



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra mikroelektroniky

**DC-DC měnič pro maximální efektivitu využití
energie akumulované v superkondenzátoru**

**DC-DC Converter for Maximum Efficiency
of Energy Stored in the Supercapacitor**

Bakalářská práce

Studijní program: Elektronika a komunikace

Vedoucí práce: Ing. Lubor Jirásek, CSc.

**David Touš
Praha 2020**



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Touš Jméno: David Osobní číslo: 474255
Fakulta/ústav: Fakulta elektrotechnická
Zadávající katedra/ústav: Katedra mikroelektroniky
Studijní program: Elektronika a komunikace

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

DC-DC měnič pro maximální efektivitu využití energie akumulované v superkondenzátoru

Název bakalářské práce anglicky:

DC-DC Converter for Maximum Efficiency of Energy Stored in the Supercapacitor

Pokyny pro vypracování:

1. Prostudujte literaturu týkající se DC/DC měničů umožňujících pracovat s velmi nízkým vstupním napětím.
2. Na základě 1. navrhnete a realizujete zdroj napětí s ohledem na možnou aplikaci např. ve svítidlách se svítilkami.
3. Otestujte funkčnost realizovaného přístroje a proveďte měření dosažených parametrů.
4. Zhodnoťte dosažené výsledky a navrhnete možná budoucí řešení.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Krejčířik, A.: Napájecí zdroje I. - III. Ben, Praha 1996 v pozdějších reedicích.
- [2] Aplikáční poznámky firem STMicroelectronics, Analog Devices, TI a dalších, týkajících se měničů s extrémně nízkým vstupním napětím.
- [3] FAKTOR, Z. Transformátory a tlumivky pro spínané napájecí zdroje. 1. vyd. Praha: BEN,

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Lubor Jirásek, CSc., katedra mikroelektroniky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: 06.02.2020 Termín odevzdání bakalářské práce: _____

Platnost zadání bakalářské práce: 30.09.2021

Ing. Lubor Jirásek, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Pavel Hazdra, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení:

„Prohlašuji, že jsem zadanou bakalářskou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.“

V Praze dne

Podpis:

Poděkování:

Děkuji vedoucímu této bakalářské práce, panu Ing. Luboru Jiráskovi, CSc., za vedení práce, za jeho rady a připomínky, za jeho čas věnovaný konzultacím se mnou (ať už osobně či online) i za jeho trpělivost, kterou se mnou měl.

Abstrakt

V této práci je popsána teorie, zapojení a vlastnosti DC/DC měničů včetně měničů pracujících s velmi nízkým vstupním napětím. Praktickou částí této práce je návrh, realizace a testování DC/DC měniče napětí schopného pracovat s velmi nízkým vstupním napětím a maximalizovat tak využití akumulované energie v superkondenzátoru. Tento měnič bude určen k napájení bílé LED. Měnič bude použit i pro výukové účely.

Klíčová slova: superkondenzátor, DC/DC měnič, velmi nízké napětí

Abstract

This thesis describes theory, schematics and characteristics of DC/DC converters including converters working with very low input voltages. Practical part of this thesis consists of designing, creating and measuring a DC/DC converter capable of working with a very low input voltage to maximize the use of accumulated energy in a supercapacitor. This converter is determined for powering a white LED. The converter may be used for teaching purposes.

Keywords: supercapacitor, DC/DC converter, very low voltage

Obsah

1 Úvod	11
2 Vlastnosti superkondenzátorů	12
3 DC/DC měniče	13
3.1 Lineární měniče.....	14
3.2 Měniče se spínanými kondenzátory	15
3.3 Měniče s induktory.....	16
3.3.1 Zvyšující měnič.....	16
3.3.2 Snižující měnič.....	16
3.3.3 Invertující měnič	17
3.4 Měniče s transformátory.....	17
3.4.1 Blokující zapojení	18
3.4.2 Propustné zapojení	18
3.4.3 Dvojčinné zapojení	19
3.5 CCM a DCM.....	19
3.6 Řízení měničů s indukčnostmi	20
3.6.1 Měniče s IO.....	20
3.6.2 Samokmitající měniče.....	22
3.7 Ochrany spínacích prvků.....	23
4 Měniče pracující s velmi nízkým napětím.....	25
4.1 Měniče bez IO – „Joule Thief“	25
4.2 Nábojové pumpy – obvod S-882Z	26
4.3 Měniče s IO s indukčnostmi.....	27
4.3.1 IO LTC3108.....	27
4.3.2 IO LTC3421	29

