

# Návrh obousměrného DC-DC měniče pro bateriové aplikace

## Bakalářská práce

*Studijní program:*

B0714A270001 Mechatronika

*Autor práce:*

**Jiří Němeček**

*Vedoucí práce:*

Ing. Jiří Jelínek, Ph.D.

Ústav mechatroniky a technické informatiky

*Konzultant práce:*

Ing. Tomáš Martinec, Ph.D.

Ústav mechatroniky a technické informatiky





## Zadání bakalářské práce

# Návrh obousměrného DC-DC měniče pro bateriové aplikace

*Jméno a příjmení:* **Jiří Němeček**  
*Osobní číslo:* M20000127  
*Studijní program:* B0714A270001 Mechatronika  
*Zadávající katedra:* Ústav mechatroniky a technické informatiky  
*Akademický rok:* **2020/2021**

### Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s problematikou DC-DC měničů.
2. Proveďte rešerši základních principů DC měničů.
3. Navrhněte obvodové řešení a realizujte plošný spoj DC-DC měniče.
4. Na zvoleném příkladě otestujte a zhodnoťte výsledky pro realizovaný prototyp DC-DC měniče.

*Rozsah grafických prací:* dle potřeby dokumentace  
*Rozsah pracovní zprávy:* 30–40 stran  
*Forma zpracování práce:* tištěná/elektronická  
*Jazyk práce:* Čeština



### **Seznam odborné literatury:**

- [1] KEITH, H. BILLINGS and TAYLOR MOREY. Switchmode power supply handbook. McGraw-Hill, New York, 3rd edition, 2011.
- [2] DOLEČEK, J. Moderní učebnice elektroniky: Optoelektronika a optoelektronické prvky. Praha: BEN, 2007. 160s. ISBN 80-7300-184-5.
- [3] WeEn Semiconductors. Dual ultrafast power diode. 2018. Rev.1.

*Vedoucí práce:* Ing. Jiří Jelínek, Ph.D.  
Ústav mechatroniky a technické informatiky  
*Konzultant práce:* Ing. Tomáš Martinec, Ph.D.  
Ústav mechatroniky a technické informatiky  
*Datum zadání práce:* 9. října 2020  
*Předpokládaný termín odevzdání:* 17. května 2021

prof. Ing. Zdeněk Plíva, Ph.D.  
děkan

L.S.

doc. Ing. Milan Kolář, CSc.  
vedoucí ústavu

V Liberci dne 9. října 2020

## Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

## Poděkování

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiřímu Jelínkovi, Ph.D. za odborné vedení, trpělivost, pomoc a rady při zpracování této práce.

Děkuji také Ing. Leoši Petržílkovi za pomoc při vyhotovení DPS.

Dále bych chtěl poděkovat své přítelkyni Veronice za trpělivost, podporu a motivaci.

V neposlední řadě bych také rád poděkoval své rodině za podporu a finanční zajištění této bakalářské práce.

## Anotace

NĚMEČEK, Jiří. Návrh obousměrného DC-DC měniče pro bateriové aplikace. Bakalářská práce na fakultě mechatroniky, informatiky a mezioborových studií Technické univerzity v Liberci. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Jelínek, Ph.d.

Cílem této bakalářské práce je návrh a zhotovení prototypu obousměrného měniče napětí a proudu pro bateriové aplikace. Hlavní část práce popisuje výběr a nastavení daného systému, výběr el. součástek měniče, konstrukty pro návrh DPS a výsledné zhodnocení funkčnosti měniče.

## Annotation

NĚMEČEK, Jiří. Design of bidirectional DC-DC converter for battery applications. Bachelor's thesis at the Faculty of Mechatronics, Informatics and Interdisciplinary Studies of the Technical University of Liberec. Thesis supervisor Ing. Jiří Jelínek, Ph.D.

The aim of this bachelor thesis is the design and fabrication of a prototype bidirectional voltage and current converter for battery applications. The main part of the work describes the selection and setting of the system, the selection of electronic components of the converter, constructs for PCB (printed circuit board) design and the final evaluation of converter functionality.

## Klíčová slova

DC/DC měnič, Buck, Boost, LT8708, PWM, měnič pro bateriové aplikace

## Keywords

DC/DC converter, Buck, Boost, LT8708, PWM, converter for battery applications

# Obsah

Návrh obousměrného DC-DC měniče pro bateriové aplikace .....	2
Prohlášení .....	4
Poděkování .....	5
Anotace.....	6
Annotation .....	6
Klíčová slova.....	6
Keywords.....	6
Obsah.....	7
Úvod .....	10
Cíle práce.....	11
Teoretická část.....	12
1 Teorie DC-DC měničů .....	12
1.1 Základní parametry .....	12
1.2 Základní pojmy .....	13
1.3 Základní Topologie.....	14
1.3.1 Měniče s lineárními prvky.....	15
1.3.2 Měniče spínání kondenzátorů.....	15
1.3.3 Měniče na principu spínání induktoru.....	15
1.3.4 Transformátorové měniče.....	19
Praktická část.....	20
2 Požadavky na návrh obousměrného DC-DC měniče .....	20
2.1 Rozsah pracovního napětí .....	20
2.2 Směr a rozsah vstupního a výstupního proudu .....	20
2.3 Spínací kmitočet .....	21
2.4 Účinnost.....	21
2.5 Obsluha .....	21
3 Výběr integrovaného řídicího obvodu.....	21
3.1 UC3843.....	21
3.2 TL494 .....	22
3.3 LT8708 .....	23
3.3.1 Dostupná pouzdra:.....	25
3.3.2 Vnitřní zapojení integrovaného obvodu LT8708 .....	26
3.3.3 Popis pinů LT8708 .....	27

4	Realizace měniče.....	31
4.1	Princip činnosti měniče .....	31
4.2	Návrh schématu měniče s LT8708 .....	32
4.2.1	Parametry navrhovaného měniče .....	32
4.2.2	Vstupní napětí .....	32
4.2.3	Výstupní napětí .....	33
4.2.4	Interní oscilátor .....	34
4.2.5	Pracovní cyklus .....	34
4.2.6	Parametry Induktoru.....	35
4.2.7	Měřicí rezistory proudu .....	36
4.2.8	Limitace proudu .....	37
4.2.9	Tepelné zatížení spínacích prvků .....	37
4.3	Režim.....	38
4.4	Výběr komponent výkonové části měniče.....	39
5	Návrh desky plošných spojů .....	41
5.1	Pravidla pro návrh desek .....	41
5.2	Volba programu pro návrh desek .....	41
5.3	Rozvržení součástek .....	41
5.4	Desky plošných spojů .....	42
6	Proces výroby DPS.....	43
6.1	Zadání do výroby.....	43
6.2	Vrtání otvorů.....	43
6.3	Výroba prokovených otvorů .....	44
6.4	Výroba filmových předloh.....	44
6.5	Kartáčování.....	44
6.6	Proces leptání vodivých cest.....	44
6.7	Nepájjivá maska.....	47
6.8	Finální úprava .....	47
6.9	Finální podoba zhotovené DPS .....	48
7	Realizace a měření DC-DC měniče .....	48
7.1	Osazování a oživení.....	48
7.2	Sepnutí a stav na prázdno .....	49
7.3	Zatěžovací charakteristiky měniče .....	49
7.4	Účinnost.....	52
8	Fotografie řídicí a silové desky DC-DC měniče .....	54
9	Výsledné parametry měniče .....	56
	Závěr.....	57



Seznam citované literatury .....	58
Seznam obrázků.....	60
Seznam tabulek.....	60
Přílohy .....	61

# Úvod

Cílem předkládané práce je zhotovení prototypu měniče napětí pro bateriové aplikace. Jedná se o Buck-Boost DC-DC stejnosměrný měnič napětí s možností omezení vstupního a výstupního proudu s možností reverzního směru proudu.

Při vybírání tématu jsem počítal s časovou náročností návrhu řídicího obvodu a také s vložením vyšší finanční částky do zhotovení zařízení. Výsledná volba, v podobě integrovaného obvodu LT8708, vychází z širokého množství možných nastavení regulace toku energie a napětí. Při dodržení vhodných parametrů lze dosáhnout velmi dobrých provozních parametrů jako je vysoká účinnost v širokém spektru regulace, kompaktní rozměry a zřetězení regulátorů (Master/Slave) pro dosažení libovolného proudu soustavy.

Hlavní motivací pro vznik této práce byla potřeba jednoduše a účinně uchovávat elektrickou energii při cestování obytným vozem, když není možné vozidlo připojit do rozvodné sítě. Vůz je vybaven dvěma solárními panely o maximálním výkonu 560W, které jsou zapojeny přes MPPT<sup>1</sup> regulátor k 12V baterii vozidla, další zdroj el. energie je 12 voltový 150 ampérový alternátor. Ve vozidle se nachází mnoho malých spotřebičů v podobě led svítidel, řídicí elektroniky spotřebičů, ventilátorů, čerpadel, ale i velkých spotřebičů jako například elektricky vyhřívané podlahové vytápění v obytném prostoru a koupelně, 2000W sinusový měnič napětí z 12DC na 230AC či malá 500W klimatizace. Díky těmto spotřebičům vzniká potřeba dodávat energii z velkokapacitního uložení (battery pack) v podobě seriovo-paralelní kombinace 18650 Li-ion článků. V battery packu se nachází zhruba 2 kw/h energie. Pro maximální a bezpečné využití musí být tyto systémy oddělné měničem napětí, který je schopný poskytnout vhodné napětí zároveň pro palubní baterii i battery pack. Při přenosu energie v konkrétním režimu musí být měnič schopen omezit maximální proud do a z regulátoru.

---

<sup>1</sup> Maximum Power Point Tracking

## Cíle práce

1. Cílem teoretické části práce je seznámení se s problematikou DC-DC měničů, uvedení základních informací o topologiích DC-DC měničů, zhodnocení nejvhodnějšího modelu systému a popis základních parametrů vybraného operačního obvodu.
2. Cílem praktické části je zhotovení elektrického schématu zapojení integrovaného obvodu a výkonové části s možností snadné diagnostiky aktuálního stavu pro ověření správné funkčnosti. Následuje návrh desky plošného spoje (DPS) s důrazem na jednoduchou montáž THT<sup>2</sup> součástek a s ohledem na možnou potřebu aktivního chlazení celého systému.
3. Zhodnocení výběru integrovaného obvodu (IO), elektrického schématu zapojení, návrhu DPS, zvolených maximálních parametrů měniče a výsledného chování v různých režimech a konkrétních stavech.
4. Návrh možných budoucích úprav pro zvýšení spolehlivosti, účinnosti, výkonových parametrů a rozměrů měniče.

---

<sup>2</sup> Through Hole Technology

# Teoretická část

## 1 Teorie DC-DC měničů

DC-DC měniče tvoří samostatnou skupinu měničů, tato skupina je velmi široká a je dána použitím konkrétního konstrukčního typu. Obecně je DC-DC měnič obvod, který zvyšuje nebo snižuje velikost vstupního stejnosměrného napětí. S rozvojem mikro elektrotechniky a stále se vyvíjejícím potřebám spotřebitelů je snaha vyvinout nové možnosti přenosu a regulace stejnosměrného proudu. Je-li potřeba dosáhnout nižšího výstupního napětí, nežli je napětí vstupní, může být tento typ měniče označován jako „BUCK“. V případě potřeby vyššího výstupního napětí je měnič označován typu „BOOST“. Kombinací těchto topologií je možno dosáhnout širokého spektra použití. [1] [2]

### 1.1 Základní parametry

Prvním zásadním kritériem měniče je výstupní výkon. Měniče konstruované pro výkony do 10W jsou obvykle navrženy tak, že se nepočítá s jejich zahříváním a jsou zpravidla „zalité“ v plastovém pouzdra, tato pouzdra mohou být navrženy k použití na DPS. Konstrukce měniče nad 500W je navržena jako samostatný přístroj, nebo jako unifikovaná deska, která slouží pro napájení konstrukčně složitějších zařízení. Při výstupním výkonu nad stovky watt až desítky kilowatt jsou měniče navrženy jako samostatné skříňové jednotky a využívají se pro regulaci či napájení velkých a výkonných zařízení jako jsou např. stejnosměrné motory, nabíjení velkokapacitních baterií apod. [1]

#### Účinnost přenosu

Parametr účinnost je definován jako ztráty při přenosu elektrické energie ze vstupní části měniče do výstupní, poměr vstupního příkonu a výstupního výkonu nám udává tento parametr. [1] [3]

$$\eta = \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} * 100 [\%]$$

*Rovnice 1 převzato z (1)*

V případě že je udána pouze jedna hodnota, jedná se o údaj při jmenovité zátěži měniče a jmenovité hodnotě vstupního napětí. [1]

#### Spínací kmitočet

Je základní hodnota kmitočtu, na kterém systém pracuje. Tento parametr může být dán pevně nebo ho lze nastavit v určitém rozsahu. [1] [3]

#### Vstupní a výstupní rozsah napětí

Je dán rozsahem mezi minimální a maximální hodnotou napětí, při kterém měnič běžně pracuje. V případě nižších nebo vyšších hodnot může dojít k proudovému nebo napěťovému přetížení a následnému poškození součástek. [1]

## Nominální hodnota vstupního a výstupní napětí

Parametr, pro který měnič vykazuje nejlepší provozní vlastnosti. Zpravidla se tato hodnota napětí používá pro testování měniče. [1]

## Maximální hodnota vstupního a výstupní přepětí

Hodnota přepětí, která udává maximální možnou úroveň, tak aby nedošlo k poškození zařízení. Bývá omezeno na určitou dobu (10-100ms). V tomto stavu nejsou zaručeny všechny provozní parametry měniče. [1]

## Minimální hodnota vstupního podpětí

Tento stav je řešen tím, že je měnič vybaven obvodem, kdy při detekci podpětí zareaguje zastavením činnosti měniče. Tato funkce měniče eliminuje proudové přetížení součástí [1]

## Vstupní proud

Je proud, který vtéká do měniče při jmenovitém vstupním napětí a jmenovitém zatížení. Pokud je tento proud zadán jako konkrétní hodnota, bere se tato hodnota jako maximální. Při překročení dojde k reakci regulační smyčky – sníží se velikost vstupního proudu. Tento jev může nastat při mírném vstupním podpětí nebo přetížení výstupní části měniče. [1]

## Výstupní proud

Je proud, který je dán zátěží. Proud může být regulován tak, že nepřekročí danou hodnotu i v případě zvýšení zátěže. U konstrukčně jednoduchých měničů se zpravidla tato hodnota přesáhnout nesmí, jinak dojde k tepelnému přetížení výkonových prvků. [1]

## Výstupní napětí

Je dáno konstrukcí měniče, napětí může být pevně dané bez možnosti změny nebo pomocí trimru je umožněno rozsah měnit. [1]

## Chlazení

Při přenosu elektrické energie dochází k zahřívání výkonových součástí. Tyto prvky jsou obvykle vybaveny přídatným chlazením v podobě hliníkového chladiče s drážkami. Těmito drážkami prochází vzduch, který odebírá tepelnou energii. Je-li potřeba zvýšit účinnost chlazení, může se rychlost proudění zvýšit přidáním ventilátoru. [1]

## 1.2 Základní pojmy

### Výstupní zvlnění

Výstupní napětí obsahuje stejnosměrnou složku, periodicky opakující se střídavé složky a šum. Základní příčina výskytu těchto nežádoucích složek tkví v periodickém spínání prvků. Tento jev lze potlačit správným návrhem filtračních prvků. [1]

## Galvanické oddělení

Galvanické oddělení je přenos energie takovým způsobem, aby vstupní a výstupní část měniče nebyla spojena vodičem, ale stále docházelo k přenosu elektrické energie. [1]

## Krátkodobá teplotní stabilita

Je dána změnou parametrů, ke kterým dochází při zapnutí měniče do doby ustálení provozní teploty. Tento parametr je udáván při jmenovitém napětí a jmenovitém zatížení při okolní teplotě 25°C. [1]

## Okolní teplota

Obvykle se jedná o teplotu vzduchu v okolí měniče. Měření této teploty je prováděno ve vzdálenosti 10 cm od povrchu měniče. [1]

## Zpětná vazba

Pro dosažení požadovaných parametrů měniče musí být zabezpečeno snímání aktuálních hodnot, které jsou porovnávány s referenčními. Nejčastěji zpětná vazba snímá napětí na daném prvku a je porovnávána s referenční hodnotou. [1]

## Plovoucí výstup

Výstup, který není napětově vázán k zemnímu vodiči. Tento jev může být dán konstrukcí např. oddělovacím transformátorem nebo regulačním prvkem. [1]

## Zemní smyčka

Existuje-li společná část vodiče pro výkonové obvody a zpětnovazební smyčky, může docházet k špatné odezvě zpětné vazby a tím k rozkmitání měniče. Z tohoto důvodu jsou zpětnovazební smyčky odděleny a spojeny jsou v jasně definovaném bodě. [1] [3]

## Soft start (měkký start)

Z hlediska vstupního zdroje či zátěže může být vhodné použití systému soft start. Omezením velikosti proudu při nabíjení kondenzátorů na výstupní straně se zvyšuje živostnost výkonových komponent. [1] [3]

## Klidový proud

Nezbytný proud odebíraný z napájecího zdroje k udržení požadované hodnoty napětí bez zatížení. Tímto parametrem nejsou vyjádřeny ztráty měničem. [1]

## 1.3 Základní Topologie

Stejnoseměrné měniče jsou založeny na mnoho možných topologiích. Zpravidla se liší možnostmi přenosu, jen některé obvody umí napětí zvyšovat, snižovat nebo obojí. Pro dosažení potřebných parametrů (za únosnou cenu) je někdy nutné vytvářet hybridní kombinace těchto obvodů. Díky rozvoji elektro mobility se vývoj těchto obvodů upřednostňuje, vznikají tak integrované obvody, které jsou schopny poskytnout široké spektrum funkcí, řeší mnoho stavů a výsledná účinnost přenosu v širokém spektru je dostatečná. [1] [4]

### 1.3.1 Měniče s lineárními prvky

Nejjednodušší typ měniče, který je využíván pro snižování napětí na hodnotu nižší, než je napětí vstupní. Tento typ měniče se nejčastěji nachází v aplikacích s nízkým výkonem, kde můžeme ztrátový výkon zanedbat anebo nám na něm nezáleží. Ztráty kompenzuje jednoduchost a spolehlivost. [1]

Základní nevýhodou těchto měničů je nemožnost zvyšovat výstupní napětí vůči vstupnímu. [1]

Výhody a nevýhody lineárních měničů od spínaných.

<b>výhody</b>	<b>nevýhody</b>
Jednoduché schéma zapojení.	Nízká účinnost přenosu.
Potlačení vlivu změny vstupního napětí.	Nutnost pasivního chlazení.
Nízký výstupní odpor.	Nemožnost zvyšování výstupního napětí nad hodnotu vstupního.
Nízký generovaný šum a odolnost vůči šumu.	Nekompaktní rozměry (potřeba použití výkonnějšího chlazení).

Tabulka 1

Tímto typem měniče se práce nezabývá a je zde uvedené jen stručné shrnutí informací.

### 1.3.2 Měniče spínání kondenzátorů

Napěťové kondenzátorové měniče neboli nábojové pumpy, jsou schopny generovat vysoké napěťové úrovně v závislosti na nízkém vstupním zatížení. Jsou vhodné především pro aplikace, které ke své činnosti využívají nízké množství energie. Tyto nábojové pumpy se vyznačují relativně jednoduchou konstrukcí a absencí malých konstrukčně složitých transformátorů nebo tlumivek, díky čemuž není možno přenášet velký objem výkonu. [1]

Základní typy: kapacitní invertor, kapacitní dělič, zvyšující a snižující měnič napětí. [1]

Tímto typem měniče se práce nezabývá a je zde uvedené jen stručné shrnutí informací.

### 1.3.3 Měniče na principu spínání induktoru

Tato bakalářská práce je zaměřena na pochopení funkce a stavbu DC-DC měniče s využitím tlumivky pro zvyšování a snižování napětí.

