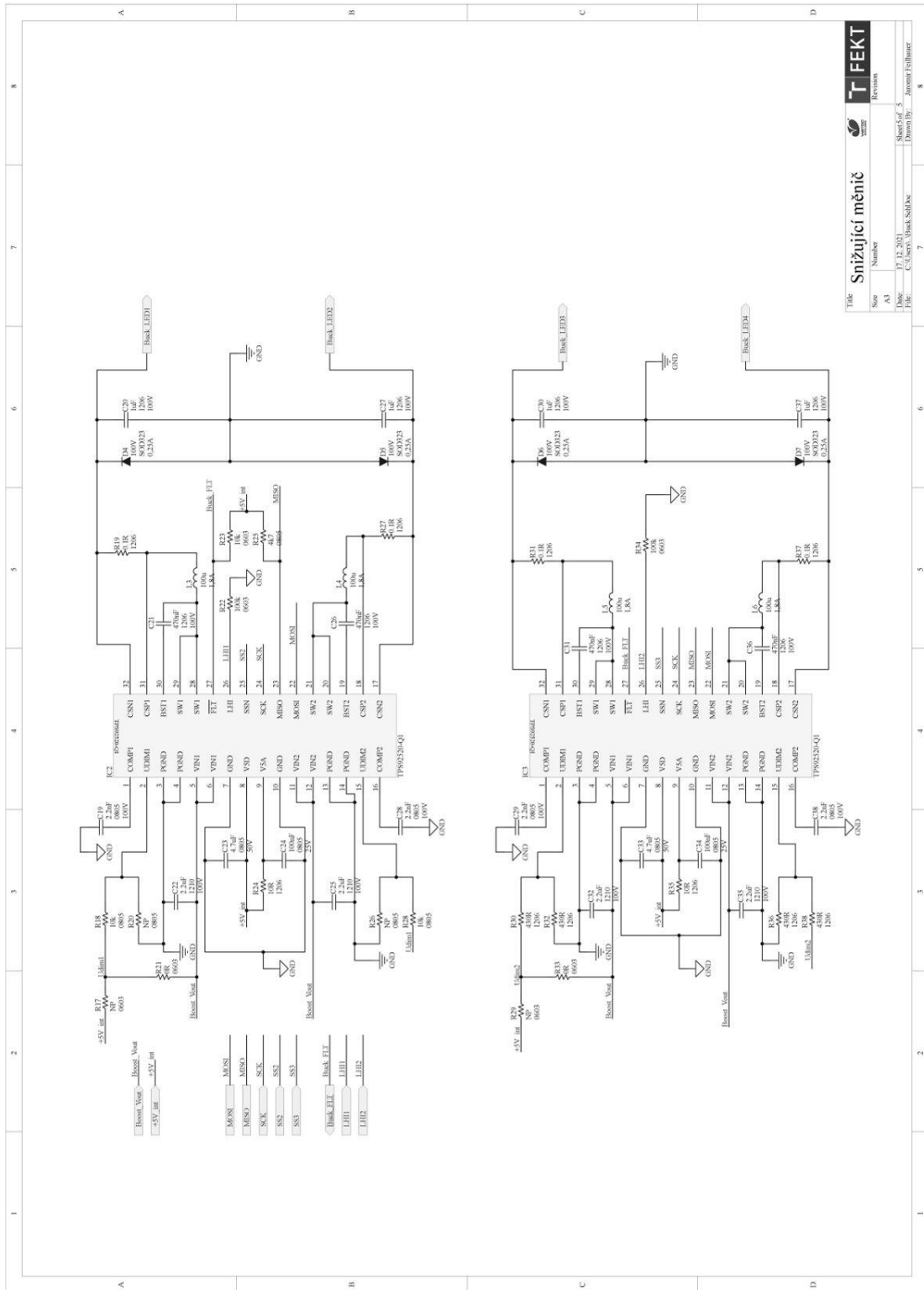
# A.4 Zvyšující měnič



Title		Zvyšující měnič	
Size	Number	Revision	
A4			
Date:	17.12.2021	Sheet of	5
File:	C:\Users\... Boost_SchDec	Drawn By:	Jaromir Feilbauer