5 Návrh DC/DC měniče.....	30
5.1 Návrh měniče pro napájení LED	30
5.1.1 Výběr DC/DC kontroléru step-up měniče	30
5.1.2 Snímání proudu tekoucího LED	32
5.1.3 Snímání proudu tekoucího induktorem.....	34
5.1.4 Výběr induktoru.....	36
5.1.5 Výběr spínacích tranzistorů a filtračních kondenzátorů	36
5.2 Návrh startovacího měniče.....	37
5.2.1 Výběr spínacího tranzistoru	37
5.2.2 Návrh a popis zapojení	38
5.2.3 Synchronní usměrnění	42
5.2.4 Výběr jádra transformátoru a vinutí.....	43
5.3 Vypínání měničů.....	43
6 Výroba přípravku, oživování	46
7 Vlastnosti realizovaných měničů	48
7.1 Vlastnosti měniče pro napájení LED	48
7.2 Vlastnosti startovacího měniče	51
8 Zhodnocení výsledků	53
9 Závěr	55
10 Použitá literatura	56
11 Příloha	60
11.1 Dokumentace k přípravku.....	60
11.2 Tabulky naměřených hodnot.....	67
11.3 Protokol k měření.....	75

Seznam tabulek

Tab. 1: Seznam použitých součástek.....	61
Tab. 2: Převodní charakteristika měniče pro napájení LED.....	67
Tab. 3: Zatěžovací charakteristika měniče pro napájení LED.....	68
Tab. 4: Účinnost měniče pro napájení LED v závislosti na vstupním napětí, $I_{nast} = 75 \text{ mA}$	69
Tab. 5: Účinnost měniče pro napájení LED v závislosti na vstupním napětí, $I_{nast} = 190 \text{ mA}$	70
Tab. 6: Převodní charakteristika startovacího měniče.....	71
Tab. 7: Zatěžovací charakteristika startovacího měniče.....	72
Tab. 8: Účinnost startovacího měniče v závislosti na vstupním napětí, $U_{OUT} = 3,9 \text{ V}$	73
Tab. 9: Účinnost startovacího měniče v závislosti na vstupním napětí, $U_{OUT} = 6,2 \text{ V}$	74

Seznam obrázků

Obr. 1: Modelový graf průběhu napětí na superkondenzátoru v závislosti na relativní akumulované energii.	13
Obr. 2: Struktura superkondenzátoru (převzato z [2]).....	13
Obr. 3: Lineární měnič (stabilizátor): a) se Zenerovou diodou, b) s tranzistorem a Zenerovou diodou, c) s integrovaným obvodem L7805.....	14
Obr. 4: Schéma zapojení nábojové pumpy: a) zdvojovač napětí, b) zdroj záporného napětí.....	15
Obr. 5: Schéma zapojení zvyšujícího měniče.....	16
Obr. 6: Schéma zapojení snižujícího měniče.	17
Obr. 7: Schéma zapojení invertujícího měniče.....	17
Obr. 8: Schéma zapojení blokujícího měniče.....	18
Obr. 9: Schéma zapojení propustného měniče.	19
Obr. 10: Schéma zapojení dvojjmenného měniče.	19