Tento druh měničů je nejčastěji používán v případě, kdy je kladen důraz na vysokou efektivitu přenosu. S pulzním řízením induktoru nastává problém v podobě rušení a nerovnoměrného zatížení zdroje. [1] [4]

Požadavky na vlastnosti DC-DC měniče:

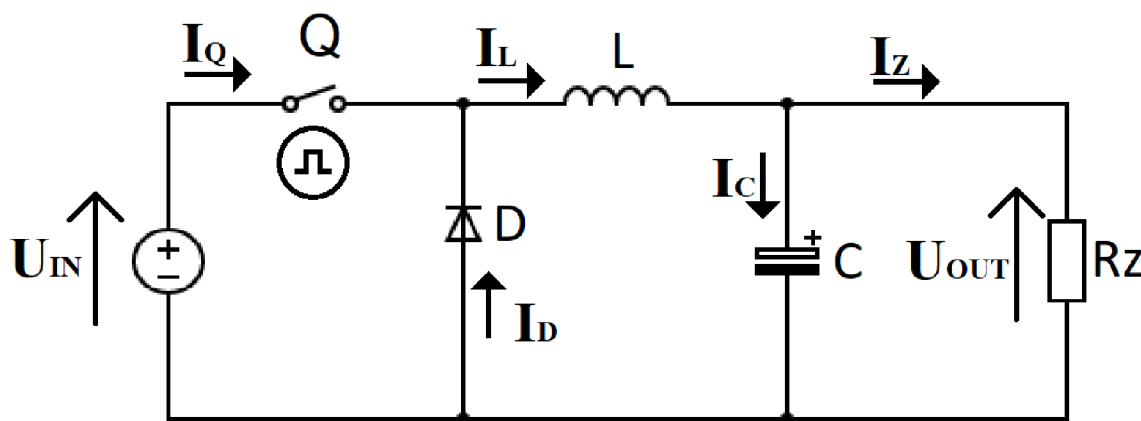
- galvanické oddělení vstupní a výstupní části
- možná změna vstupních a výstupních parametrů (rozsah vstupního a výstupního napětí, regulace proudu)
- jednosměrný nebo obousměrný tok proudu
- snížení vzájemného rušení (v případě činnosti dvou a více měničů)
- v případě paralelního zapojení více měničů zajistit časovou prodlevu mezi náběhem jednotlivých měničů [1] [4]

## Snižující měnič (BUCK) – Step DOWN

Základní neizolovaný a neinvertující měnič napětí směrem dolů. [1]

Snižující měnič má několik podob, v této práci je základní princip funkce představen na zjednodušeném schématu zapojení.

Při spuštění měniče se rovnají proudy  $I_Q$ ,  $I_L$  a  $I_C$  (kdy zanedbáme vnitřní odpor kondenzátoru), kondenzátor  $C$  se nabíjí, zvyšuje napětí a část proudu  $I_L$  se postupně rozdělí na proud  $I_Z$  a  $I_C$  až do chvíle, kdy je dosaženo požadované hodnoty napětí na zátěži a spínač  $Q$  se rozpojí. Během rozeptnutí spínače  $Q$  se otočí polarita napětí na cívce  $L$  a ta je zdrojem proudu do zátěže, který se uzavírá přes diodu  $D$ . Funkcí kondenzátoru je výstupní napětí stabilizovat, podpořit dodávaný proud do zátěže a zmírnit zvlnění napětí, z toho vyplývá, že při zvyšování kapacity kondenzátoru  $C$  dochází ke snížení zvlnění výstupního napětí. Induktor  $L$  má dva stavy: stav spotřebiče (akumuluje energii v podobě magnetického pole) a stav zdroje (zachová polaritu proudu, ale otočí se polarita napětí a přeměňuje energii naakumulovanou v magnetickém poli). [1] [2] [4]



Obrázek 1 – zjednodušené schéma měniče BUCK

Některé jednodušší měniče nemusí obsahovat induktor  $L$ , ale ty jsou vhodnější pro nižší odporové zátěže. Funkce induktoru je zde ve vyhlazení proudu, aby nedocházelo k proudovým rázům při nabíjení kondenzátoru  $C$ . [1]

Výhody tohoto zapojení tkví ve snadném návrhu, jednoduchém zhotovení a nízké ceně, nevýhody v nemožnosti galvanicky oddělit výstupní obvod od vstupního. Při případném zvýšení zátěže nad nominální hodnotu nebo zkratu na výstupu může dojít k proudovému



přetížení a tím poškození spínacího prvku. Rozsah spínací střídy se může pohybovat v rozmezí od nuly do 100%, tj. v celém rozsahu. [1] [4]

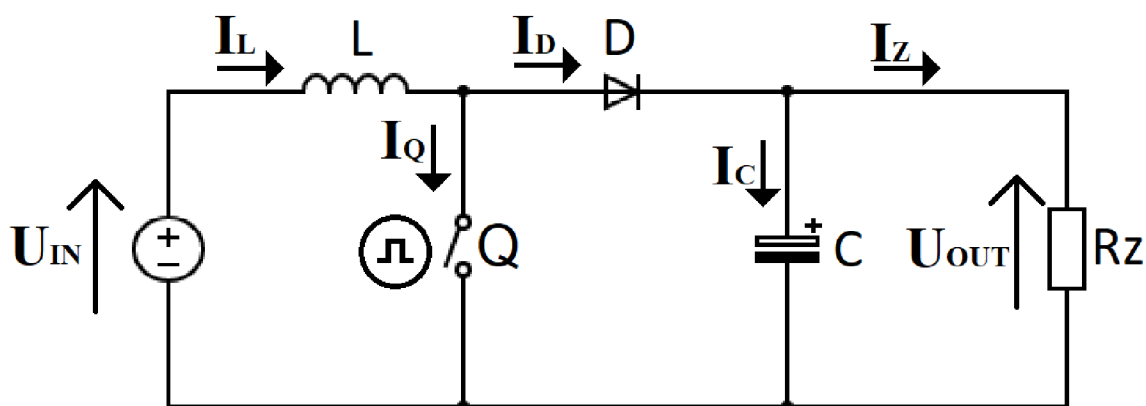
Tyto jednoduché měniče se obvykle konstruují do výstupního proudu 10A. Ve složitějších aplikacích mohou být měniče vybaveny snímáním proudu a řídicí obvod může být vybavený obvodem, který chrání výkonovou část měniče proti přetížení. Tyto složitější a vyspělejší obvody se mohou konstruovat pro vyšší zatížení v řádech desítek až stovek Ampér. Pro takto vysoké výkony už se nejedná o jeden výkonový člen (tranzistor, dioda, kondenzátor, induktor), ale dochází k zřetězení součástek (paralelní zapojení), kdy je kladen důraz na výběr co možná nejpodobnějších parametrů součástek, zejména u spínacích prvků a induktorů. Jestliže by se parametry lišily více nežli je předepsáno normou, docházelo by k nerovnoměrnému zatížení jednotlivých komponent a ke zhoršení výstupních parametrů nebo také k poškození. [1]

Pro tento druh topologie mohou být zvoleny i jiná schémata zapojení, která se přizpůsobují potřebám konkrétního návrhu měniče. [4]

## Zvyšující měnič (BOOST) – Step UP

Na obrázku níže je základní zapojení neizolovaného a neinvertujícího měniče napětí směrem nahoru. Toto schéma lze označit jako nepřímý měnič přenosu vstupní energie na výstupní. Využívá se zde akumulace energie do magnetického pole induktoru. [1] [2] [4]

Při sepnutí měniče dochází ke zvyšování proudu induktoru a proudy  $I_L$ ,  $I_D$  a  $I_C$  jsou si rovny, spínač  $Q$  je v rozepnutém stavu. Postupně dochází k nabití kondenzátoru  $C$  a tím klesá proud  $I_C$  k nule a proud  $I_Z$  se rovná  $I_L$  a  $I_D$ . Během sepnutí spínače  $Q$  dojde ke „zkratu“ induktoru  $L$  a proud  $I_L$  lineárně vzrůstá, zvyšuje se energie magnetického pole induktoru  $L$ . Při rozepnutí spínače  $Q$ , dojde ke změně polarizace napětí na cívce  $L$  čímž se z ní stane zdroj napětí a zachovává se směr toku proudu. Součet napětí zdroje  $U_{IN}$  a  $U_L$  je vyšší než napětí  $U_{OUT}$  a napětí na diodě  $U_D$  a ta přechází do vodivého stavu, proud v této fázi protéká skrz zdroj napětí  $U_{IN}$ , induktor  $L$ , diodu  $D$  a akumuluje se do kondenzátoru  $C$ , částečné množství proudu teče do zátěže  $R_Z$ . Při sepnutém spínači  $Q$  je proud do zátěže dodáván z kondenzátoru  $C$ , při vybití dochází ke snižování proudu a napětí na zátěži  $R_Z$ . [1]



Obrázek 2 – zjednodušené schéma měniče BOOST

Pro tento druh topologie mohou být zvolena i jiná schémata zapojení, která se přizpůsobují potřebám konkrétního návrhu měniče. [4]

## Zvyšující a snižující měnič „CUK“ (BUCK-BOOST) – Step UP and DOWN

Kombinací topologie snižujícího a zvyšujícího měniče dostaneme tzv. BUCK-BOOST měnič, který umožňuje výstupní napětí jak snižovat, tak zvyšovat. Tento typ měniče je vhodný pro aplikace, kde vstupní napětí kulminuje okolo napětí výstupního, tedy pokud je zapotřebí napětí zvyšovat nebo snižovat, aby bylo docíleno potřebného výstupního napětí. Nejčastěji se tento regulátor nachází u bateriových aplikací, kde je požadavek stálého trvalého výstupního napětí, například nominální hodnota napětí baterie. [1] [2]

Princip funkce je nutné rozdělit do několika stavů:

**1)  $U_{OUT} = U_{IN} - U_D$**

V tomto stavu bude trvale sepnut spínač Q1 a v ustáleném stavu jsou si proudy  $I_L$ ,  $I_D$  a  $I_Z$  rovny. [1]

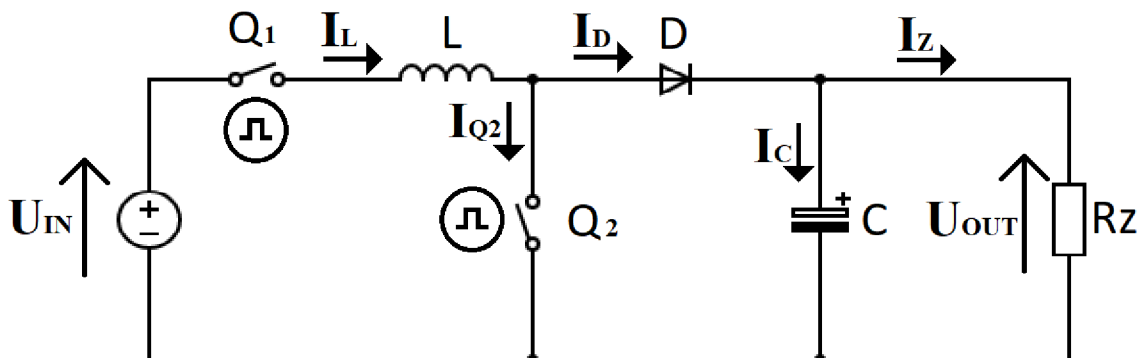
**2)  $U_{OUT} < U_{IN} - U_D$**

Stav, kdy bude výstupní napětí nižší než napětí vstupní mínus napětí na diodě. V tomto intervalu figuruje pouze spínač Q1, který spíná střidu, jež odpovídá požadovanému výstupnímu napětí. [1]

**3)  $U_{OUT} > U_{IN} - U_D$**

V případě že je požadavek napětí na výstupu vyšší než napětí  $U_{IN} - U_D$ , je spínač Q1 trvale sepnut. Spínač Q2 je využíván k nabíjení induktoru a princip funkce odpovídá popisu měniče typu BOOST. [1]

Zjednodušené schéma zapojení neizolovaného měniče, který umí snižovat i zvyšovat výstupní napětí.



Obrázek 3 – Zjednodušené schéma zapojení neizolovaného měniče BUCK BOOST

Pro tento druh topologie mohou být zvolena i jiná schémata zapojení, která se přizpůsobují potřebám konkrétního návrhu měniče. [1] [2]

### 1.3.4 Transformátorové měniče

Některé aplikace mohou vyžadovat galvanické oddělení výstupního napětí od vstupního. V některých případech může být požadováno více vzájemně galvanicky izolovaných výstupů. Tento druh měniče je také uplatňován v případech, kdy je vstupní napětí násobně nižší než napětí požadované. Vlastnost galvanicky oddělených obvodů je dosažena použitím transformátoru, který se skládá ze dvou nebo více vinutí, navinutých na magnetickém obvodu. Konstrukční velikost transformátoru je dána velikostí přenášeného proudu a frekvencí. Jestliže se jedná o aplikaci s vysokou frekvencí spínání, výsledná indukčnost je v řádech mH až  $\mu\text{H}$ . Nízká indukčnost umožňuje použití feromagnetického obvodu. Díky těmto vlastnostem je dosaženo kompaktních rozměrů měniče a požadovaných provozních vlastností. [1] [2]

# Praktická část

Praktická část práce je zaměřena na výběr vhodné topologie měniče, konkrétního řídicího integrovaného obvodu a na návrh schématu zapojení pro dosažení požadovaných provozních vlastností.

Součástí praktické části je zhotovení a ověření vlastností měniče.

## 2 Požadavky na návrh obousměrného DC-DC měniče

V následující části jsou popsány požadavky, podle kterých bude měnič navrhován a konstruován. Tyto požadavky jsou ilustrativního typu a skutečný měnič se může s návrhem lišit.

### 2.1 Rozsah pracovního napětí

Rozsah konkrétního pracovního napětí je dán vstupní olověnou baterií s tekutým elektrolytem, na které se běžné napětí pohybuje v rozmezí 10,5 až 15V.

Sekundární typ úschovy energie je v podobě 4S Li-ion článků. Pracovní rozsah je větší než u klasické baterie, napětí na článku se pohybuje v rozmezí zhruba 3,0V až 4,2V. V tomto konkrétním případě se zde nachází kombinace 4S, což značí 4 články zařazené v sérii, výsledné napětí se tedy pohybuje v rozmezí 12,0V - 16,8V. Tyto krajní hodnoty jsou z hlediska dlouhodobé životnosti nevhodné a výsledné napětí je zvoleno mezi 12,8 až 16,5V. Tyto články obsahují BMS<sup>3</sup>, který se snaží hlídat jednotlivé články tak, aby nedošlo k dlouhodobému nadměrnému přetěžování. [5]

### 2.2 Směr a rozsah vstupního a výstupního proudu

Směr kladný nebo záporný bude volen operátorem, který rozhodne, zda měnič bude dodávat energii z Li-ion článků směrem do autobaterie nebo přebytečnou energii bude akumulovat do Li-ion článků.

Rozsah regulace vstupního a výstupního proudu musí být velmi komplexní. Je nutné zaručit omezení vstupního a výstupního proudu v obou směrech v různých fázích činnosti, aby nedocházelo k přetěžování výkonových prvků. Spolu s tím je žádoucí rychlá reakce na tyto proudové změny.

---

<sup>3</sup> Battery Management System

Rozsahy povolených trvalých proudů se volí pomocí trimru od minimální přednastavené hodnoty po maximální. Změna rozsahu bude umožněna pomocí použití vhodného nástroje. Tyto možnosti změny nebudou operátorovi zpřístupněny.

## 2.3 Spínací kmitočet

Při návrhu měniče je důležité zvolit správnou spínací frekvenci. Tento parametr nepřímo ovlivňuje velikost měniče. Při zvolení příliš nízké frekvence je nutné návrh výkonové části navrhnout tak, aby zvlnění proudu a napětí bylo v přijatelných mezích, což vede k použití induktoru s vysokou indukčností a kondenzátorů s vysokou kapacitou. Při zvolení příliš vysoké frekvence se negativně projevují spínací možnosti tranzistorů, a to vede ke zvýšení tepelných ztrát. Taktéž dochází k vyzařování elektromagnetického rušení do okolí.

Rozsah spínacího kmitočtu 40kHz až 400 kHz.

Tento rozsah eliminuje slyšitelnost spínání a zároveň neklade vyšší nároky na odrušení. Benefitem vyšší frekvence je možnost využití induktorů s nižší indukčností a tím redukce její velikosti a zároveň redukce velké kapacity kondenzátorů pro vyhlazení vstupního a výstupního napětí.

## 2.4 Účinnost

Účinnost měniče je dána poměrem výstupního výkonu ku vstupnímu příkonu. Rozdílem příkonu a výkonu je dán ztrátový výkon. Jedním z cílů je tento parametr omezit. Vznik těchto ztrát je dán součtem nejpodstatnějších ztrát spínáním polovodičových prvků, přechodového odporu spínacích prvků, vnitřního odporu induktoru, ztráty vířivými proudy magnetického obvodu, odporem vodivých cest DPS, svodového proudu kondenzátoru, odporem měřících rezistorů atd.

## 2.5 Obsluha

Při návrhu je brán zřetel na možnosti obsluhy operátora. Požadavek na semi-automatický režim, který pro svou funkci nepotřebuje trvale operátora. Operátor zde pouze rozhodne o směru toku energie, a o tom, zda má být měnič aktivní či neaktivní. Provozní parametry měniče lze měnit pouze v servisním módu, který nebude uživateli zpřístupněn.

# 3 Výběr integrovaného řídicího obvodu

## 3.1 UC3843

Obvod UC3843AN je jednoduchý integrovaný obvod, který je speciálně navržený pro jednoduché typy měniče typu BOOST. Podporuje regulaci konstantního napětí. [6] [7]

#### PARAMETRY:

- rozsah pracovního napětí se pohybuje v rozmezí 10 až 30V
- klidový proud nižší než 1mA
- analogové vstupy:
  - PIN2 = zpětná vazba výstupního napětí
  - PIN3 = zpětná vazba měřeného proudu
- možnost změny výstupního napětí (dáno návrhem daného měniče) [6] [7]

#### VYUŽITÍ:

DC-DC konvertor typu BOOST, regulátor výstupního stabilizátoru napětí zálohové baterie. [6] [7]

<b>výhody</b>	<b>nevýhody</b>
Vysoká efektivita.	Absence více interních zesilovačů.
Nízký klidový proud.	Konstruované pro nižší výkony.
Vysoká spínací frekvence.	Vhodné spíše pro typ BOOST.
Vhodné pro bateriové aplikace.	Pro dosažení potřebných parametrů, složitá konstrukce řídicího obvodu.
Pouzdra THT, SMT.	

Tabulka 2

Tento typ integrovaného obvodu nesplňuje potřebné parametry pro stavbu požadovaného měniče a je tedy nevhodný. Konstrukce by vyžadovala složité zapojení, u kterého není zaručeno výsledné požadované chování.

## 3.2 TL494

Obvod TL494 je monolitický integrovaný obvod speciálně navržený pro měniče typu BOOST s regulací výstupního proudu. Podporuje regulaci konstantního napětí a konstantního proudu. [8]

#### PARAMETRY:

- rozsah pracovního napětí se pohybuje v rozmezí 8,5 až 42V
- klidový proud 7mA
- dvě nezávislé formy regulace
  - regulace výstupního napětí
  - regulace výstupního proudu
- rozsah frekvence oscilátoru 40-200kHz
- při vhodném návrhu možnost regulace výstupního proudu a napětí
- dva interní zesilovače [8]

#### VYUŽITÍ:

DC-DC konvertor typu BOOST s přímou možností regulace výstupního proudu, regulátor výstupního stabilizátoru napětí zálohové baterie. [8]

<b>výhody</b>	<b>nevýhody</b>
Rozsah pracovního napětí 42V.	Nedokonalý způsob řízení proudu.
Vysoká účinnost přenosu.	Pouze jeden směr proudu.
Možné zřetězení řídicích obvodu (Master/Slave) pro dosažení vysokého přenosového výkonu a požadovaných vlastností.	Pro dosažení potřebných výstupních parametrů je zapotřebí další IO.
Pouzdra THT, SMT.	

Tabulka 3

Integrovaný obvod TL494 není vybaven potřebným množstvím interních zesilovačů. Výsledné schéma by bylo nutné rozdělit do několika skupin obvodů, kombinací těchto obvodů by vznikla potřebná logika přenosu. Pro dosažení požadovaných vlastností měniče je nutné IO řídit nadřazeným řídicím obvodem, který by vyhodnocoval následné stavy. Tato koncepce je příliš nevhodná a její odladění zbytečně složité.