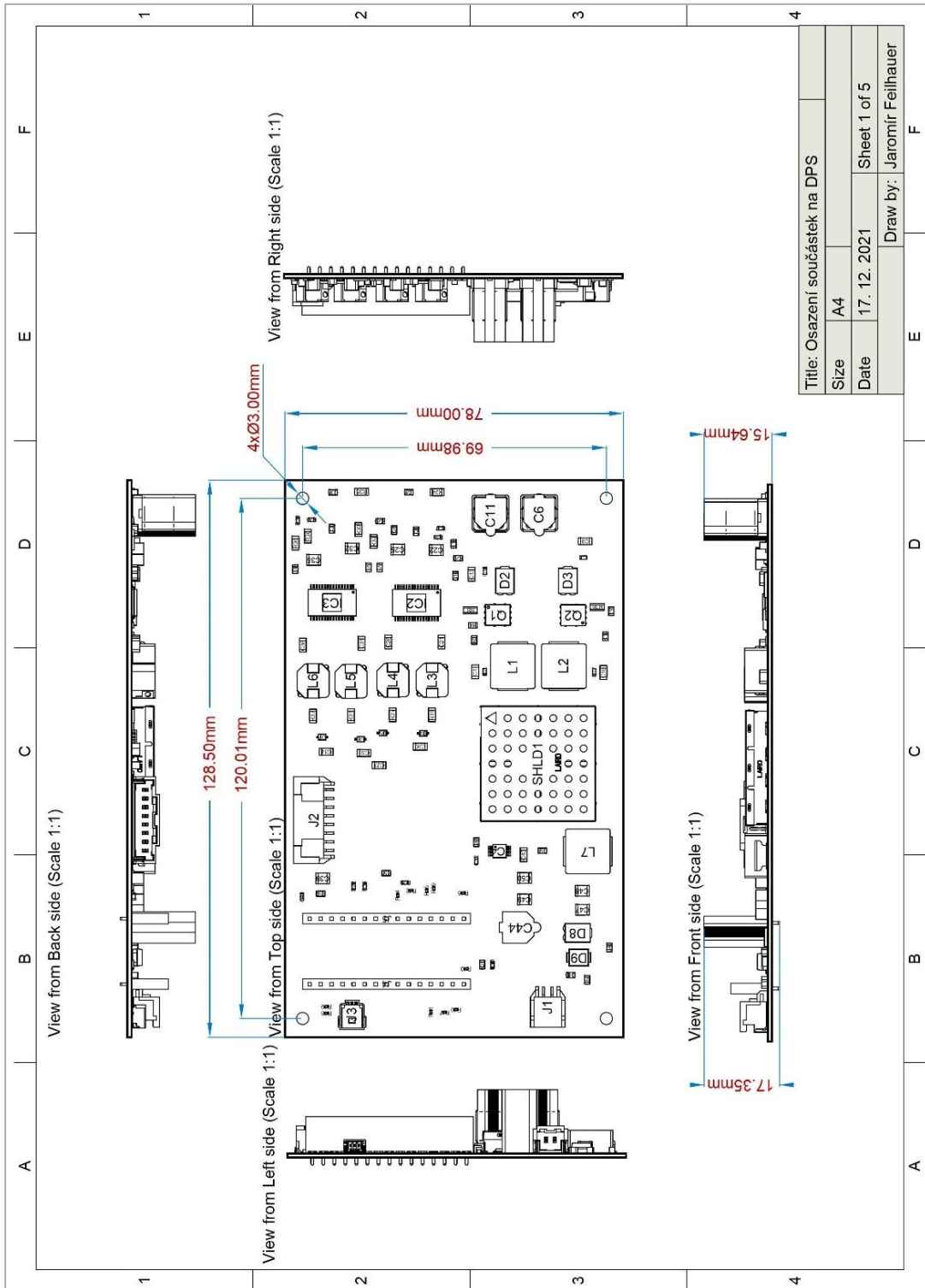


# A.5 Snížující měnič



Title		Revision	
Snížující měnič		1	1
Size	Number	Sheet 52	Revision
A3	13.053	13	1
File	C:\Users\jku\Documents\Black_S010x	Sheet 52	Revision
		13	1

# A.6 Dokumentace DPS



Title: Osazení součástek na DPS	
Size	A4
Date	17. 12. 2021
Sheet 1 of 5	
Draw by: Jaromír Feilhauer	

## A.7 Návrh vrstev DPS