Obr. 11: Porovnání průběhu proudu v induktoru: a) DCM a b) CCM, převzato z [14].	20
Obr. 12: Snímání proudu tekoucího indukčností pomocí snímacího rezistoru.	21
Obr. 13: Snímání proudu tekoucího indukčností s využitím DCR metody.	22
Obr. 14: Schéma zapojení blokujícího měniče, převzato z [35].	23
Obr. 15: Schéma zapojení ochranných obvodů na blokujícím měniči.	24
Obr. 16: Schéma obvodu „Joule Thief“.	26
Obr. 17: Blokové schéma IO S-882Z, převzato z [20].	27
Obr. 18: Blokové schéma IO LTC 3108, převzato z [21].	28
Obr. 19: Blokové schéma IO LTC3421, převzato z [22].	29
Obr. 20: Blokové schéma zapojení IO LTC3786, převzato z [23].	31
Obr. 21: Schéma zapojení měniče pro napájení LED.	33
Obr. 22: Základní zapojení rozdílového zesilovače s OZ.	34
Obr. 23: Schéma zapojení startovacího měniče.	39
Obr. 24: Blokové schéma synchronního usměrňovače DK5V45R20, převzato z [33].	42
Obr. 25: Schéma zapojení vypínání měničů.	44
Obr. 26: Převodní charakteristika měniče pro napájení LED.	49
Obr. 27: Zatěžovací charakteristika měniče pro napájení LED, $I_{nast} = 75 \text{ mA}$.	50
Obr. 28: Zatěžovací charakteristika měniče pro napájení LED, $I_{nast} = 190 \text{ mA}$.	50
Obr. 29: Účinnost měniče pro LED v závislosti na vstupním napětí.	51
Obr. 30: Převodní charakteristika startovacího měniče.	52
Obr. 31: Zatěžovací charakteristika startovacího měniče.	52
Obr. 32: Účinnost startovacího měniče v závislosti na vstupním napětí.	53
Obr. 33: Schéma měničů pro zvyšování napětí ze superkondenzátoru.	60
Obr. 34: Návrh motivu DPS.	63
Obr. 35: Osazovací plán DPS – THT monzáž – pohled shora.	64

Obr. 36: Osazovací plánek DPS – SMD montáž – pohled zdola (zrcadlově).....	64
Obr. 37: Osazená DPS – pohled shora.	65
Obr. 38: Osazená DPS – pohled z boku.	65
Obr. 39: Osazená DPS – pohled zdola.	66

Seznam použitých značek a symbolů

CCM		Continuous Conduction Mode
DCM		Discontinuous Conduction Mode
DPS		Deska plošných spojů
ESR		Ekvivalentní sériový odpor
IO		Integrovaný obvod
LDO		Low Dropout Output stabilizátor
OZ		Operační zesilovač
PWM		Pulzně-šířková modulace
R_{DSon}	(Ω)	Odpor kanálu unipolárního tranzistoru v sepnutém stavu
U_{DS}	(V)	Napětí mezi drainem a sourcem
U_{GS}		Napětí mezi řídicí elektrodou a sourcem

1 Úvod

Superkondenzátory se dnes používají především jako úložiště energie sloužící k rychlému uložení elektrické energie nebo k rychlému čerpání energie v nich uložené, zároveň se ale začínají vyskytovat např. i v zařízeních, která kladou důraz na spolehlivost zdroje uložené energie, mj. v některých svítelnách. Pro maximální využití energie akumulované v superkondenzátoru bude navržen měnič pro napájení bílé LED schopný pracovat i při nízkých vstupních napětích.

V následujících kapitolách této práce jsou uvedeny základní informace o superkondenzátorech, teorie DC/DC měničů včetně měničů určených pro malá vstupní napětí, jejich typická zapojení a vlastnosti a dále pak samotný návrh měniče, jeho výroba a měření. DC/DC měnič je zapojen jako zvyšující (step-up) měnič, který se chová jako zdroj konstantního proudu s možností nastavení proudu. Jako DC/DC kontrolér pro řízení tohoto měniče je použit IO LTC3786. Pro generaci potřebného napětí pro start tohoto IO je realizován druhý DC/DC měnič – samokmitající měnič koncepce flyback, který bude po startu IO vypnut.