### 3.3 LT8708

Obvod LT8708 je monolitický integrovaný obvod, speciálně navržený pro použití v aplikaci, která vyžaduje obousměrnou regulaci proudu v závislosti na vstupním a výstupním napětí. Tuto logiku přenosu lze vhodným návrhem upravovat pro konkrétní potřeby dané aplikace. Obvod je vhodný jak pro zvyšování, tak snižování výstupního napětí vůči vstupnímu. V režimu reverzního toku proudu umožňuje dosažení stejných výkonových parametrů. [3]

#### PARAMETRY:

- rozsah pracovního napětí se pohybuje v rozmezí 2,8 až 80V
- šest nezávislých forem regulace
  - regulace vstupního proudu v kladném i reverzním směru proudu
  - regulace výstupního proudu v kladném i reverzním směru proudu
  - vstupní a výstupní napětí v kladném i reverzním směru
- možnost změny módu a směru toku v jakémkoliv okamžiku
- pouze jeden induktor pro přenos proudu ze vstupu na výstup a opačně [3]

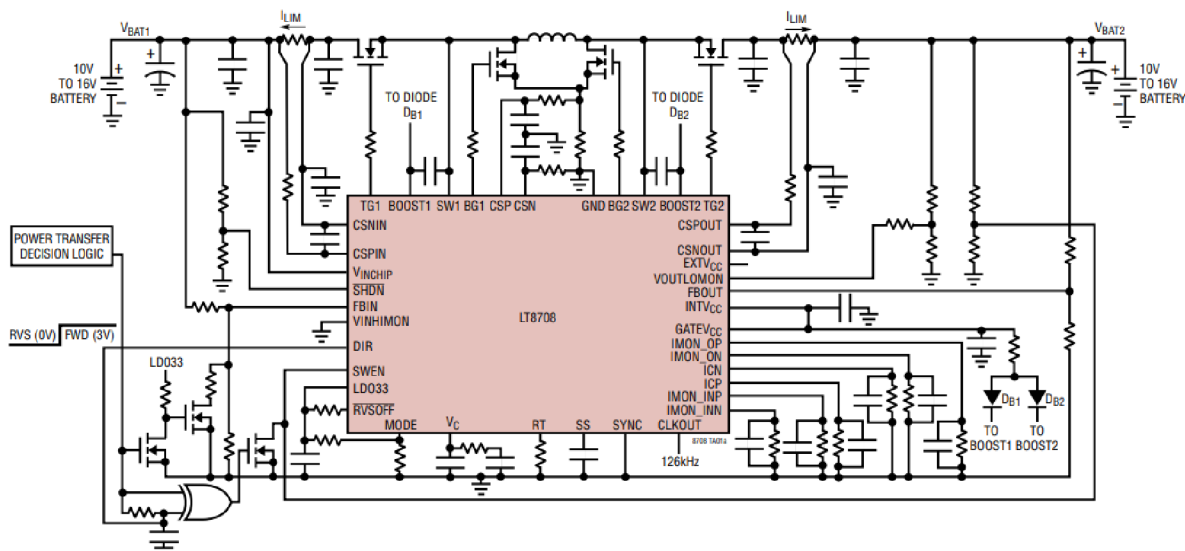
#### VYUŽITÍ:

- automotive, telecom, výkonové bateriové systémy, solární technika [3]

<b>výhody</b>	<b>nevýhody</b>
Široké možnosti nastavení vlastností.	Složitější návrh obvodu a realizace.
Proudové omezení ve všech možných stavech.	Vyšší výrobní náklady.
Využití jednoho induktoru pro oba směry proudu.	Absence THT pouzdra.
Rozsah pracovního napětí 2,8-80V.	
Vysoká účinnost přenosu.	
Možné zřetězení řídicích obvodů (Master/Slave) pro dosažení vysokého přenosového výkonu a požadovaných vlastností měniče.	

Tabulka 4 – parametry IO LT8708

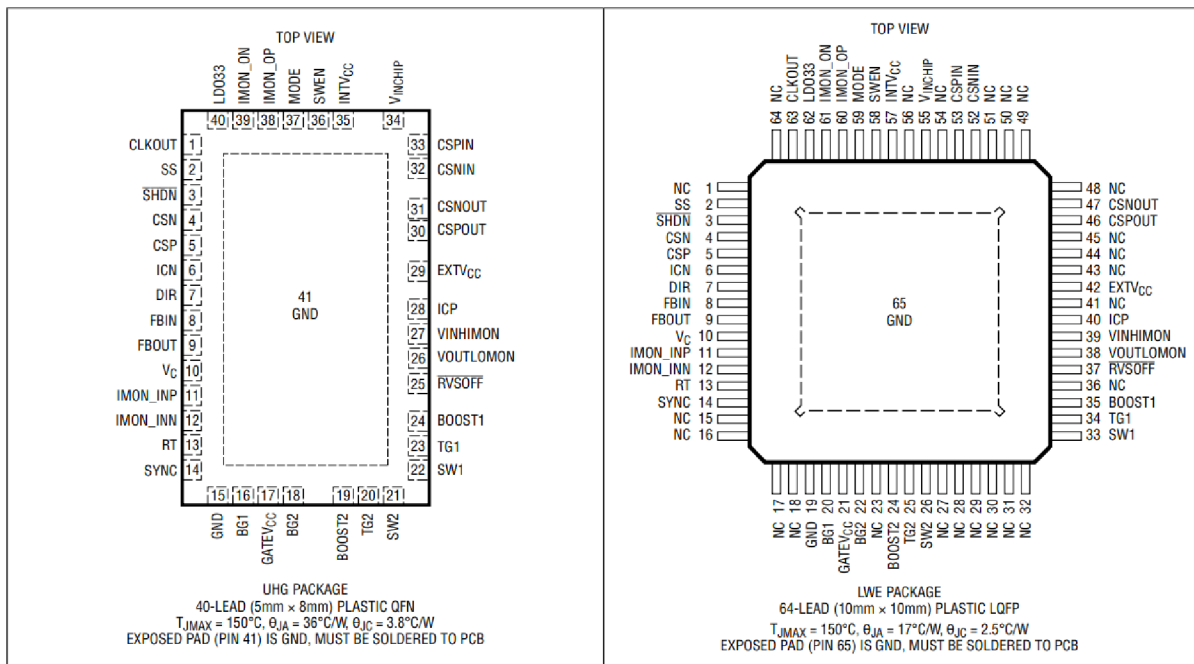
Na obrázku níže je zjednodušené schéma s obvodem LT8708 pro bateriové aplikace. Tento typ IO odpovídá potřebným parametrům pro požadované vlastnosti měniče.



Obrázek 4 – Zjednodušené schéma s využitím LT8708 (převzato z [3])

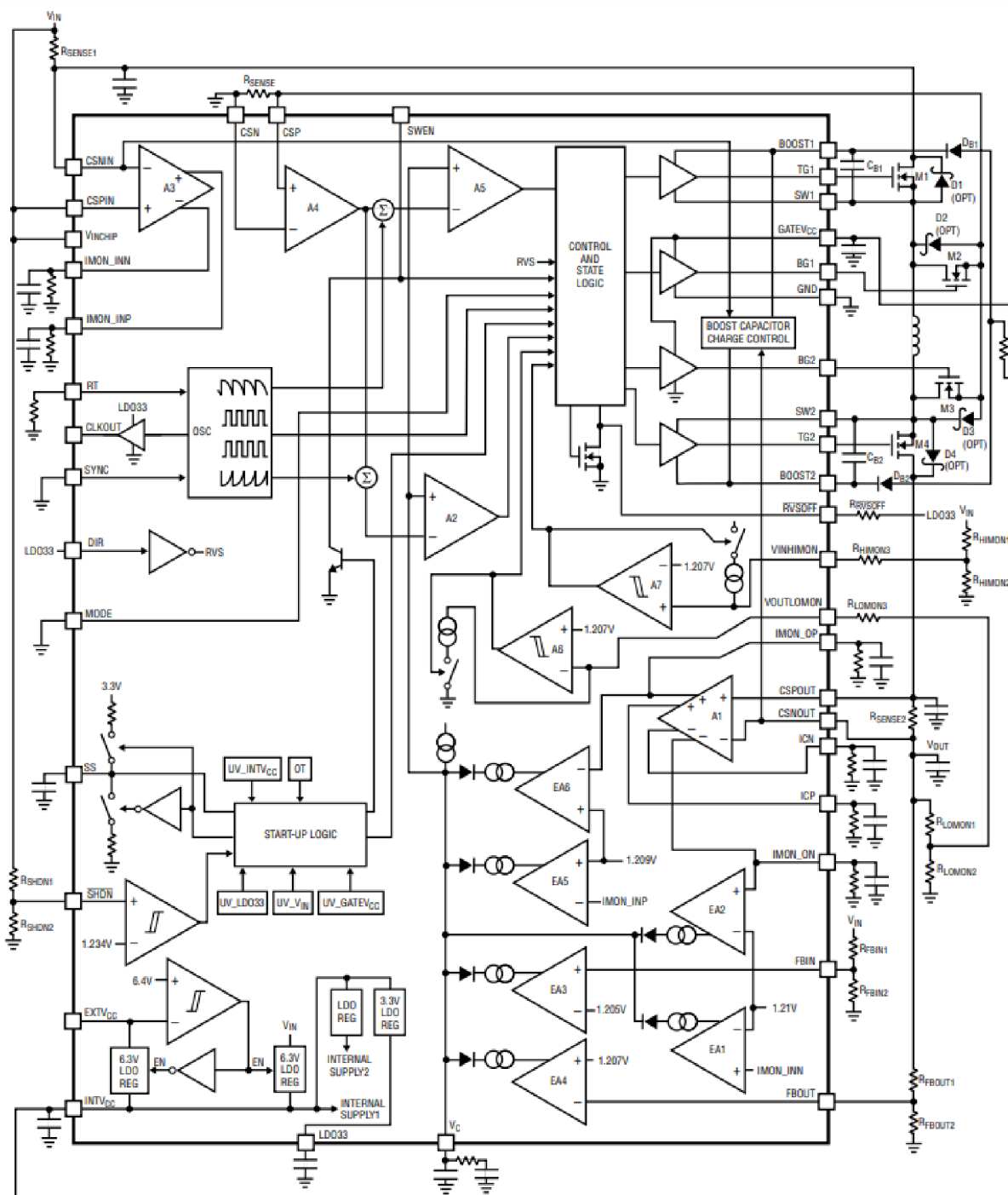


### 3.3.1 Dostupná pouzdra:



Obrázek 5 dostupná pouzdra IO LT8708 (převzato z [3])

### 3.3.2 Vnitřní zapojení integrovaného obvodu LT8708



Obrázek 6 vnitřní zapojení IO LT8708 (převzato z [3])

### 3.3.3 Popis pinů LT8708

#### CLKOUT (PIN1/PIN63)

- Výstup hodinového signálu. Používá se pro synchronizaci jednoho nebo více kompaktních integrovaných obvodů. Tento pin lze použít jako teplotní monitor, protože pracovní cyklus se lineárně mění s teplotou.

#### SS (PIN2/PIN2)

- Nastavení měkkého startu měniče. Pro dosažení vhodné funkce je za potřeby umístění alespoň 220nF, po spuštění bude kondenzátor nabit na 3,3V.

#### SHDN (PIN3/PIN3)

- Vypínací pin, je nutné zapojit pull up rezistor na pin LDO33, uzemněním tohoto pinu se obvod vypne.

#### CSN (PIN4/PIN4)

- Záporný vstup zesilovače snímače proudu induktoru a komparátoru k detekci DCM.

#### CSP (PIN5/PIN5)

- Kladný vstup zesilovače snímače proudu induktoru a komparátoru k detekci DCM.
- Napětí pinu  $V_c$  společně s CSP a CSN ve spojení s hodnotou RSENSE nastavují prahovou hodnotu proudu induktoru.

#### ICN (PIN6/PIN6)

- Monitor negativního záporného proudu  $I_{OUT}$ .
- Prahová hodnota proudu je 20  $\mu A$ .

#### DIR (PIN7/PIN7)

- Při připojení k pinu LDO33 dochází k toku proudu z  $V_{IN}$  do  $V_{OUT}$ .
- Uzemněním tohoto pinu dojde k toku proudu z  $V_{OUT}$  do  $V_{IN}$ .
- Jestliže je MODE nastaven na provoz DCM (režim nepřerušovaného vedení) nebo HCM (režim hybridního vedení) jinak je tento pin ignorován.

#### FBIN(PIN8/PIN8)

- Pin zpětné vazby  $V_{IN}$ .
- Slouží k detekci a regulaci nízkého napětí  $V_{IN}$ .

#### FBOU(PIN9/PIN9)

- Pin zpětné vazby  $V_{OUT}$ .
- Slouží k detekci a regulaci vysokého napětí  $V_{OUT}$ .

#### $V_c$ (PIN10/PIN10)

- Chybový pin výstupního zesilovače.

#### IMON\_INP(PIN11/PIN11)

- Záporný vstup zesilovače pro nastavení kladného vstupního proudu  $I_{IN}$ .
- Tento pin je využit k omezení maximálního proudu  $I_{IN}$ .
- Pokud proud pinu překročí  $20\mu A$ , IO začne přizpůsobovat (regulovat) velikost kladného proudu.

#### IMON\_INN(PIN12/PIN12)

- Kladný vstup zesilovače pro snímání reverzního proudu  $I_{IN}$ .
- Tento pin je využit k omezení maximálního reverzního proudu  $I_{IN}$ .
- Pokud proud pinu překročí  $20\mu A$ , IO začne přizpůsobovat (regulovat) velikost reverzního proudu.

#### RT(PIN13/PIN13)

- Upravuje spínací frekvenci, umístěním rezistoru mezi tento pin a zem.
- Tento pin musí být zapojený.

#### SYNC(PIN14/PIN14)

- V případě potřeby synchronizace spínací frekvence s vnějšími hodinami.
- Snížením napětí pod  $0,5V$  dojde k aktivaci interního časování.

#### BG1, BG2(PIN16/PIN20, PIN18/PIN22)

- Výstup pro ovládání N-kanálových MOSfet tranzistorů, které v sepnutém stavu nabíjí hlavní induktor L.

#### GATEV<sub>cc</sub> (PIN17/PIN21)

- Napájení pro MOSfet tranzistory, které v sepnutém stavu nabíjí hlavní induktor L.

#### BOOST1, BOOST2 (PIN24/PIN35, PIN19/PIN24)

- Zvyšuje napětí zdroje pro ovládání.
- K pinu BOOST1 se připojuje pomocí diody GATEV<sub>cc</sub> a kondenzátor mezi pin SW1 a BOOST1.
- K pinu BOOST2 se připojuje pomocí diody GATEV<sub>cc</sub> a kondenzátor mezi pin SW2 a BOOST2.

#### TG1, TG2 (PIN23/PIN34, PIN20/PIN25)

- Výstup pro ovládání N-kanálových MOSfet tranzistorů, které v sepnutém stavu řídí množství dodaného proudu do induktoru L.

#### SW1, SW2 (PIN22/PIN33, PIN21, PIN26)

- Bod schématického zapojení výkonových přepínačů pro regulaci proudu induktoru.
- Připojení záporných výstupů kondenzátorů BOOST.

#### RVSOFF (PIN25/PIN37)

- Jedná se o vstup/výstup s otevřeným kolektorem, který vyžaduje pull up rezistor.
- Uzemněním deaktivujeme průchod reverzního proudu.

#### VOU\_TLOMON (PIN26/PIN38)

- Monitoring nízkého stavu výstupního napětí, lze nastavit minimální úroveň napětí na výstupu.
- Jestliže je  $V_{OUT}$  nižší než tato úroveň, je reverzní chod deaktivován, při dosažení limitní hodnoty napětí je reverzní chod znovu aktivován.

#### VINHIMON (PIN27/PIN39)

- Monitoring vysokého stavu vstupního napětí, lze nastavit maximální úroveň napětí na vstupu.
- Jestliže je  $V_{IN}$  nižší než tato úroveň, je reverzní chod deaktivován.

#### ICP (PIN28/PIN40)

- Kladný vstup integrovaného obvodu pro snímání výstupního proudu  $I_{OUT}$ .
- Pokud proud pinu překročí  $20\mu A$ , IO začne přizpůsobovat (regulovat) napětí na výstupu.

#### EXTV<sub>CC</sub> (PIN29/PIN42)

- Externí napájecí vstup.
- Jestliže pin překročí 6,4V, INTV<sub>CC</sub> bude napájeno z tohoto pinu, v opačném případě bude napájen z VINCHIP.

#### CSPOUT (PIN30/PIN46)

- Kladný vstup zesilovače integrovaného obvodu pro snímání na měřícím rezistoru výstupního proudu.
- Při absenci měření výstupního proudu tento vstup zapojit na  $V_{OUT}$ .

#### CSNOUT (PIN31/PIN47)

- Záporný vstup zesilovače integrovaného obvodu pro snímání na měřícím rezistoru výstupního proudu.
- Při absenci měření výstupního proudu tento vstup zapojit na  $V_{OUT}$ .

#### CSNIN (PIN32/PIN52)

- Kladný vstup zesilovače integrovaného obvodu pro snímání na měřícím rezistoru vstupního proudu.
- Při absenci měření výstupního proudu tento vstup zapojit na  $V_{IN}$ .

#### CSPIN (PIN33/PIN53)

- Záporný vstup zesilovače integrovaného obvodu pro snímání na měřícím rezistoru vstupního proudu.
- Při absenci měření výstupního proudu tento vstup zapojit na  $V_{IN}$ .

#### VINCHIP (PIN34/PIN55)

- Hlavní napájecí vstup pro LT8708.
- Musí být odrušen filtrovacím kondenzátorem.

#### INTVcc (PIN35/PIN57)

- Když je napětí EXTVcc vyšší než 6,4V, tento pin je z něj napájen, jinak je napájen z pinu VINCHIP.
- K pinu musí být připojen keramický kondenzátor 4,7  $\mu$ F.

#### SWEN (PIN36/PIN58)

- (ENABLE PIN).
- Připojením k pinu pull up rezistoru bude umožněno spínání.
- Uzemněním pinu dojde k vypnutí.

#### MODE (PIN37/PIN59)

- Volba módu.
- Režim kontinuálního vedení (CCM), pin < 0,4 V.
- Režim hybridního vedení (HCM), pin - 0,8 V až 1,2 V.
- Režim nespojitého vedení (DCM), pin - 1,6 V až 2,0 V.
- Režim Burst Mode, pin = více než 2,4 V.

#### IMON\_OP (PIN38/PIN60)

- Kladný vstup zesilovače integrovaného obvodu pro nastavení výstupního proudu.
- Pokud proud pinu překročí 20 $\mu$ A, IO začne přizpůsobovat (regulovat) velikost kladného výstupního proudu.

#### IMON\_ON (PIN39/PIN61)

- Negativní vstup zesilovače integrovaného obvodu pro nastavení reverzního výstupního proudu.
- Pokud proud pinu překročí 20 $\mu$ A, IO začne přizpůsobovat (regulovat) velikost reverzního výstupního proudu.

#### LDO33 (PIN40/PIN62)

- Výstup regulátoru 3,3V.
- K pinu musí být připojen keramický kondenzátor alespoň 0,1 $\mu$ F.