Pro ověření těchto měničů budou změřeny jejich převodní a zatěžovací charakteristiky, dále pak účinnost v závislosti na vstupním napětí. Měniče budou testovány na laboratorním zdroji a na dvojici paralelně zapojených superkondenzátorů o udávané kapacitě 22 F.

2 Vlastnosti superkondenzátorů

Superkondenzátor je pasivní součástka schopná ukládat elektrickou energii. Od klasických (elektrolytických) kondenzátorů se liší zejména násobně vyšší kapacitou, která se u těchto kondenzátorů pohybuje obvykle v řádu jednotek až tisíců faradů. Maximální napětí superkondenzátorů bývá obvykle 2,5 V nebo 2,7 V. Mezi výhody superkondenzátorů proti nabíjecím bateriím patří jejich malý vnitřní odpor, schopnost dodávat velké proudy a s tím související schopnost rychlého nabití či vybití, dále vyšší rozsah pracovních teplot a velmi vysoký počet nabíjecích cyklů. Mezi nevýhody patří relativně vysoká cena, nízké napětí na článek (pro vyšší napětí nutno zapojit více superkondenzátorů do série, tedy i nutnost vybavení balancerem pro sledování napětí na každém kondenzátoru), relativně velký svodový proud, proti akumulátorům malé množství uložené energie na jednotku hmotnosti či objemu a také fakt, že napětí na superkondenzátoru (při vybíjení/nabíjení) se mění v závislosti na uložené energii v superkondenzátoru od 0 V až po maximální napětí. [1]

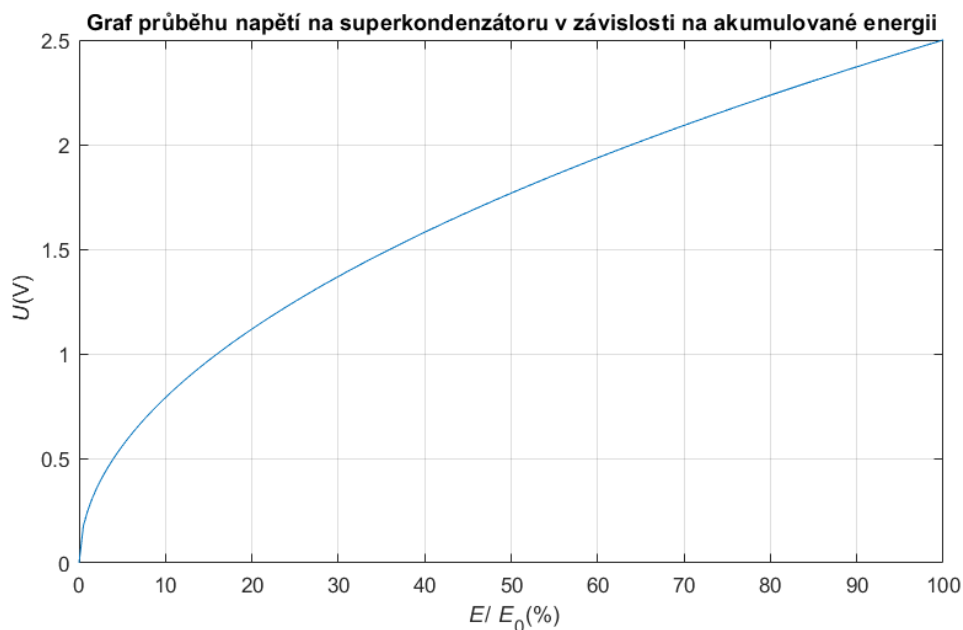
Uložená energie v superkondenzátoru se dle [2] vypočte ze vztahu (1):

$$E = \frac{1}{2}CU^2, \quad (1)$$

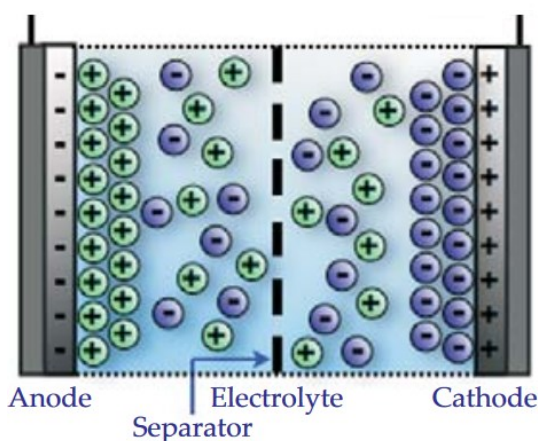
kde C je kapacita superkondenzátoru a U je napětí na superkondenzátoru. Na obr. 1 je graf modelového průběhu napětí na superkondenzátoru v závislosti na uložené energii v superkondenzátoru; graf vychází z výše uvedeného vzorce.

Superkondenzátor se skládá ze dvou elektrod, anody a katody, které jsou vyrobeny z hliníku. Na vnitřní vrstvě elektrod je nanesen aktivní uhlík pro zvětšení kontaktní plochy elektrod, resp. kapacity superkondenzátoru. Při nabíjení superkondenzátoru se díky napětí na elektrodách začnou ionty elektrolytu přesouvat k jednotlivým elektrodám a na elektrodách tvořit dvouvrstvu. Na obr. 2 je zobrazena struktura superkondenzátoru s nábojem na elektrodách. [2, 3]

Superkondenzátory se dnes využívají zejména pro rychlé ukládání/spotřebování energie – např. při rekuperačním brzdění (pro její následné spotřebování při rozjezdu) nebo ke startování spalovacích motorů při extrémně nízkých teplotách, ve kterých klasické akumulátory nejsou schopny dodat dostatečně velké proudy. Superkondenzátory se vyskytují např. i v některých svítilnách. [1]



Obr. 1: Modelový graf průběhu napětí na superkondenzátoru v závislosti na relativní akumulované energii.



Obr. 2: Struktura superkondenzátoru (převzato z [2]).

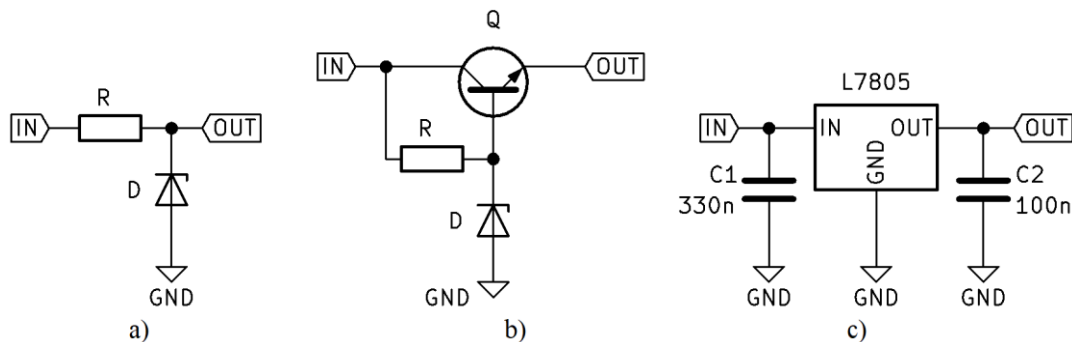
3 DC/DC měniče

DC/DC měniče umožňují měnit stejnosměrné napětí o určité hodnotě na napětí o jiné hodnotě. Tyto měniče jsou v dnešní době velmi rozšířené – vyskytují se téměř ve veškeré elektronice od mobilních telefonů, notebooků či powerbank přes LED svítidla až po např. svářecí invertory. V následujících podkapitolách budou zmíněny základní kategorie měničů stejnosměrného napětí: lineární měniče, měniče se spínanými kondenzátory (nábojové pumpy), měniče s induktory a měniče s transformátory. Dále bude uvedeno řízení měničů s indukčnostmi, rozdíl mezi měničem pracujícím v DCM a CCM módu a zapojení ochranných obvodů spínacích prvků.