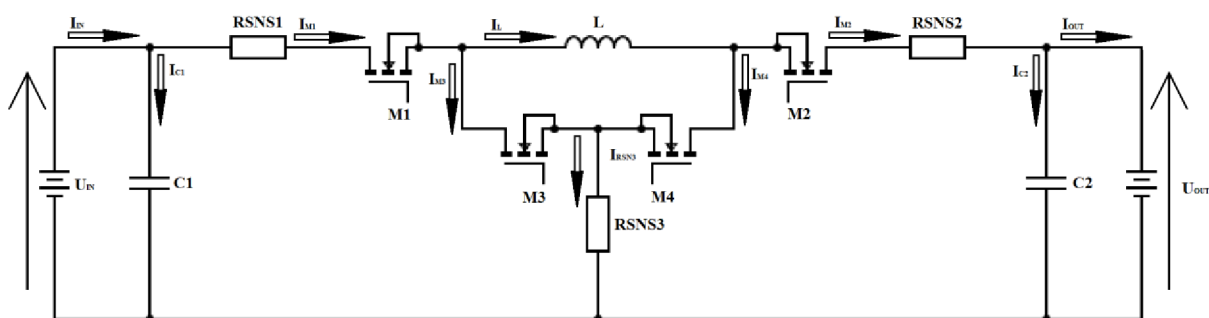
#### GND (PIN15/PIN19, Exposed Pad PIN41/PIN65)

- Nastavovací zem a uzemnění [3]

## 4 Realizace měniče

### 4.1 Princip činnosti měniče

Aby bylo dosaženo maximální možné účinnosti, je nutné spínací prvky spínat tzv. PWM<sup>4</sup> signálem, čímž jsou eliminovány ztráty přechodu spínacích prvků. Popis činnosti lze rozdělit do čtyřech stavů. Jedním ze základních stavů je stav nečinnosti, kdy napětí přivedené na spínací prvky je nulové, tento stav může být požadován obsluhou. Ke stavu nečinnosti dojde v případě, je-li vstupní napětí nižší než požadovaná minimální hodnota, v případě výstupního napětí dosáhne-li nebo překročí požadovanou hodnotu. [1] [3]



Obrázek 7 – zjednodušené schéma navrhovaného obvodu

Jestliže je  $U_{IN} > U_{IN,MIN,FWD}$  a zároveň  $U_{OUT} = U_{OUT,MIN,FWD}$  dojde k sepnutí spínače M1 a přivedení vstupního napětí k cívce L. Sepnutím spínače M4 dochází k lineárnímu zvýšení proudu induktoru L. Energie je akumulována v podobě magnetického pole induktoru, která se chová jako spotřebič. Při rozpojení M4 dochází ke změně polarity induktoru L, napětí  $U_{IN}$  se sčítá s napětím  $U_L$ , v případě  $U_{IN}+U_L > U_{OUT}+U_{M2}$  dojde k přenosu přebytečné energie naakumulované v induktoru L do zátěže a výstupního kondenzátoru C2. Tento stav se nazývá BOOST, dochází ke zvyšování výstupního napětí vůči vstupnímu. [3]

Jestliže nastane stav  $U_{IN} > U_{OUT}+U_{M1}+U_{M2}$ , dochází k sepnutí spínače M2 a zároveň k navyšování proudu induktorem až do stavu limitační hodnoty  $I_{IN,FWD,MAX}$  nebo  $I_{OUT,FWD,MAX}$ , dále se aktivuje periodické spínání spínače M1. Při sepnutí spínače M1 se zvýší protékající proud  $I_L$ , a tím je akumulována energie magnetického pole induktoru L. Rozepnutím spínače M1 se změní polarita induktoru L, zároveň je sepnut spínač M3, který obvod uzavře a proud  $I_L = I_{C2} + I_{OUT}$ . Tento stav je nazván BUCK, výstupní napětí se sníží vůči vstupnímu. [3]

Poslední stav je stav reverzní. Podmínka nutná pro tento přenos energie je přivedení příslušného napětí na pin DIR<0,4V, tuto podmínku zajišťuje operátor. Při splnění této podmínky následuje porovnání vstupního napětí  $U_{IN}$  s požadovanou maximální hodnotou a zároveň napětí výstupní je vyšší než limitační hodnota, dojde k sepnutí spínače M1. Při sepnutí spínače M2 dojde k lineárnímu zvýšení proudu induktoru  $I_L$  až k limitační hodnotě proudu vstupního nebo výstupního proudu. Při dosažení této hodnoty, spínač M2 je vypnut a zároveň je sepnut spínač M4, přes který se uzavře a vybijí induktor L. [3]

<sup>4</sup> Pulse Width Modulation

Pro ověření skutečností byl využit simulační program Falstad, pomocí kterého byla ověřena teorie pro pochopení vzájemných souvislostí měniče. Výhoda použití simulačního programu tkví v orientační představě chování realizovaného měniče. Pomocí několika situačních schémat (zpravidla se jednalo o mezní hodnoty napětí a proudu), byly ověřeny požadované parametry měniče. Jednalo se o zjednodušená schémata, pro která byl zanedbán například faktor typu nerovnoměrného vstupního odporu a tím dána „tvrdost“ zdroje, výrazně vyskytující šum vstupního napětí a dále například neměnící se parametry přenosových členů (nezávislé na teplotě). Toto složitě odhadované chování komponent je nutné ověřit při výsledném zhotovení.

## 4.2 Návrh schématu měniče s LT8708

### 4.2.1 Parametry navrhovaného měniče

- rozsah vstupního napětí 10,8-15,5V  
pracovní rozsah vstupního napětí při přenosu kladného směru proudu 13-15,5V
- vstupní napětí při přenosu reverzního směru proudu 12,6±0,1V
- rozsah výstupního napětí 12,8-16,8V  
pracovní rozsah výstupního napětí při přenosu kladného a reverzního směru proudu 13,2-16,5V
- kladný přenosový proud na výstupní straně  $I_{OUTMAX(FWD)}$  20A
- reverzní přenosový proud na vstupní straně  $I_{INMAX(RVS)}$  25A
- operátorem přepínaný směr proudu (mód DCM)

### 4.2.2 Vstupní napětí

Vstupní napětí, kdy má začít docházet k přenosu energie kladným směrem je 13±0,1V.

Vstupní napětí měniče se nastavuje pomocí odporového děliče, který se připojuje k pinu FBIN. Tento pin je porovnáván s napětíovou referencí 1,207V. Pro nastavení vstupního napětí 13V je zvolen rezistor  $R_{2_{FBIN}}$  887Ω a rezistor  $R_{1_{FBIN}}$  podle rovnice se rovná 8,67kΩ, nejbližší možný rezistor je 8,66kΩ. S tímto rezistorem vychází vstupní napětí zhruba na 12,99V, což je stále v rozsahu žádaného vstupního napětí. [3]

$$R_{1_{FBIN}} = \left( \frac{V_{OUT}}{1,207V} - 1 \right) * R_{2_{FBIN}} = \left( \frac{13}{1,207V} - 1 \right) * 887 = 8,67k\Omega = (8,66k\Omega)$$

Rovnice 2

V reverzním stavu toku proudu je nutné nastavit maximální možné vstupní napětí na 12,7V. Toto napětí je nastaveno změnou poměru děliče na pinu FBIN s rezistory  $R_{1_{FBIN}}$  8,66kΩ a  $R_{2_{FBIN}}$  887Ω. Žádané hodnoty dosáhneme paralelním přiřazením k rezistoru  $R_{1_{FBIN}}$ . [3]

Nejdříve provedeme výpočet požadovaného celkového odporu  $R_{1_{FBIN}}$ .

$$R_{1_{FBIN-CEL}} = \left( \frac{V_{OUT}}{1,207V} - 1 \right) * R_{2_{FBIN}} = \left( \frac{12,7}{1,207V} - 1 \right) * 887 = 8,45k\Omega$$

Rovnice 3

Následně provedeme výpočet velikosti přiřazovaného rezistoru.



$$R1_{FBIN-RVS} = \left( \frac{R1_{FBIN-CEL} * R1_{FBIN}}{-R1_{FBIN-CEL} + R1_{FBIN}} \right) = 348,46k\Omega = 348k\Omega$$

Rovnice 4

Při změně orientace proudu z přímého směru na reverzní je nutné připojení rezistoru  $R1_{FBIN-RVS}$  paralelně k  $R1_{FBIN}$  a tím je dosaženo požadovaného vstupního napětí měniče.

Pin VINHIMON zastává funkci přepěťové ochrany, jestliže napětí děliče dosáhne této úrovně, dojde k „Shutdown“ módu, čímž se zabrání poškození měniče. Po dosažení požadovaného maximálního napětí je funkce měniče obnovena. Tato funkce je realizována, pomocí děliče, rezistory  $R1_{HIMON}$   $R2_{HIMON}$ . Hysterezi lze eliminovat velikostí příslušného rezistoru  $R3_{HIMON}$  zapojeného mezi pin VINHIMON a dělič napětí. [3]

$$R1_{HIMON} = \frac{VIN_{ris} - 1,207}{100 * 10^{-6}} = 115,9k\Omega = 115k\Omega$$

Rovnice 5

$$R2_{HIMON} = \frac{1,207}{100 * 10^{-6}} = 121k\Omega = 12,1k\Omega$$

Rovnice 6

$$R3_{HIMON} = \left( \frac{1,207 - 24 * 10^{-6}}{1 * 10^{-6}} \right) - \left( \frac{V_{Infall} * R2_{HIMON}}{1 * 10^{-6} * (R1_{HIMON} + R2_{HIMON})} \right) - \left( \frac{R1_{HIMON} * R2_{HIMON}}{R1_{HIMON} + R2_{HIMON}} \right) = 48,79k\Omega = 48,7k\Omega$$

Rovnice 7

### 4.2.3 Výstupní napětí

Maximální výstupní napětí je dáno maximálním možným napětím Li-ion článků, tedy 16,8V z čehož vyplývá nutná podmínka, že toto napětí nesmí být překročeno, v opačném případě může dojít k poškození BMS nebo článků či k rychlejšímu opotřebení článků. [5]

Výstupní napětí měniče se nastavuje pomocí odporového děliče a připojuje se k pinu FBOUT. Tento pin je porovnáván s napěťovou referencí 1,207V. Pro nastavení výstupního napětí 16,5V je zvolen rezistor  $R2_{FBOUT}$  12,1 k $\Omega$  a rezistor  $R1_{FBOUT}$ , podle rovnice se rovná 153,31k $\Omega$ , nejbližší možný rezistor je 154 k $\Omega$ . S tímto rezistorem vychází výstupní napětí zhruba na 16,57V, to je stále v rozsahu maximálního výstupního napětí. [3]

$$R1_{FBOUT} = \left( \frac{V_{OUT}}{1,207V} - 1 \right) * R2_{FBOUT} = \left( \frac{16,5}{1,207V} - 1 \right) * 12,1 * 10^3 = 153,31k\Omega = (154k\Omega)$$

Rovnice 8

Ve stavu reverzního toku proudu je nutné nastavit minimální možné napětí na výstupní straně měniče ( $V_{OUT}$ ). Tato důležitá podmínka je realizována pomocí pinu VOUTLOMON. Jestliže výstupní napětí upravené děličem klesne k hodnotě 1,24V, IO začne omezovat reverzní proud, při dosažení hodnoty 1,17V dojde k „Shutdown“ módu, čímž se zabrání velkým proudovým odběrům do doby, než se napětí zvýší na požadovanou hodnotu.

Hysterezi lze eliminovat velikostí příslušného rezistoru  $R_{3_{VOUTLOMON}}$  zapojeného mezi pin  $VOUTLOMON$  a dělič napětí. [3]

Odpor děliče je dán rezistory  $R_{1_{LOMON}}$   $R_{2_{LOMON}}$ , Hystereze rezistorem  $R_{3_{LOMON}}$ .

$$R_{1_{LOMON}} = \frac{V_{OUT_{fall}} - 1,207V}{100\mu A} = 115,9k\Omega = 115k\Omega$$

Rovnice 9

$$R_{2_{LOMON}} = \frac{1,207}{100\mu A * 10^{-6}} = 12,07k\Omega = 12,1k\Omega$$

Rovnice 10

$$R_{3_{LOMON}} = \left( \frac{V_{OUT_{TRIS}} * R_{2_{LOMON}}}{1 * 10^{-6} * (R_{1_{LOMON}} + R_{2_{LOMON}})} \right) - \left( \frac{R_{1_{LOMON}} * R_{2_{LOMON}}}{R_{1_{LOMON}} + R_{2_{LOMON}}} \right) - \left( \frac{1,207V + 24mV}{1\mu A} \right) = 2,79k\Omega = 2,74k\Omega$$

Rovnice 11

#### 4.2.4 Interní oscilátor

Rozsah pracovní frekvence oscilátoru lze volit od 100 do 400kHz. Tato frekvence se nastavuje rezistorem  $R_T$ , který je zapojen mezi pin  $RT$  a  $GNDIO$ . Rezistorem  $R_T$  o velikosti  $365k\Omega$  je zvolena frekvence 120kHz. [3]

$$f_{osc} = \frac{43750}{R_T + 1} = \frac{43750}{365k\Omega * +1} = 119,53kHz$$

Rovnice 12

- Benefitem zvýšení frekvence je dosažení snížení velikosti indukčnosti induktoru a tím její velikosti, nevýhoda tkví ve zvýšení spotřeby při spínání spínacích prvků. [1] [2] [9] [10]

#### 4.2.5 Pracovní cyklus

Poměr doby střídý spínače M3 pro dosažení potřebného výstupního napětí je získán pomocí vzorce: [3]

$$DC_{(MAX,M3,BOOST)} = \left( 1 - \frac{V_{IN(MIN,BOOST)}}{V_{OUT(MAX,BOOST)} + 0,7V} \right) * 100\% \\ = \left( 1 - \frac{13V}{16,5V + 0,7V} \right) * 100\% = 24,86\%$$

Rovnice 13

Minimální doba sepnutí spínače M3: [3]

$$DC_{(ABSMIN,BOOST)} = T_{ON(M1,M2,M3,M4,MIN)} * f * 100\% = 200ns * 120kHz * 100\% = 2,4\%$$

Rovnice 14

$$DC_{(MAX,M2,BUCK)} = \left(1 - \frac{V_{OUT(MIN,BUCK)}}{V_{IN(MAN,BUCK)}}\right) * 100\% = \left(1 - \frac{13,2V}{14,5V}\right) * 100\% = 8,97\%$$

Rovnice 15

## 4.2.6 Parametry Induktoru

Velikost indukčnosti induktoru je dána výběrem induktoru s velikostí  $L = 3,3\mu H$ . [9] [11]

Výpočtem  $\Delta I_L$  je získána maximální změna proudu induktoru v režimech BUCK/BOOST, v kladném i reverzním směru toku proudu. [3]

$$\Delta I_{L(MAX,BOOST)} = \frac{\left(\frac{DC_{(MAX,M3,BOOST)}}{100\%}\right) * V_{IN(MIN,BOOST)}}{f_{OSC} * L} = \frac{\left(\frac{25,29\%}{100\%}\right) * 13V}{120kHz * 3,3\mu H} = 8,16A$$

Rovnice 16

$$\Delta I_{L(MIN,BOOST)} = \frac{\left(\frac{DC_{(ABSMIN,M3,BOOST)}}{100\%}\right) * V_{IN(MIN,BOOST)}}{f_{OSC} * L} = \frac{\left(\frac{2,4\%}{100\%}\right) * 13V}{120kHz * 3,3\mu H} = 0,79A$$

Rovnice 17

$$\Delta I_{L(MIN,BUCK)} = \frac{\left(\frac{DC_{(ABSMIN,M2,BUCK)}}{100\%}\right) * V_{OUT(MIN,BUCK)}}{f_{OSC} * L} = \frac{\left(\frac{2,4\%}{100\%}\right) * 13,2V}{120kHz * 3,3\mu H} = 0,8A$$

Rovnice 18

$$\Delta I_{L(MAX,BUCK)} = \frac{\left(\frac{DC_{(MAX,M2,BUCK)}}{100\%}\right) * V_{IN(MIN,BOOST)}}{f_{OSC} * L} = \frac{\left(\frac{8,97\%}{100\%}\right) * 13,2V}{120kHz * 3,3\mu H} = 2,99A$$

Rovnice 19

Výpočtem  $L_{(MIN,BOOST)}$  a  $L_{(MIN,BUCK)}$  je dána minimální velikosti induktoru a potvrzuje správnost výběru induktoru. [3]

$$\begin{aligned} L_{(MIN,BOOST)} &= \frac{V_{IN(MIN,BOOST)} * \left(\frac{DC_{(MAX,M3,BOOST)}}{100\%}\right)}{2 * f_{OSC} * \left(\frac{V_{RSENSE(MAX,BOOST,MAXDC)}}{R_{SENSE}} - \frac{I_{OUT(MAX,BOOST)} * V_{OUT(MAX,BOOST)}}{V_{IN(MIN,BOOST)}}\right)} \\ &= \frac{13V * \left(\frac{24,86\%}{100\%}\right)}{2 * 120kHz * \left(\frac{83mV}{2m\Omega} - \frac{20A * 16,5V}{13V}\right)} = 1,2\mu H \end{aligned}$$

Rovnice 20

$$L_{(MIN,BUCK)} = \frac{V_{OUT(MIN,BUCK)} * \left(\frac{DC_{(MAX,M2,BUCK)}}{100\%}\right)}{2 * f_{osc} * \left(\frac{V_{RSENSE(MIN,BUCK,MAXDC)}}{R_{SENSE}} - \frac{I_{IN(MAX,RVS)} * V_{OUT(MAX,BUCK)}}{V_{OUT(MIN,BUCK)}}\right)}$$

$$= \frac{13,2V * \left(\frac{8,97\%}{100\%}\right)}{2 * 120kHz * \left(\frac{82mV}{2m\Omega} - \frac{25A * 14,5V}{13,2V}\right)} = 0,56\mu H$$

Rovnice 21

## 4.2.7 Měřící rezistory proudu

Integrovaný obvod LT8708 je vybaven snímacími piny pro měření proudů. Pro tyto piny je nutné zvolit správnou velikost rezistoru. Jestliže by došlo k příliš vysokému napětí na tomto rezistoru, vedlo by to k chybnému vyhodnocení až poškození integrovaného obvodu. Velikost je dána výpočty níže. Z výpočtu jasně vyplývá, že požadovaná velikost rezistoru musí být menší než 2,83mΩ. Velikost reálně použitého rezistoru by měla být menší nejméně o 20-30%, nejbližší možná hodnota rezistoru je 2mΩ. [3]

$$R_{SENSE(MAX,BOOST,FWD)} = \frac{2 * V_{RSENSE(MAX,BOOST,MAXDC)} * V_{IN(MIN,BOOST)}}{(2 * I_{OUT(MAX,FWD)} * V_{OUT(MAX,BOOST)}) + (\Delta I_{L(MAX,BOOST)} * V_{IN(MIN,BOOST)})}$$

$$= \frac{2 * 83mV * 13V}{(2 * 20A * 16,5V) + (8,3A * 13V)} = 2,82m\Omega$$

Rovnice 22

$$R_{SENSE(MAX,BOOST,RVS)} = \frac{2 * V_{RSENSE(MIN,BOOST,MINDC)}}{(2 * I_{IN(MAX,RVS)}) - \Delta I_{L(MIN,BOOST)}} = \frac{2 * 93mV}{(2 * 25,38A) - 0,8A}$$

$$= 3,78m\Omega$$

Rovnice 23

$$R_{SENSE(MAX,BUCK,FWD)} = \frac{2 * V_{RSENSE(MAX,BUCK,MINDC)}}{(2 * I_{OUT(MAX,FWD)}) - \Delta I_{L(MIN,BUCK)}} = \frac{2 * 100mV}{(2 * 20A) - 2,99A}$$

$$= 5,40m\Omega$$

Rovnice 24

$$R_{SENSE(MAX,BUCK,FWD)} = \frac{2 * V_{RSENSE(MIN,BUCK,MAXDC)} * V_{OUT(MIN,BUCK)}}{(2 * I_{IN(MAX,RVS)} * V_{IN(MAX,BUCK)}) + (\Delta I_{L(MAX,BUSK)} * V_{OUT(MIN,BUCK)})}$$

$$= \frac{2 * 82mV * 13,2V}{(2 * 25A * 14,5V) + (2,99A * 13,2V)} = 2,83m\Omega$$

Rovnice 25

## 4.2.8 Limitace proudu

Výběr rezistorů  $R_{sense2}$ ,  $R_{IMON\_OP}$ ,  $R_{IMON\_ON}$  je dán výpočty. Požadovaný výstupní proud činí 20A. Pro správné nastavení limitace je třeba tuto hodnotu zvýšit o 10-20%. Stejná logika je uplatněna u všech proudových požadavků. [3]

$$R_{IMON\_ON} = \frac{1,209V}{I_{(OUT,FWD,LIMIT)} * 1m \frac{A}{V} * R_{SENSE2} + 20\mu A} = \frac{1,209V}{22 * 1m \frac{A}{V} * 2m\Omega + 20\mu A} = 18,89k\Omega = 18,7k\Omega$$