3.1 Lineární měniče

Asi nejjednodušším typem měničů jsou měniče lineární. Lineární měniče (stabilizátory) dělíme dle zapojení na sériové a paralelní. [4]

Příklad paralelního zapojení stabilizátoru napětí se Zenerovou diodou je na obr. 3 a). Napětí na výstupu tohoto stabilizátoru je rovno Zenerovu napětí použité diody. Nevýhoda paralelního zapojení je, že při odpojení zátěže protéká veškerý proud stabilizačním prvkem, který na to musí být dimenzovaný; paralelní zapojení proto mívá nižší účinnost než zapojení sériové. Proto se stabilizátory v paralelním zapojení používají především jako napěťové reference. Příklad IO napěťové reference je např. obvod TL431. [5]



Obr. 3: Lineární měnič (stabilizátor): a) se Zenerovou diodou, b) s tranzistorem a Zenerovou diodou, c) s integrovaným obvodem L7805.

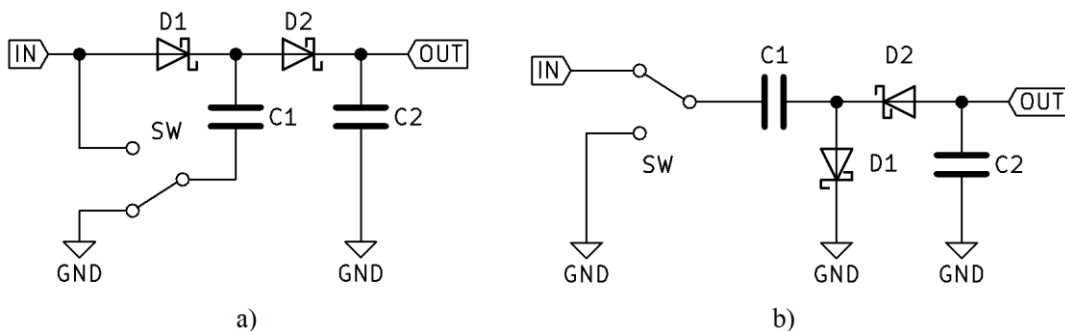
Příklad sériového zapojení stabilizátoru s tranzistorem a Zenerovou diodou je na obr. 3 b). Napětí měniče závisí na napětí Zenerovy diody; napětí na výstupu je přibližně rovné Zenerovu napětí diody po odečtení úbytku napětí přechodu báze-emitor NPN tranzistoru, které bývá kolem 0,65 V. K dostání jsou běžně i integrované obvody lineárních stabilizátorů, např. obvody řady 78xx. Zapojení sériového stabilizátoru s obvodem 7805 (který stabilizuje výstupní napětí na 5 V) je zobrazeno na obr. 3 c), podrobnosti viz [6]. Minimální úbytek napětí na sériových stabilizátorech bývá v řádu jednotek voltů.

Existují i stabilizátory s nízkým úbytkem napětí, tzv. LDO, které mívají minimální úbytek napětí v řádu stovek milivoltů. Lineární stabilizátory v sériovém zapojení bývají použity k napájení různých obvodů vyžadující konstantní napětí. Při odpojení zátěže jimi teče pouze tzv. klidový proud, na rozdíl od stabilizátorů v paralelním zapojení proto mívají vyšší účinnost. [7]

Výhoda lineárních měničů spočívá v jejich jednoduchosti a obvykle malém zvlnění výstupního napětí. Mezi nevýhody patří typicky nižší účinnost (v porovnání s ostatními typy měničů), která závisí mj. na rozdílu vstupního a výstupního napětí, a nemožnost zvyšování napětí. [8]