Rovnice 26

$$R_{IMON\_OP} = \frac{1,209V}{I_{(OUT,RVS,LIMIT)} * 1m \frac{A}{V} * R_{SENSE2} + 20\mu A} = \frac{1,209V}{22 * 1m \frac{A}{V} * 2m\Omega + 20\mu A} = 18,89k\Omega = 18,7k\Omega$$

Rovnice 27

$$R_{IMON\_INN} = \frac{1,21V}{I_{(IN,FWD,LIMIT)} * 1m \frac{A}{V} * R_{SENSE2} + 20\mu A} = \frac{1,21V}{27,5 * 1m \frac{A}{V} * 2m\Omega + 20\mu A} = 16,13k\Omega = 16k\Omega$$

Rovnice 28

$$R_{IMON\_INP} = \frac{1,209V}{I_{(IN,RVS,LIMIT)} * 1m \frac{A}{V} * R_{SENSE2} + 20\mu A} = \frac{1,209V}{27,5 * 1m \frac{A}{V} * 2m\Omega + 20\mu A} = 16,13k\Omega = 16k\Omega$$

Rovnice 29

## 4.2.9 Tepelné zatížení spínacích prvků

Spínače jsou napájeny takzvaným obdélníkovým napětím při konstantní periodě. Během jedné periody se ztráty energie na spínacích rozdělují na: [2] [3] [12] [14]

1. blokovácí ztráty
2. ztráty při sepnutí a vypnutí
3. ztráty v sepnutém stavu

Vzorec pro výpočet maximální tepelné ztráty na spínacím prvku. [3]

$$P_{MAX} = \frac{T_{J(MAX)} - T_{A(MAX)}}{R_{TH(JA)}} = \frac{150^{\circ}C - 35^{\circ}C}{50^{\circ}C} = 2,3W$$

Rovnice 30

Z výpočtu je jasně patrné, že tepelné zatížení tranzistoru je nejvíce ovlivněno jeho schopností odpadní teplo vyzářit do prostoru. V tomto konkrétním případě jsou vypočtené ztráty příliš vysoké a při návrhu bude nutné využít pasivního chlazení přidáním chladiče nebo aktivního chlazení přidáním ventilátoru pro zvýšení proudění vzduchu. [3] [12] [13] [14]

$$P_{M1,MAX} = \left( \left( \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} * I_{OUT(MAX,RVS)} \right)^2 * R_{DS(ON)} * \rho_{\tau} \right) + (V_{IN} * I_{OUT(MAX,RVS)} * f_{OSC} * t_{RF1}) + (0,5 * C_{OSS(M1+M2)} * V_{IN}^2 * f)$$

$$P_{M1,MAX} = \left( \left( \frac{16,5V}{13V} * 20A \right)^2 * 23m\Omega * 1,5 \right) + (13V * 20A * 120kHz * 20ns) + (0,5 * (685p + 685p) * 13^2 * 120kHz) = 2,86W$$

Rovnice 31

$$P_{M2,MAX} = \left( \frac{V_{IN} - V_{OUT}}{V_{IN}} * I_{OUT(MAX,RVS)} \right)^2 * R_{DS(ON)} * \rho_{\tau} + (V_{IN} * I_{OUT(MAX,RVS)} * f_{OSC} * t_{RF1}) + (0,5 * C_{OSS(M1+M2)} * V_{IN}^2 * f)$$

$$P_{M2,MAX} = \left( \frac{14,5V - 13,2V}{14,5V} * 20^2 * 2,3m\Omega * 1,5 \right) + (14,5V * 19,7A * 120kHz * 20ns) + (0,5 * (685p + 685p) * 14,5^2 * 120kHz) = 2,4W$$

Rovnice 32

$$P_{M3,MAX} = \left( \frac{(V_{OUT} - V_{IN}) * V_{OUT}}{V_{IN}^2} * I_{OUT(MAX,FWD)} \right)^2 * R_{DS(ON)} * \rho_{\tau} + (V_{OUT}^2 * I_{OUT(MAX,FWD)} * f_{OSC} * t_{RF1}) + (0,5 * C_{OSS(M3+M4)} * V_{IN}^2 * f)$$

$$P_{M3,MAX} = \left( \frac{(16,5V - 13V) * 16,5V}{13^2V} * 20^2 * 2,3m\Omega * 1,5 \right) + (16,5^2V * 20A * 120kHz * 20ns) + (0,5 * (685p + 685p) * 14,5^2 * 120kHz) = 1,5W$$

Rovnice 33

$$P_{M4,MAX} = I_{OUT(MAX,FWD)}^2 * R_{DS(ON)} * \rho_{\tau} = 19,7^2 * 23m\Omega * 1,5 = 1,34W$$

Rovnice 34

## 4.3 Režim

Integrovaný obvod LT8708 disponuje možností nastavení možných režimů pro logiku přenosu proudu. V závorce je znázorněno napětí, které aktivuje daný režim.

Automatický obousměrný kontinuální režim CCM (<0,4V) je závislý na vstupním napětí. V případě že na pinu FBIN dojde k překročení nastavené hodnoty vstupního napětí, dojde k přetoku energie ze vstupní části do výstupní, v opačném případě bude energie do vstupní části dodávána z výstupní. U tohoto nastavení může nastat stav tzv. oscilace. Tento problém vzniká kolísáním vstupního napětí kolem prahové hodnoty z důvodu velmi nízkého proudu, procházejícího systémem. [3]

Režim hybridního vedení HCM (0,8V-1,2V) je kombinace režimu CCM a DCM. Používá se v případech, kdy je vstupní napětí výrazně vyšší než výstupní. Lze dosáhnout nižšího zvolnění proudu induktoru. [3]

Režim nespojitého vedení DCM (1,6V-2,0V). Tento diskontinuálního vedení omezuje proud induktoru tak že může téct pouze jedním směrem (kladným nebo reverzním). Pohyb se řídí pomocí pinu DIR. [3]

Režim Burst (>2,4V) se vztahuje pouze na kladný směr proudu. Typickým příkladem je situace, při které osciluje napětí na pinu VC, dochází ke snížení výstupního napětí. [3]

## 4.4 Výběr komponent výkonové části měniče

Výkonovou část měniče obstarává samostatně navržená DPS. Tento postup byl zvolen z důvodu možnosti použití jiného typu desky s tlustší měděnou vrstvičkou, konkrétně 70 $\mu$ m, díky čemuž lze snížit ztráty, zahřívání desky a je možné případné zvýšení výkonových parametrů. [15]

Obousměrný měnič napětí tvoří 4 spínací prvky, kdy každý z nich obsahuje dva výkonové tranzistory typu MOSFET konkrétně AOB2144L zapojené paralelně. Devízou tohoto tranzistoru je nízký přechodový odpor v sepnutém stavu a rychlé spínací a vypínací doby. Tranzistory se nachází v pouzdru TO263, které nepoužívá tradiční montáž chladiče skrze šroubek, kterým se tranzistor přichytí k chladiči, chlazení obstarává DPS. Při vyšším zatížení je možné na tranzistor připevnit chladič. [3] [16] [17] [18]

MOSFET AOB2144L	
PARAMETR	HODNOTA
I <sub>DS</sub>	120A
U <sub>DS</sub>	40V
P <sub>D</sub>	187W
R <sub>DS(U<sub>GS</sub>=10V)</sub>	2,3m $\Omega$
T <sub>ON</sub>	12,5ns
T <sub>OFF</sub>	10,5ns
T <sub>OFF-DT</sub>	57,5ns
T <sub>J</sub>	150°C
R <sub>TH</sub>	0,8°C/W

Tabulka 5 (Převzato z [19])

Dalším prvkem nutným pro správnou funkci je vhodný induktor, pro tento případ byl zvolena tlumivka HCI2717-3R3 s vnitřní indukčností 3,3 $\mu$ H. Předností tohoto typu induktoru je vysoký saturační proud<sup>5</sup> a nízký vnitřní odpor. [3] [11] [20]

TLUMIVKA HCI2717-3R3	
PARAMETR	HODNOTA
indukčnost	3,3 $\mu$ H
DCR	2,45m $\Omega$
kontinuální proud	28A
saturační proud	93,6A

Tabulka 6 (převzato z [11])

Při spínání výkonových prvků dochází ke změně proudu a tato změna negativně zatěžuje vstupní zdroj a výstupní zátěž, je nutné proud vyhladit. K tomu slouží na vstupní a výstupní straně dva paralelně zapojené kondenzátory LLS1V392MELZ. Ty byly vybrány z důvodu nízké impedance a vysoké kapacity. Kombinací dvou již zmíněných kondenzátorů jsou splněny potřebné parametry zvlnění proudu. Pro eliminaci špičkového přepětí jsou použity kondenzátory keramického typu, konkrétně se jedná o CL32B106KAJNNNE. [21] [22]

Kondenzátor LLS1V392MELZ	
PARAMETR	HODNOTA
Kapacita	3900 $\mu$ F
Pracovní napětí	35V DC
Tolerance	$\pm$ 20%
Max. pracovní proud	2,22A

Tabulka 7 – (převzato z [21])

Kondenzátor CL32B106KAJNNNE	
PARAMETR	HODNOTA
Kapacita	10 $\mu$ F
Pracovní napětí	25V DC
Tolerance	$\pm$ 10%
Max. pracovní teplota	125 $^{\circ}$ C

Tabulka 8 (převzato z [22])

<sup>5</sup> Saturační proud induktoru je definovaný jako velikost proudu, který způsobí snížení indukčnosti o definovanou hodnotu.



Posledním důležitým prvkem je výběr snímacích rezistorů LR123WF200NT4E pro zpětnou vazbu řídicího obvodu. Připojení zdroje a zátěže obstarává konektor XT90, konektor má vynikající vlastnosti, zejména proudovou zatížitelnost 45A. [23] [24]

Snímací rezistor LR123WF200NT4E	
PARAMETR	HODNOTA
odpor	2mΩ
Max. ztrátový výkon	3W
Tolerance	±1%

Tabulka 9 (převzato z [23])

## 5 Návrh desky plošných spojů

### 5.1 Pravidla pro návrh desek

Pro návrh desky je nutné znát výrobní možnosti výrobce desek plošného spoje.

Parametry výroby jsou: nejmenší šířka cest, vzdálenosti mezi cestami, maximální tloušťka mědi, výroba prokovených otvorů, nepájivá maska, pocínované pájecí body atd. Pro výrobu DPS byla zvolena Laboratoř TUL, která disponuje potřebným vybavením a je zde možnost sledovat celý proces výroby. [15] [25] [26] [27]

### 5.2 Volba programu pro návrh desek

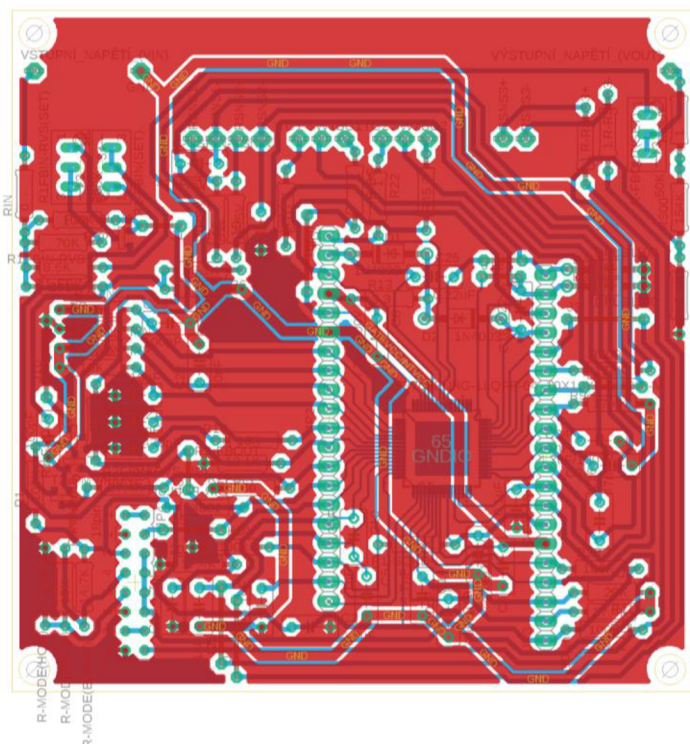
Pro návrh byl vybrán program EAGLE od společnosti Autodesk. Tento program byl zvolen pro své intuitivní ovládání. [28]

### 5.3 Rozvržení součástek

Hlavním limitací umístění součástek je velikost desky, deska s řídicím obvodem je navržena, vzhledem k možnostem výroby, na 90x90mm. Mezi základní kritéria patří co nejkratší cesty mezi součástkami a co nejméně propojek. Hlavní důraz je kladen na návrh desky s co největším množstvím součástek typu THT, tak aby bylo dosaženo možnosti jednoduchého pájení. Výkonová deska je navržena tím způsobem, aby byly cesty mezi spoji co možná nejširší. Pro dosažení těchto vlastností byla použita tzv. rozlitaná měď a tloušťka mědi 70μm u výkonové DPS a 18 μm řídicí DPS. [18] [15]

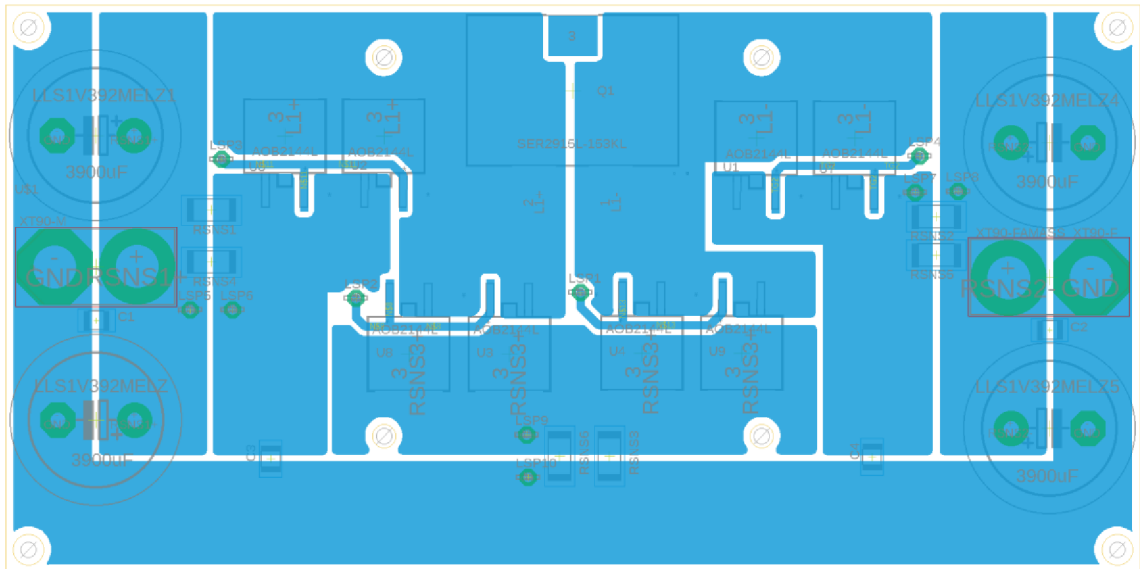
## 5.4 Desky plošných spojů

Pro snadnější výrobu byla řídicí deska s obvodem LT8708 navržena téměř bez SMD součástek. Diagnostické piny, pro měření a zjištění stavu jednotlivých vstupních pinů integrovaného obvodu pro případnou diagnostiku a návrh budoucí úpravy, zůstaly záměrně vyvedeny. Při návrhu desky se počítalo, že bude využito oboustranné technologie vodivých cest, tedy vodivé cesty se nacházejí z obou stran, s oddělením zemní části pro nastavení parametrů měniče a zemi, která je spojena se zemním pólem výkonové části. Při návrhu byl kladen důraz také na umístění co nejvíce signálových cest z jedné strany a z druhé strany využití tzv. rozlité země, která obstarává propojení prvků k zemní části pro nastavení měniče (GNDIO). [3] [15] [16] [17] [18]



Obrázek 8 – finální podoba návrhu řídicí DPS před schválením výrobce DPS

U výkonové desky byl kladen důraz na výrobu jednostranné desky o rozměrech 70x150mm. Při přenosu proudu je zapotřebí počítat se zahříváním komponent, výkonové tranzistory jsou z tohoto důvodu zdvojeny. Při návrhu byl brán zřetel i na možnost aktivního chlazení v podobě 60mm ventilátoru, který je umístěn tak, aby ochlazoval spínací prvky a také induktor. U této desky nebyla použita technologie termálních plošek pro zlepšení provozních vlastností, tato skutečnost ovšem ztěžuje montáž součástek. Pro připojení vstupního a výstupního vodiče slouží konektor XT90, který garantuje trvalý možný proud 45A. Tento konektor se vyznačuje nízkým přechodovým odporem 0,3m $\Omega$  a stálým povrchem bez možnosti oxidace, tato vlastnost je zaručena malou vrstvou zlaté vrstvičky na kontaktech konektoru. [15] [24] [29]



Obrázek 9 – finální podoba návrhu výkonové DPS před schválením výrobce DPS

## 6 Proces výroby DPS

Při výrobě DPS se projevilo mnoho obtížně řešitelných chyb návrhu, ale finální zhotovení bylo úspěšné. Největší chybou se ukázala být nedostatečná kontrola minimálních mezer zejména u IO LT8708, druhá chyba poté tkvěla v použití špatných pájecích plošek pro kondenzátory a rezistory. Tento druh plošky je vhodný pro pájení na vlně, kde je zajištěna menší styčná plocha pro dosažení rychlé změny teploty (aby tavidlo správně přilnulo k pájecí ploše a pájené součástce). Při ručním pájení dochází k přehřívání pájecí plošky a díky této skutečnosti může dojít k poškození desky oddělením měděné vrstvy od nepájivé desky. [15] [25] [30]

### 6.1 Zadání do výroby

Prvním krokem při výrobě je kontrola návrhu výrobcem a určení, zda je vůbec možné desku vyrobit. Po konzultaci došlo k několika změnám v návrhu - zejména k redukci velikosti desky z původních 110x100mm na 90x90mm. Díky této redukci velikosti bylo možné vyrobit pohodlně 6 desek z jednoho výrobního panelu. Po úpravě došlo k odeslání potřebných dat do výroby.

### 6.2 Vrtání otvorů

Prvním procesem při výrobě DPS je vyvrtání otvorů. Tuto činnost vykonává speciálně navržený portálový robot, který dle vygenerovaných dat z programu Eagle vyvrtá díry na místech v příslušných rozměrech dle zadaného schématu. [15] [25]

### 6.3 Výroba prokovených otvorů

V této části dochází k propojení obou desek v místech, které byly vyvrtány, tento proces vzniká v tzv. „galvanické lázni“. [15] [25]

Tento krok byl přeskočen.

### 6.4 Výroba filmových předloh

Další částí je tisk filmu pro výrobu masky určené k leptání cest a také masky, která je využívána pro nanášení nepájivé masky. [15] [25]



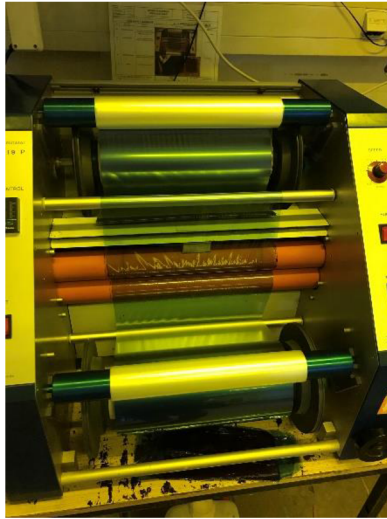
Obrázek 10 - filmová matrice

### 6.5 Kartáčování

Tento proces je důležitý pro zajištění co možná nejlepšího přilnutí fotorezistu (viz níže) k měděné ploše. Deska je kartáčována vždy před nanášením jednotlivých vrstev. [15] [25]

### 6.6 Proces leptání vodivých cest

Dalším krokem výroby DPS je nanesení speciální maskovací folie (fotorezist), která je určena pro leptání. Tato maska se nažehlí pomocí nažehlovačky z obou stran tak, aby mezi deskou a folií nevznikaly bubliny. [15] [25]



Obrázek 11 – přístroj pro nanesení fotorezistu

Po nažehlení následuje sesazení filmové matrice, kdy pak pomocí UV lampy vznikne předloha, která se vkládá do leptacího roztoku. Před vytvrzením v UV lampě je nutné celou desku skrýt před slunečním svitem, který obsahuje UV světelné spektrum, při neskrutí dojde k částečnému vytvrzení plochy, díky němuž nedojde k požadovanému obrysu masky. [15] [25]



Obrázek 12 – proces vytvrzení fotorezistu

Po dokončení procesu vytvrzení UV lampou následuje umytí nevytvrzené masky, která odkryje měď pro odleptání. Při tomto procesu je nutno důkladně prohlédnout, zda je nevytvrzená maska vypláchnutá z malých spár, například mezi piny IO LT8708. [15] [25]



*Obrázek 13- proces leptání*

Po procesu odleptání je nutná důkladná prohlídka. Je potřeba zkontrolovat, zda došlo k odstranění mědi ve všech potřebných místech a spárách, zejména v již zmiňovaných pájecích ploškách integrovaného obvodu. [15] [25]

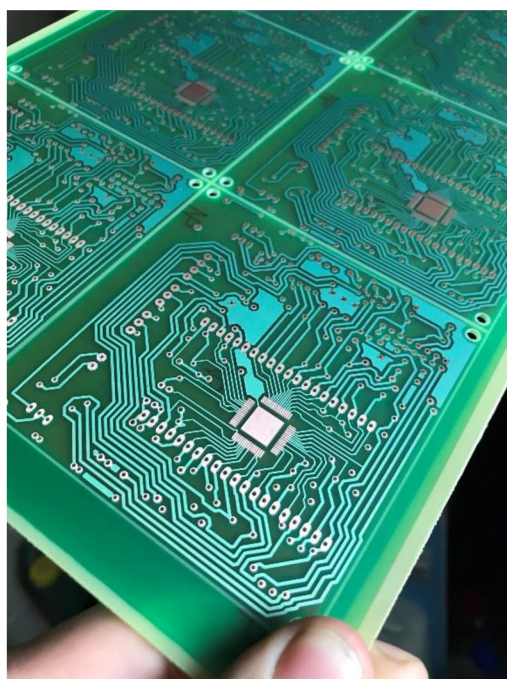
Po kontrole je nutné desku zbavit vytvrzené masky, aby byl povrch opět pájitelný a připravený pro nanesení nepájivé masky. Odstranění masky se provádí v lázni s hydroxidem sodným. Při ponechání masky v lázni po příliš krátkou dobu nedojde k úplnému vyčištění masky, při příliš dlouhé době dojde k oxidaci povrchu, což zhoršuje vlastnosti pro pájení a realizaci dalších kroků. [15] [25]



*Obrázek 14 – deska plošeného spoje po leptacím procesu*

## 6.7 Nepájivá maska

Dále dochází opět ke kartáčování, po kterém následuje nanesení nepájivé masky. Proces nanesení má pět částí. První je nanesení pomocí sítotisku speciální dvousložkovou barvu přes celou plochu desky. Druhou je vysušení, pro zrychlení tohoto procesu bývá deska vložena do pece zhruba na 60-80 stupňů Celsia po dobu 10 minut. Ve třetí části následuje složení filmové matrice s deskou a posléze vytvrzení v UV lampě. V předposlední části je provedeno čištění a následná kontrola, zda je nepájivá maska zhotovena správně. Po vyhodnocení přichází poslední pátá část v podobě vytvrzení desky, zhruba na 20 minut se vloží deska do UV lampy a po dokončení je připravena na další možné kroky. [15] [25]



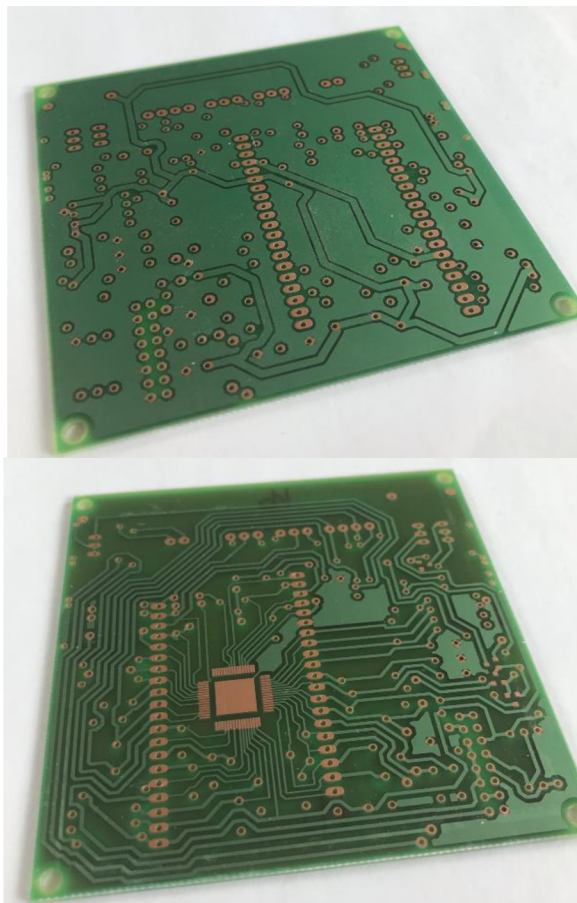
Obrázek 15 - aplikace nepájivé masky

## 6.8 Finální úprava

Posledním procesem při výrobě desek bylo ošetření proti oxidaci a rozstříhání na jednotlivé desky. [15] [25]

Záměrně došlo k vyřazení procesu cínování a nanesení popisků.

## 6.9 Finální podoba zhotovené DPS



Obrázek 16 – finální vzhled desky plošného spoje

## 7 Realizace a měření DC-DC měniče

### 7.1 Osazování a oživení

Měnič se skládá ze dvou DPS, tyto desky jsou propojeny pomocí vodičů, které přenáší signály z výkonové části do řídicí. Jedná se o signály, které obstarávají řízení výkonových prvků a zpětných vazeb pro dosažení požadovaných parametrů měniče.

Osazení DPS bylo provedeno ručně pomocí mikropájkky. Osazování probíhalo postupně po částech, které bylo možné funkčně otestovat.

Pro prvotní oživení je jako napájecí zdroj použitý laboratorní zdroj, u kterého lze výstupní napětí přesně nastavit společně s nastavením limitační hodnoty výstupního proudu. Tento postup byl zvolen z důvodu diagnostikování případného špatného nastavení měniče, způsobeného například nesprávným sestavením. Pro další postup je nutné měnič vypnout zkratováním vstupního pinu SHDN. Po prvním oživení a provedení kontroly byla k napájecí části měniče připojena běžná autobaterie, která sloužila jako tvrdý zdroj elektrické energie a stabilizovala vstupní napětí. [3]



## 7.2 Sepnutí a stav na prázdnno

Pro dosažení maximální vstupního napětí byla použita auto nabíječka, která byla schopna dodávat zhruba 40A a 13,8V. Rozsah vstupního napětí se pohybuje od 10,5V až do 13,82V.

Po připojení měniče ke zdroji došlo ke skokovému zvýšení proudu, který byl způsoben nabíjením vstupních kondenzátorů. Jestliže by se jednalo o měnič, který se skládá z více paralelních výkonových sekcí, bylo by nutné zajistit postupné nabíjení tak, aby nedošlo k poškození napájecího zdroje. To lze realizovat pomocí před nabíjecího obvodu.

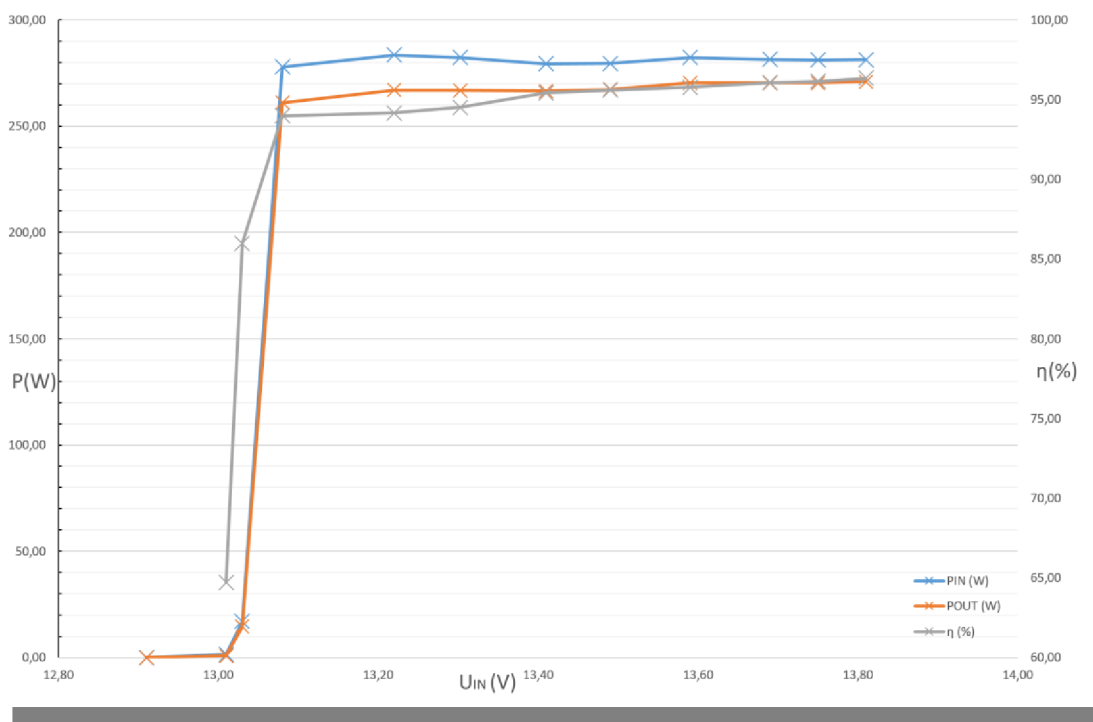
K ověření správné funkce měniče byl pin SHDN aktivován odpojením nulového potenciálu a měnič následně nabil výstupní kondenzátory na hodnotu 16,62V. Napětí dle výpočtu odpovídá požadované hodnotě, rozdíl je způsoben nepřesností výroby rezistorů. Zvolené rezistory lze považovat za vyhovující. Vstupní klidová hodnota proudu byla naměřena jako 16mA. Tuto hodnotu lze požadovat za uspokojivou, tvoří ji z největší části svodové proudy kondenzátorů a ztráty magnetického pole induktoru.

## 7.3 Zatěžovací charakteristiky měniče

Měření zatěžovacích charakteristik je rozděleno do 3 fází. V grafu jsou z důvodu přehlednosti zobrazeny průběhy vstupního příkonu, výstupního výkonu a účinnosti. Tento způsob zobrazení byl zvolen z důvodu snadnějšího odhadu chování měniče.

- 1) Závislost reakce měniče na vstupním napětí při kladném toku proudu.

Tato charakteristika zobrazuje reakci měniče v závislosti na vstupním napětí. Z grafu jasně vyplývá, že při zvýšení vstupního napětí nad hodnotu zhruba 13,10V měnič již plně dodává veškerou přebytečnou energii ze vstupní strany do výstupní, limitem je maximální výstupní proud. Dále lze pozorovat mírné zvýšení účinnosti, které roste se zvyšujícím se vstupním napětím. Tato skutečnost je dána mírným poklesem vstupního proudu.



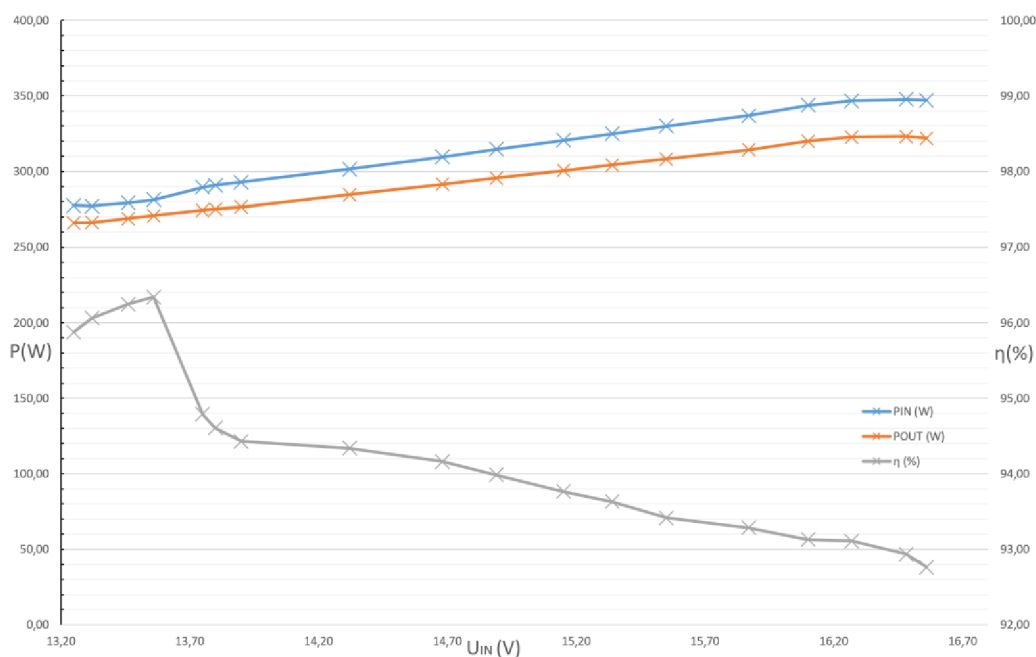
Obrázek 17 – graf příkonu, výkonu a účinnosti v závislosti na vstupním napětí (kladný směr toku proudu)

$U_{IN}$ (V)	$I_{IN}$ (A)	$P_{IN}$ (W)		$U_{OUT}$ (V)	$I_{OUT}$ (A)	$P_{OUT}$ (W)	$\eta$ (%)
12,91	0	0,00		13,23	0	0,00	0,00
13,01	0,11	1,43		13,23	0,07	0,93	64,71
13,03	1,3	16,94		13,24	1,1	14,56	85,98
13,08	21,24	277,86		13,31	19,62	261,14	93,98
13,22	21,44	283,48		13,34	20,01	266,93	94,16
13,30	21,22	282,27		13,36	19,97	266,80	94,52
13,41	20,83	279,32		13,38	19,92	266,53	95,42
13,49	20,72	279,56		13,41	19,93	267,26	95,60
13,59	20,77	282,30		13,43	20,13	270,35	95,77
13,69	20,56	281,43		13,47	20,07	270,34	96,06
13,75	20,45	281,15		13,49	20,04	270,34	96,15
13,81	20,36	281,22		13,56	19,98	270,93	96,34

Tabulka 10

## 2) Závislost účinnosti na výstupním napětí při kladném toku proudu.

Z grafu je jasně patrné, kdy dochází k přechodu spínání měniče z topologie BUCK na BOOST. Lze pozorovat strmé zhoršení účinnosti. Toto chování je způsobeno periodickým spínáním spínače M4, díky kterému je zvýšen proud cívkou tak, aby bylo dosaženo zvýšení požadovaného výstupního napětí.



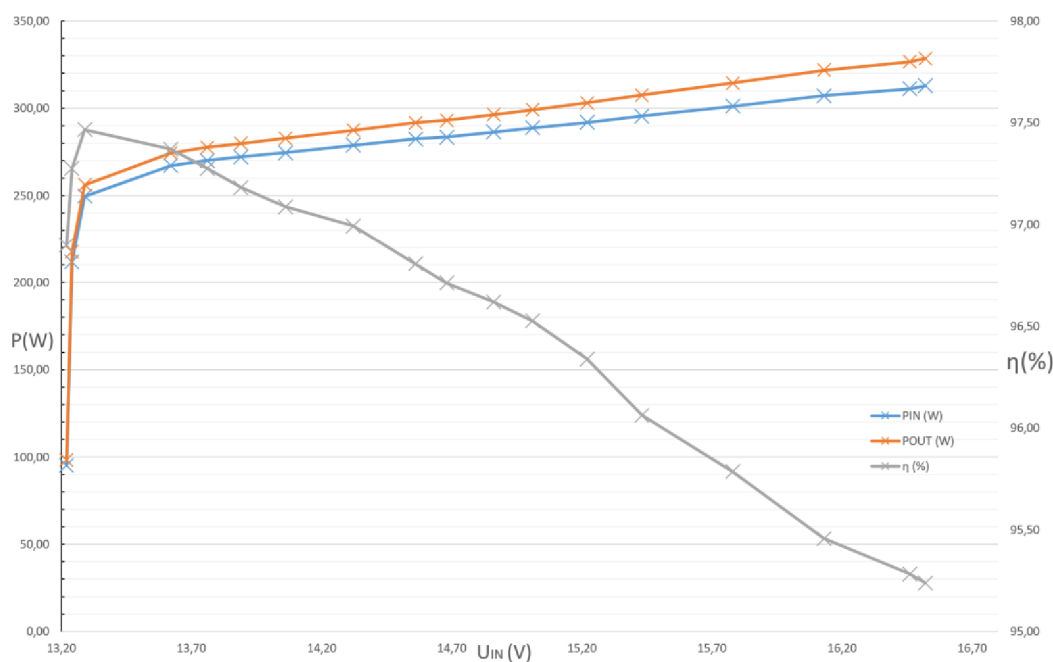
Obrázek 18 – graf příkonu, výkonu a účinnosti v závislosti na výstupním napětí (kladný směr toku proudu)

$U_{IN}$ (V)	$I_{IN}$ (A)	$P_{IN}$ (W)		$U_{OUT}$ (V)	$I_{OUT}$ (A)	$P_{OUT}$ (W)	$\eta$ (%)
13,82	20,08	277,50		13,25	20,08	266,06	95,88
13,81	20,07	277,18		13,32	19,99	266,27	96,06
13,82	20,21	279,28		13,46	19,97	268,80	96,25
13,81	20,36	281,22		13,56	19,98	270,93	96,34
13,82	20,95	289,54		13,75	19,96	274,45	94,79
13,81	21,06	290,86		13,80	19,94	275,17	94,61
13,81	21,20	292,78		13,90	19,89	276,47	94,43
13,82	21,82	301,61		14,32	19,87	284,54	94,34
13,82	22,40	309,62		14,68	19,86	291,54	94,16
13,81	22,78	314,64		14,89	19,86	295,72	93,98
13,81	23,21	320,56		15,15	19,84	300,58	93,76
13,81	23,52	324,88		15,34	19,83	304,19	93,63
13,80	23,91	329,93		15,55	19,82	308,20	93,41
13,82	24,37	336,85		15,87	19,8	314,23	93,28
13,82	24,87	343,69		16,10	19,88	320,07	93,13
13,81	25,10	346,68		16,27	19,84	322,80	93,11
13,82	25,16	347,73		16,48	19,61	323,17	92,94
13,80	25,15	347,04		16,56	19,44	321,93	92,76

Tabulka 11

### 3) Závislost účinnosti na výstupním napětí při reverzním toku proudu.

Při měření této charakteristiky dochází ke snižování výstupního napětí, tedy vyplývá skutečnost, že se jedná pouze o topologii BUCK. Z grafu lze konstatovat, že se snižujícím rozdílem napětí vzrůstá účinnost. To je způsobeno dvojicí nejvíce projevujících se faktorů. Prvním z nich je snižující se výstupní proud. Druhým faktorem jsou ztráty spínáním spínacích prvků.



Obrázek 19 – graf příkonu, výkonu a účinnosti v závislosti na výstupním napětí (reverzní směr toku proudu)

$U_{IN}$ (V)	$I_{IN}$ (A)	$P_{IN}$ (W)	$U_{OUT}$ (V)	$I_{OUT}$ (A)	$P_{OUT}$ (W)	$\eta$ (%)
12,58	24,86	312,78	16,52	19,88	328,42	95,24
12,56	24,77	311,16	16,46	19,84	326,57	95,28
12,54	24,50	307,17	16,13	19,95	321,79	95,46
12,55	23,99	301,09	15,78	19,92	314,34	95,79
12,56	23,52	295,41	15,43	19,93	307,52	96,06
12,55	23,26	291,94	15,22	19,91	303,03	96,34
12,54	23,03	288,75	15,01	19,93	299,15	96,53
12,55	22,81	286,29	14,86	19,94	296,31	96,62
12,51	22,65	283,38	14,68	19,96	293,01	96,71
12,52	22,55	282,32	14,56	20,03	291,64	96,81
12,53	22,25	278,76	14,32	20,07	287,40	96,99
12,54	21,89	274,51	14,06	20,11	282,75	97,09
12,52	21,72	272,00	13,89	20,15	279,88	97,18
12,53	21,55	269,98	13,76	20,17	277,54	97,28
12,52	21,33	267,10	13,62	20,14	274,31	97,37
12,52	19,94	249,61	13,29	19,27	256,10	97,47
12,48	16,98	211,87	13,24	16,45	217,80	97,28
12,43	7,66	95,18	13,22	7,43	98,22	96,90

Tabulka 12

## 7.4 Účinnost

Průběhy účinnosti jsou zobrazeny v sekci „Zatěžovací charakteristiky měniče“.

Pro příklad účinnosti je zvolen stav kladného směru proudu, vstupní napětí  $U_{IN}=13,81V$ ,  $I_{IN}=20,36A$ ,  $U_{OUT}=13,56V$ ,  $I_{OUT}=19,98A$ .

Prvním krokem je výpočet vstupního příkonu.

$$P_{IN} = U_{IN} * I_{IN} = 13,81V * 20,36A = 281,22W$$

*Rovnice 35*

Následuje výpočet výstupního výkonu.

$$P_{OUT} = U_{OUT} * I_{OUT} = 13,56V * 19,98A = 270,93W$$

*Rovnice 36*

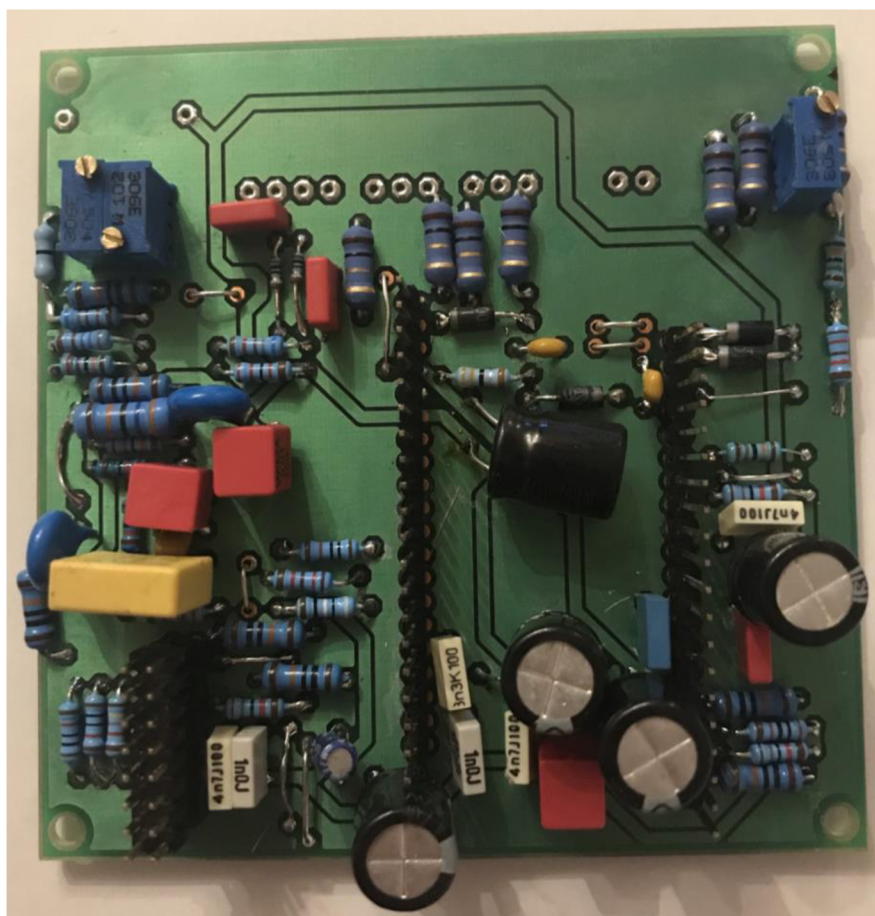
Účinnost měniče lze následně vypočítat pomocí vztahu:

$$\eta = \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} * 100 = \frac{270,93W}{281,22W} = 96,34\%$$

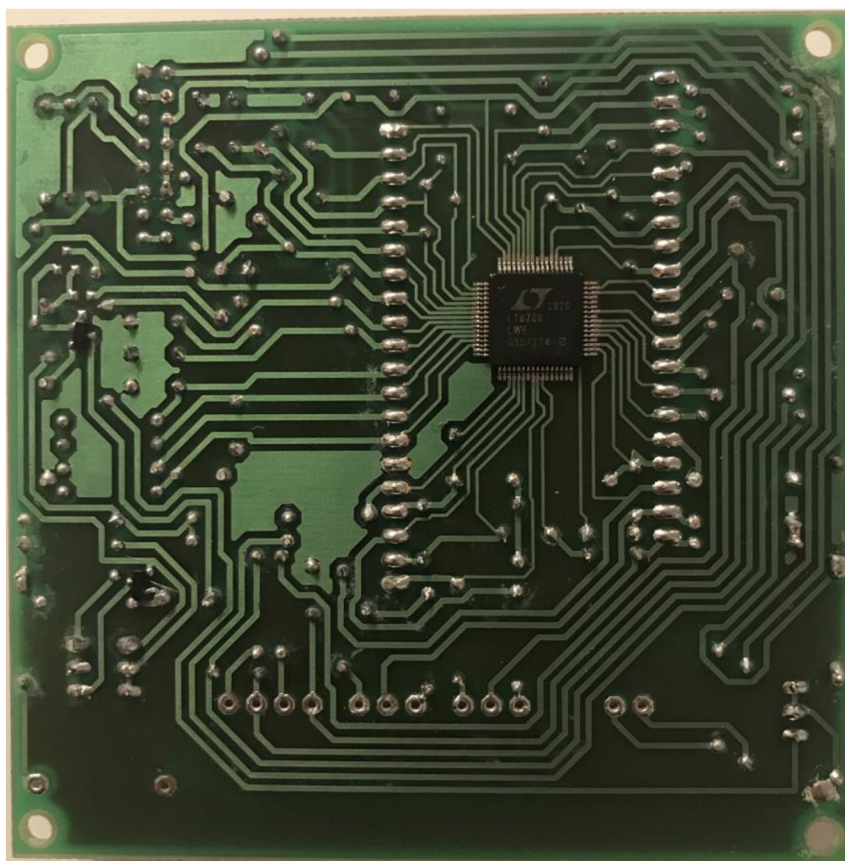
*Rovnice 37*

Při měření kladného toku proudu byla zaznamenána nejvyšší účinnost 96,36%, při přenosu reverzního toku proudu účinnost mírně vzrostla na maximální hodnotu 97,47%.

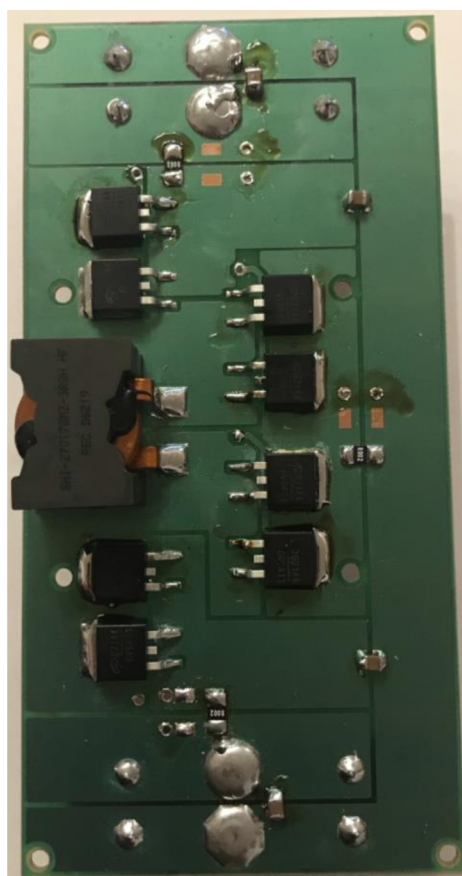
## 8 Fotografie řídicí a silové desky DC-DC měniče



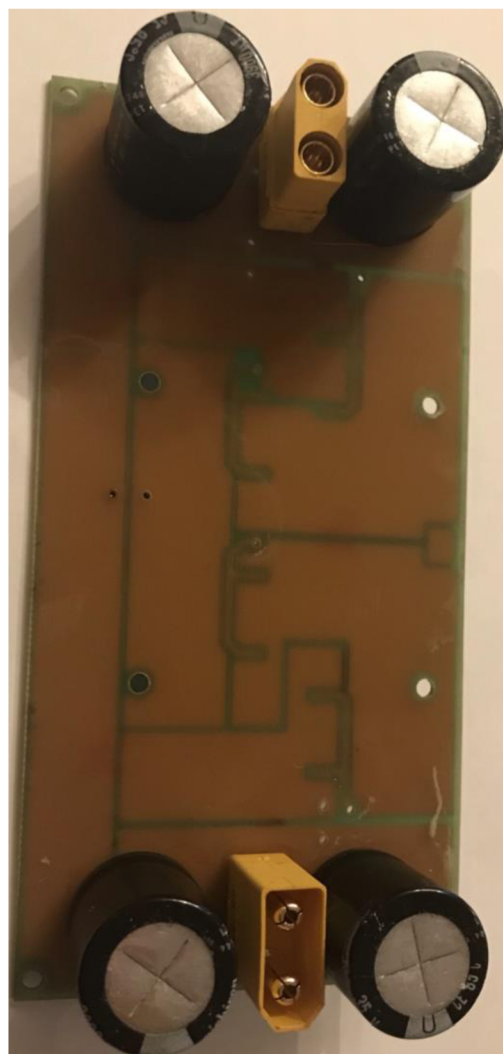
Obrázek 20 - zhotovená řídicí deska, pohled z vrchní strany



Obrázek 21 – zhotovená řídicí deska, pohled ze spodní strany



Obrázek 22 - zhotovená řídicí deska, pohled ze spodní strany



Obrázek 23 - zhotovená řídicí deska, pohled z vrchní strany

## 9 Výsledné parametry měniče

PARAMETR	HODNOTA
$U_{IN}$	10,5-15,5V
$U_{OUT}$	13,23-16,62V
$U_{IN}$ (Forward, MIN)	13,03V
$U_{IN}$ (Reverse, MAX)	12,56V
$I_{IN}$ (Forward, Reverse, MAX)	24,86A
$I_{OUT}$ (Forward, Reverse, MAX)	20,08A
$\eta$ (typical)	92-97%

Tabulka 13 – výsledné parametry měniče



## Závěr

Cílem této práce bylo navrhnout, vyrobit, oživit a otestovat funkčnost stejnosměrného měniče pro bateriové aplikace, který bude dle požadavku operátora přenášet přebytečnou energii do bateriového uložení nebo udržovat konstantní napětí na vstupní straně, oba tyto směry budou limitovány maximální hodnotou proudu. V této práci bylo dosaženo těchto výsledků:

Teoretická část bakalářské práce se zabývá seznámením se s topologiemi, funkcemi a podmínkami realizace DC-DC měničů. V první části jsou popsány základní parametry, pojmy a druhy měničů pro stejnosměrné napětí se základním vysvětlením a popisem funkcí. Pozornost je věnována konstrukci měničů s použitím induktoru.

Praktickou část lze rozdělit do třech kapitol. Jako první jsou definovány požadované vlastnosti budoucího měniče, výběr vhodného řídicího obvodu a z toho vyplývající topologie. V druhé kapitole se nachází realizace měniče v podobě výpočtu vhodných hodnot nastavovacích prvků, které slouží pro dosažení požadovaných vlastností měniče a také k teoretickému ověření, zda je konstrukčně možné měnič realizovat pomocí výkonových komponent. Za součást této kapitoly lze považovat výběr výkonových prvků. Poslední kapitolu tvoří popis výroby, oživení, změření a vyhodnocení výsledků.

Desky plošných spojů byly ručně zhotoveny v laboratoři Technické Univerzity v Liberci, následovalo ruční osazení součástkami a byla otestována funkčnost celku. Z testu vyplývá, že návrh a zhotovení bylo úspěšné. Parametry měniče jsou uvedeny v Tabulce 13. Navržený měnič vykazuje požadované vlastnosti.

Předpokládaným dalším vývojem měniče by mohl být návrh DPS pomocí součástek SMD a tím zmenšení její velikosti, zároveň umístění této řídicí desky (nebo obvodu) na výkonovou část tak, aby byl budoucí měnič kompaktnější. Další možnou úpravou lze navrhnout systém, který by přenášel aktuální stav měniče a zobrazoval aktuální parametry veličin jako například velikost vstupního a výstupního napětí, vstupní a výstupní proud, případně směr toku proudu.

## Seznam citované literatury

- [1] **KREJČÍŘÍK, Alexandr.** *DC/DC měniče*. Praha : BEN-Technická literatura, 2001. ISBN: 80-7300-045-8.
- [2] **BILLINGS, Keith and MOREY, Taylor.** *Switchmode power supply handbook, 3rd edition*. New York : McGraw-Hill Education, 2011. ISBN: 9780071639712.
- [3] **ANALOG DEVICES.** LT8708 (Rev A). *www.analog.com*. [Online] 2020. [Citace: 7. 10 2020.] <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/LT8708.pdf>.
- [4] **DAN.** Impulzní zdroje a měniče II. - Přehled topologií impulzních měničů (bez galvanického oddělení). [Online] [Citace: 10. 11 2020.] <http://danyk.cz/menice.html>.
- [5] **BUCHMANN, Isidor.** BU-204: How do Lithium Batteries Work? [Online] 01. 06 2018. [Citace: 6. 3 2021.] [https://batteryuniversity.com/learn/article/lithium\\_based\\_batteries](https://batteryuniversity.com/learn/article/lithium_based_batteries).
- [6] **TEXAS INSTRUMENTS.** UCx84xA Current-Mode PWM Controller datasheet (Rev. F). [Online] 2021. [https://www.ti.com/lit/ds/symlink/uc3843a.pdf?ts=1620822534931&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FUC3843A](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/uc3843a.pdf?ts=1620822534931&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FUC3843A).
- [7] **STMICROELECTRONICS.** UC3843AN pdf, UC3843AN description, UC3843AN datasheets, UC3843AN. *ALLDATASHEET.COM*. [Online] 1999. [Citace: 16. 11 2020.] <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/25583/STMICROELECTRONICS/UC3843AN.html>.
- [8] **MOTOROLA.** TL494 datasheet. [Online] [Citace: 3. 11 2020.] <https://datasheetspdf.com/pdf-file/316179/MotorolaInc/TL494/1>.
- [9] **SOSELECTRONIC.** Jak porozumět parametrům výkonových cívek pro DC/DC měniče. [Online] 16. 6 2017. [Citace: 10. 10 2021.] <https://www.loselectronic.cz/articles/sos-supplier-of-solution/jak-porozumet-parametrum-vykonovych-civek-pro-dc-dc-menice-2005>.
- [10] **Doleček, Jaroslav.** *MODERNÍ UČEBNICE ELEKTRONIKY: Optoelektronika a optoelektronické prvky*. Praha : BEN, 2007.
- [11] **FERROCORE.** HCI2717. [Online] 11. 4 2017. [Citace: 27. 3 2021.] <https://www.tme.eu/Document/d304cf466e54dcde8625bd0289e1dad/HCI2717.pdf>.
- [12] **NOVÁK, Jaroslav.** Moderní výkonové polovodičové prvky a jejich aplikační možnosti. *Elektro časopis pro elektroniku*. [Online] 6 2003. [Citace: 23. 1 2021.] <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/moderni-vykonove-polovodicove-prvky-a-jejich-aplikacni-moznosti--14473>.
- [13] **ČERNÍK, Martin.** Výkonová elektronika. [Online] 2014. [Citace: 20. 3 2021.] <https://docplayer.cz/18325132-Vykonova-elektronika-martin-cernik.html>.
- [14] **Texas Instruments Incorporated.** MOSFET power losses and how they affect power-supply efficiency. [Online] 2015. [Citace: 17. 1 2021.] [https://www.ti.com/lit/an/slyt664/slyt664.pdf?ts=1617736019353&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.google.cz%252F](https://www.ti.com/lit/an/slyt664/slyt664.pdf?ts=1617736019353&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.cz%252F).

- [15] **PETRŽÍLKA, Leoš, PLÍVA Zdeněk.** Přednáška\_DPS2 (Technologie desek plošných spojů) (EZA). [Online] 2012. [Citace: 9. 3 2021.] <https://www.elearning.tul.cz/>.
- [16] **ANALOG DEVICES.** DC2719A (Rev 0). *ANALOG DEVICES*. [Online] 10 2018-2020. [Citace: 28. 10 2020.] [https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/user-guides/DC2719A\\_UG-1407.pdf](https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/user-guides/DC2719A_UG-1407.pdf).
- [17] **PETRŽÍLKA, Leoš, PLÍVA Zdeněk.** Pravidla1 (Návrhová pravidla plošných spojů) (EZA). [Online] 2012. [Citace: 9. 3 2021.] <https://www.elearning.tul.cz/>.
- [18] **PETRŽÍLKA, Leoš, PLÍVA Zdeněk.** Pravidla2 (Návrhová pravidla plošných spojů) (EZA). [Online] 2012. [Citace: 9. 3 2021.] <https://www.elearning.tul.cz/>.
- [19] **ALPHA & OMEGA SEMICONDUCTOR.** AOT2144L AOB2144L\_Rev.1.0\_Rohs. *TME*. [Online] 11 2017. [Citace: 2. 2 2021.] <https://www.tme.eu/Document/5a7c489507f91b77da0e065cddb9ec1a/AOB2144L.pdf>.
- [20] **COILCRAFT-CPS.** Coilcraft SER27xx Series. *TME*. [Online] coilcraft-CPS. [Citace: 17. 12 2020.] <https://www.coilcraft.com/en-us/products/power/shielded-inductors/high-current-flat-wire/ser/ser29xx/>.
- [21] **ALUMINUM ELECTROLYTIC CAPACITORS.** e-ls. [Online] 2011. [Citace: 3. 2 2021.] <https://www.tme.eu/Document/280e3fb6bfa2629e98808628203c848c/e-ls.pdf>.
- [22] **SAMSUNG ELEKTRO-MECHANICS.** mlcc\_samsung. [Online] [Citace: 4. 2 2021.] [https://www.tme.eu/Document/7da762c1dbaf553c64ad9c40d3603826/mlcc\\_samsung.pdf](https://www.tme.eu/Document/7da762c1dbaf553c64ad9c40d3603826/mlcc_samsung.pdf).
- [23] **TME.** Měřicí rezistory SMD Royal Ohm, LR2512-R0005-1%-2W, LR2512-R001-1%-2W, LR2512-R002-1%-2W [CS]. [Online] [Citace: 2. 2 2021.] [https://www.tme.eu/html/CZ/merici-rezistory-smd-royal-ohm/ramka\\_22483\\_CZ\\_pelny.html](https://www.tme.eu/html/CZ/merici-rezistory-smd-royal-ohm/ramka_22483_CZ_pelny.html).
- [24] **AMASS.** XT90PB SPEC. [Online] [Citace: 4. 3 2021.] <https://www.tme.eu/Document/eadf7facf105d608bc4c50a4b9e8487a/XT90PB%20SPEC.pdf>.
- [25] **PETRŽÍLKA, Leoš, PLÍVA Zdeněk.** DPS1 (Technologie desek plošných spojů) (EZA). [Online] 2012. [Citace: 9. 3 2021.] <https://www.elearning.tul.cz/>.
- [26] **PETRŽÍLKA, Leoš, PLÍVA Zdeněk.** Eagle\_lbr (Návrhový systém EAGLE) (EZA). [Online] 2012. [Citace: 9. 3 2021.] <https://www.elearning.tul.cz/>.
- [27] **PETRŽÍLKA, Leoš, PLÍVA Zdeněk.** Eagle\_schbrd (Návrhový systém EAGLE) (EZA). [Online] 2012. [Citace: 9. 3 2021.] <https://www.elearning.tul.cz/>.
- [28] **PETRŽÍLKA, Leoš, PLÍVA Zdeněk.** EAGLE\_uvod (Návrhový systém EAGLE) (EZA). [Online] 2012. [Citace: 9. 3 2021.] <https://www.elearning.tul.cz/>.
- [29] **PETRŽÍLKA, Leoš, PLÍVA Zdeněk.** Osazování1 (Technologie osazování DPS) (EZA). [Online] 2012. [Citace: 9. 3 2021.] <https://www.elearning.tul.cz/>.
- [30] **PETRŽÍLKA, Leoš, PLÍVA Zdeněk.** Osazování2 (Technologie osazování DPS) (EZA). [Online] 2012. [Citace: 3. 9 2021.] <https://www.elearning.tul.cz/>.

## Seznam obrázků

Obrázek 1 – zjednodušené schéma měniče BUCK .....	16
Obrázek 2 – zjednodušené schéma měniče BOOST .....	17
Obrázek 3 – Zjednodušené schéma zapojení neizolovaného měniče BUCK BOOST .....	18
Obrázek 4 – Zjednodušené schéma s využitím LT8708 (převzato z [3]).....	24
Obrázek 5 dostupná pouzdra IO LT8708 (převzato z [3]) .....	25
Obrázek 6 vnitřní zapojení IO LT8708 (převzato z [3]) .....	26
Obrázek 7 – zjednodušené schéma navrhovaného obvodu .....	31
Obrázek 8 – finální podoba návrhu řídicí DPS před schválením výrobce DPS .....	42
Obrázek 9 – finální podoba návrhu výkonové DPS před schválením výrobce DPS.....	43
Obrázek 10 - filmová matrice .....	44
Obrázek 11 – přístroj pro nanesení fotorezistu.....	45
Obrázek 12 – proces vytvrzení fotorezistu .....	45
Obrázek 13- proces leptání .....	46
Obrázek 14 – deska plošného spoje po leptacím procesu.....	46
Obrázek 15 - aplikace nepajivé masky .....	47
Obrázek 16 – finální vzhled desky plošného spoje .....	48
Obrázek 17 – graf příkonu, výkonu a účinnosti v závislosti na vstupním napětí (kladný směr toku proudu) .....	49
Obrázek 18 – graf příkonu, výkonu a účinnosti v závislosti na výstupním napětí (kladný směr toku proudu) .....	50
Obrázek 19 – graf příkonu, výkonu a účinnosti v závislosti na výstupním napětí (reverzní směr toku proudu) .....	52
Obrázek 20 - zhotovená řídicí deska, pohled z vrchní strany.....	54
Obrázek 21 – zhotovená řídicí deska, pohled ze spodní strany.....	55
Obrázek 22 - zhotovená řídicí deska, pohled ze spodní strany .....	55
Obrázek 23 - zhotovená řídicí deska, pohled z vrchní strany.....	56

## Seznam tabulek

Tabulka 1 .....	15
Tabulka 2 .....	22
Tabulka 3 .....	23
Tabulka 4 – parametry IO LT8708.....	24
Tabulka 5 (Převzato z [19]).....	39
Tabulka 6 (převzato z [11]) .....	40
Tabulka 7 – (převzato z [21]) .....	40
Tabulka 8 (převzato z [22]) .....	40
Tabulka 9 (převzato z [23]) .....	41
Tabulka 10 .....	50
Tabulka 11 .....	51
Tabulka 12 .....	52
Tabulka 13 – výsledné parametry měniče .....	56

## Přílohy

Příloha 1 – soupis použitých součástek v řídicí části měniče.....	62
Příloha 2 – soupis použitých součástek ve výkonové části měniče.....	63
Příloha 3 – Průběh napětí na induktoru v kladném toku proudu nezatíženého měniče (režim BOOST) .....	63
Příloha 4 – Průběh spínání tranzistoru 1 při kladném toku proudu nezatíženého měniče (režim BOOST) .....	64
Příloha 5 – Průběh napětí na induktoru v kladném toku proudu plně zatíženého měniče (Režim BOOST) .....	64
Příloha 6 – Průběh řídicího napětí spínacího tranzistoru 4 při kladném směru proudu (režim BOOST) .....	65
Příloha 7 – Průběh řídicího napětí spínacího tranzistoru 2.....	65
Příloha 8 – Schéma zapojení řídicí desky vyhotovené v programu EAGLE .....	66
Příloha 9 – Schéma zapojení výkonové desky v programu EAGLE.....	67

Příloha 1 – soupis použitých součástek v řídicí části měniče

Part	Value	Package	Library	Position (mm)	Orientation
C-CSNIN	0.1uF	C050-030X075	rc1	(66.7258 24.1554)	R270
C-CSPIN-CSNIN	47nF/5V	C050-035X075	rc1	(24.8158 69.723)	R0
C-SS	1uF	C050-030X075	rc1	(33.02 11.049)	R270
C1	1nF	C050-035X075	rc1	(24.765 11.176)	R270
C2	4.7uF	C050-030X075	rc1	(39.497 8.509)	R0
C3	4.7uF/100V	C050-030X075	rc1	(79.4004 29.7942)	R0
C4	4.7uF/100V	C050-030X075	rc1	(64.9732 16.51)	R270
C5	1nF	C050-030X075	rc1	(46.9392 12.6492)	R270
C6	100pF	C050-030X075	rc1	(4.826 33.401)	R270
C7	4.7uF/100V	C050-030X075	rc1	(61.6458 18.034)	R270
C8	4.7uF/100V	C050-030X075	rc1	(48.2346 46.8376)	R270
C10	3.3nF	C050-035X075	rc1	(45.2374 20.32)	R270
C11	470pF	C050-030X075	rc1	(16.129 35.56)	R180
C12	18nF	C050-030X075	rc1	(16.129 32.131)	R180
C14	4.7nF	C050-030X075	rc1	(54.2798 12.6492)	R270
C15	4.7nF	C050-030X075	rc1	(21.209 11.176)	R270
C16	47nF/5V	C050-035X075	rc1	(77.724 22.4536)	R270
C17	47nF/5V	C050-035X075	rc1	(32.9438 60.8584)	R270
C18	0.22uF	C050-030X075	rc1	(67.2846 50.3936)	R270
C19	10nF	C050-030X075	rc1	(57.7088 9.7282)	R270
C21	10nF	C050-030X075	rc1	(16.129 39.116)	R180
C22	10nF	C050-030X075	rc1	(24.8158 43.3324)	R90
C23	100pF	C050-030X075	rc1	(20.955 48.641)	R0
C24	4.7nF	C050-030X075	rc1	(77.6986 33.1216)	MR180
C25	0.22uF	C050-030X075	rc1	(55.88 54.7878)	R180
D1	1N4003	D041-10	diode	(49.8094 57.8104)	R0
D2	1N4003	D041-10	diode	(59.5884 49.2506)	R180
D3	DFLS1100	D041Z10	diode	(78.486 53.594)	R0
D4	DFLS1100	D041Z10	diode	(78.486 55.7784)	R0
DIR-PULLUP	100K	0207/10	rc1	(25.527 24.257)	MR0
R(RSNS1+)	10	0207/10	rc1	(27.051 62.3316)	R90
R-BG	1	0207/10	rc1	(45.339 66.294)	R270
R-FBOUT(SET)	50K	S64W	pot	(85.2932 73.5838)	R90
R-IMON_INN	18,7K	0207/10	rc1	(11.303 45.339)	R0
R-IMON_INP	16K	0207/10	rc1	(11.303 42.799)	R0
R-MODE(BURST)	14.7K	0207/10	rc1	(9.5758 13.7414)	R90
R-MODE(DCM)	10K	0207/10	rc1	(6.985 13.7922)	R90
R-MODE(HCM)	10K	0207/10	rc1	(4.3942 13.843)	R270
R-RSNS3+	1	0207/10	rc1	(75.8698 72.1106)	R90
R-RSNS3-	1	0207/10	rc1	(78.8416 73.8632)	R90
R-RT	365k	0207/10	rc1	(11.303 47.879)	R0
R-SYNC	100K	0207/10	rc1	(11.303 50.419)	R0
R-TG	1	0207/10	rc1	(36.2712 63.9318)	R270
R1	100K	0207/10	rc1	(3.1496 27.2288)	R90
R1-FBIN	8.6K	0207/10	rc1	(6.9088 56.0578)	R180
R1-FBIN(SET)	1K	S64W	pot	(11.9634 69.2658)	R270
R1-FBOUT	110K	0207/10	rc1	(11.049 35.56)	R90
R1-SCHDN	665K	0207/10	rc1	(53.4924 19.3802)	R180
R1FBIN-RVS	70K	0207/10	rc1	(6.7564 59.309)	R180
R1FBIN-RVS(SET)	600K	S64W	pot	(9.017 69.2658)	R90
R2	100K	0207/10	rc1	(8.6614 62.2554)	R180
R2-FBOUT	12,1K	0207/10	rc1	(30.48 30.099)	R0
R2-SHDN	100k	0207/10	rc1	(28.956 19.05)	R180
R2FBIN	900	0207/10	rc1	(31.623 26.797)	R0
R2FBIN(RVS-UP)	27,4K	0207/10	rc1	(14.986 26.924)	R0
R5	261K	0207/10	rc1	(6.9342 53.467)	R180
R6	68.1K	0207/10	rc1	(25.2476 55.6514)	R180
R7	21.5K	0207/10	rc1	(25.2984 53.1368)	R180
R9	17.4K	0207/10	rc1	(79.3496 38.0238)	R180
R10	10K	0207/10	rc1	(32.004 33.147)	R0
R11	20K	0207/10	rc1	(79.3496 13.1572)	R180
R12	10	0207/10	rc1	(29.6672 62.3824)	R90
R13	3.3	0207/10	rc1	(49.911 51.8668)	R0
R20	17.4K	0207/10	rc1	(24.638 16.764)	R0
R21	17.4K	0207/10	rc1	(79.3496 10.541)	R180
R22	1	0207/10	rc1	(48.4378 65.3542)	R270
R28	100K	0207/10	rc1	(77.8002 16.1798)	R0
R41	100K	0207/10	rc1	(78.3336 8.2042)	R180
R45	1	0207/10	rc1	(54.7624 65.9892)	R270
R100	12.1K	0207/10	rc1	(88.2904 52.324)	R90
R200	178K	0207/10	rc1	(79.3496 42.418)	R0
R300	154K	0207/10	rc1	(88.3158 63.9572)	R90
RIN	0	0207/10	rc1	(1.6764 65.7352)	R90
ROUT	1	0207/10	rc1	(88.2904 75.5142)	R90
T1	PMV40UN2	SOT-23	zetex	(8.255 30.353)	MR180
T2	PMV40UN2	SOT-23	zetex	(6.604 25.527)	MR0
T3	PMV40UN2	SOT-23	zetex	(14.5288 59.8805)	MR90
T4	PMV40UN2	SOT-23	zetex	(8.255 33.655)	MR270
U1	LT8708EUHG-1LQFP-64_10X10X1.6_NXP-M	LQFP-64_10X10X1.6_NXP-M	LT8708	(56.8706 32.0548)	MR180

Příloha 2 – soupis použitých součástek ve výkonové části měniče

Part	Value	Package	Library	Position (mm)	Orientation
C1		C1210	rc1	(11.9634 33.2364)	MR0
C2		C1210	rc1	(138.0744 31.9824)	MR180
C3		C1210	rc1	(35.0266 14.986)	MR270
C4		C1210	rc1	(114.5794 15.24)	MR270
LLS1V392MELZ	3900uF	EB22,5D	rc1	(11.9126 20.0538)	R180
LLS1V392MELZ1	3900uF	EB22,5D	rc1	(11.8872 57.6966)	MR0
LLS1V392MELZ4	3900uF	EB22,5D	rc1	(138.0236 56.7982)	MR180
LLS1V392MELZ5	3900uF	EB22,5D	rc1	(138.0236 18.9522)	MR180
Q1	SER2915L-153KL	TRAN_SER2915L-153KL_COC	ul_SER2915L153KL	(74.9808 63.6524)	MR0
RSNS1		R2512	rc1	(27.1526 47.8536)	MR180
RSNS2		R2512	rc1	(123.0376 46.9646)	MR180
RSNS3		R2512	rc1	(79.8322 15.3162)	MR90
RSNS4		R2512	rc1	(27.1526 40.9956)	MR180
RSNS5		R2512	rc1	(123.0376 41.8846)	MR180
RSNS6		R2512	rc1	(73.2282 15.3162)	MR90
U\$1	XT90-M	AMASS_XT90-M	XT90	(11.938 40.3484)	R0
U\$2	XT90-FAMASS_XT90-F	AMASS_XT90-F	XT90	(138.0236 38.9674)	R180
U1	A0B2144L	TO-263-3_AOS-M	A0B2144L	(99.2632 57.3532)	MR0
U2	A0B2144L	TO-263-3_AOS-M	A0B2144L	(49.9872 57.6072)	MR0
U3	A0B2144L	TO-263-3_AOS-M	A0B2144L	(66.6242 28.7782)	MR180
U4	A0B2144L	TO-263-3_AOS-M	A0B2144L	(84.1502 28.9052)	MR180
U5	A0B2144L	TO-263-3_AOS-M	A0B2144L	(36.9062 57.6072)	MR0
U7	A0B2144L	TO-263-3_AOS-M	A0B2144L	(112.3188 57.3532)	MR0
U8	A0B2144L	TO-263-3_AOS-M	A0B2144L	(53.2892 28.7782)	MR180
U9	A0B2144L	TO-263-3_AOS-M	A0B2144L	(97.3582 28.9052)	MR180

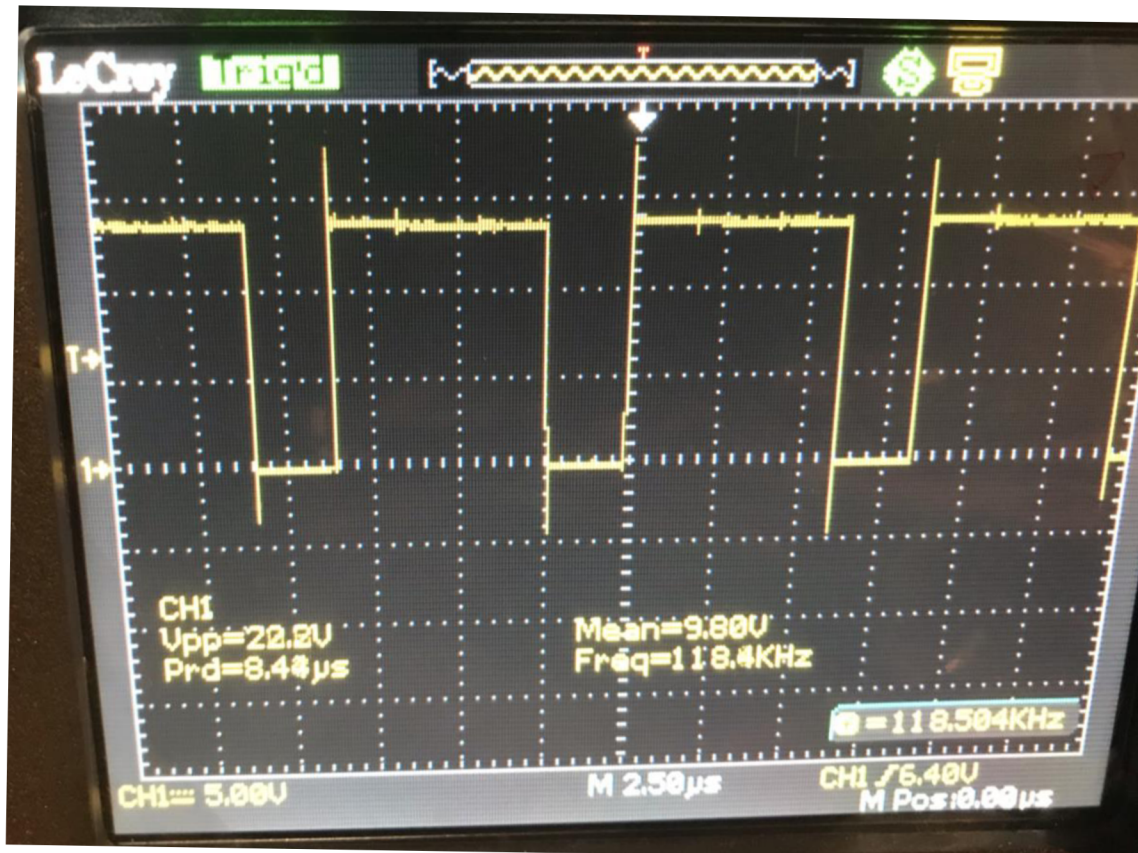
Příloha 3 – Průběh napětí na induktoru v kladném toku proudu nezatíženého měniče (režim BOOST)



Příloha 4 – Průběh spínání tranzistoru 1 při kladném toku proudu nezátíženého měniče (režim BOOST)

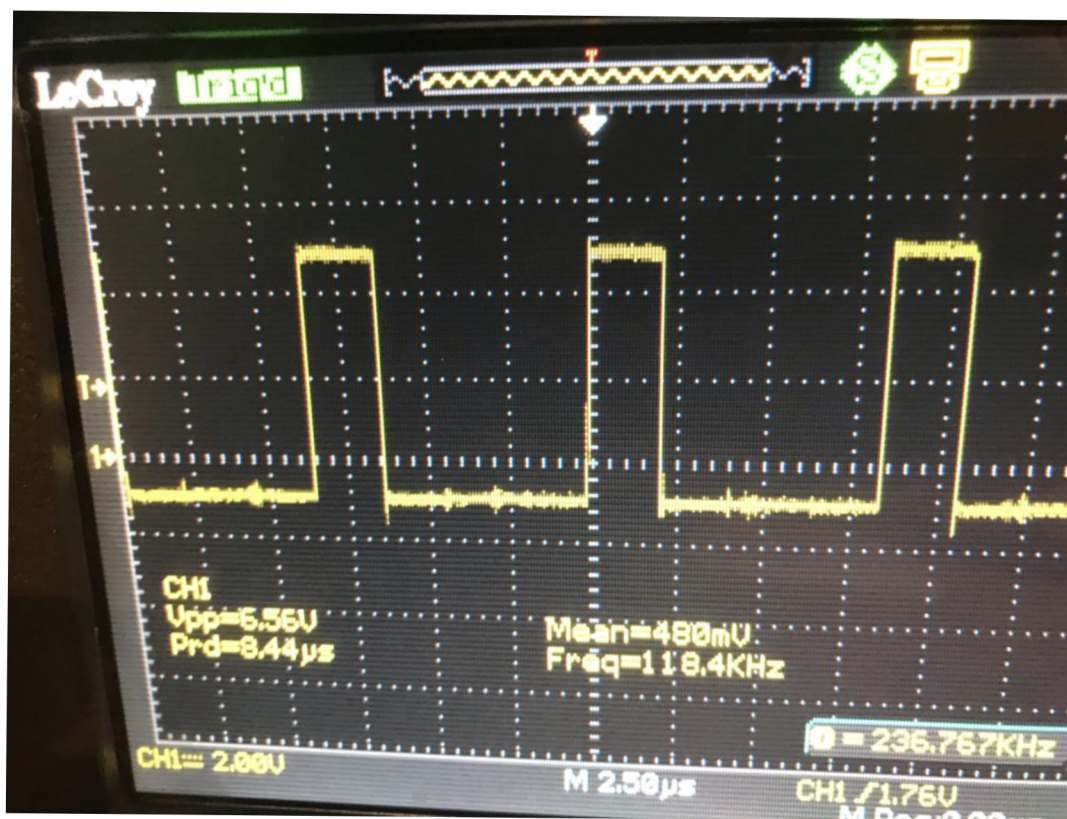


Příloha 5 – Průběh napětí na induktoru v kladném toku proudu plně zatíženého měniče (Režim BOOST)





Příloha 6 – Průběh řídicího napětí spínacího tranzistoru 4 při kladném směru proudu (režim BOOST)



Příloha 7 – Průběh řídicího napětí spínacího tranzistoru 2