3.2 Měniče se spínanými kondenzátory

Další kategorií jsou měniče se spínanými kondenzátory, též známé jako nábojové pumpy. Na obr. 4 a) je příklad zapojení zdvojovače napětí, podrobnosti viz [9]. Kondenzátor C1 je přes D1 a spínač SW sepnutý na společný vodič (na obrázku označen jako GND) nabit na napájecí napětí (snížené o úbytek na diodě D1). Po přepnutí přepínače SW je C1 připojen na napájecí napětí a přes D2 se nabíjí kondenzátor C2 na součet napájecího napětí a napětí na C1 snížené o úbytek napětí na D2. Při zanedbání úbytků napětí na diodách je tak výstupní napětí rovno dvojnásobku napětí vstupního, tj. $U_{OUT} = 2U_{IN}$. Přepínač SW je poté opět přepnut do původního stavu a děj se periodicky opakuje.



Obr. 4: Schéma zapojení nábojové pumpy:

a) zdvojovač napětí, b) zdroj záporného napětí.

Pro vytvoření záporného napětí slouží zapojení na obr. 4 b), podrobnosti viz [9]. Kondenzátor C1 se přes spínač a diodu D1 nabije na vstupní napětí (snížené o úbytek na D1). Po přepnutí přepínače je C1 připojen spínačem na společný vodič a kondenzátor C2 se přes diodu D2 nabíjí na stejné napětí, jako je napětí na C1 (snížené o úbytek napětí na D2). Přepínač SW je poté přepnut do původní polohy a děj se periodicky opakuje. Při zanedbání úbytků na diodách je výstupní napětí rovno vstupnímu napětí s opačným znaménkem, tj. $U_{OUT} = -U_{IN}$.

Místo mechanického přepínače je obvykle použit elektronický (např. generátor obdélníkového signálu o požadované frekvenci – lze využít astabilní klopné obvody, např. známý IO 555, nebo IO přímo určené pro nábojové pumpy. Nevýhoda nábojových pump je ta, že obvykle

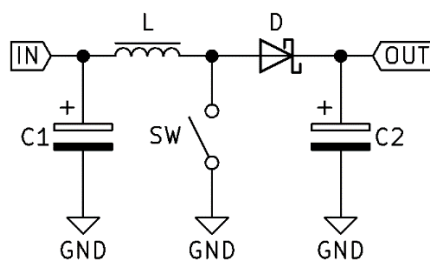
nejsou schopny dodávat velké proudy, mají větší zvlnění (v případě nutnosti možná filtrace napětí). Výstupní napětí je závislé na vstupním napětí. Jako výhodu lze uvést jednoduchost zapojení. [9]

3.3 Měníče s induktory

Měníče s induktory se používají zejména pro nízká napětí tam, kde vstup měniče nemusí být od výstupu galvanicky oddělen. Jako spínací tranzistor se používá obvykle tranzistor MOSFET. Pracovní kmitočet bývá volen nad 20 kHz. Měníče s induktory dosahují účinnosti až kolem 90 %, mají ale na rozdíl od lineárních měničů obvykle větší zvlnění na výstupu a mohou do okolí vyzařovat rušící signál. [10, 11, 13]

3.3.1 Zvyšující měnič

Schéma zapojení zvyšujícího (step-up) měniče je na obr. 5. Při sepnutí spínače SW začne proud tekoucí induktorem L lineárně růst a v induktoru se začne akumulovat energie v podobě magnetického pole. Po rozepnutí spínače SW se orientace napětí na induktoru obrátí, napětí na induktoru se sečte s napětím na vstupu, proud poteče ze vstupu a z C1 přes induktor L, diodu D do kondenzátoru C2 a na výstup; energie akumulovaná v induktoru se uvolňuje. Proud tekoucí induktorem lineárně klesá až do chvíle opětovného sepnutí SW, poté se celý děj opakuje. Jako spínač lze použít např. MOSFET tranzistor s kanálem N. Pokud zanedbáme úbytek napětí na diodě, můžeme tvrdit, že napětí na výstupu může být větší nebo rovno napětí vstupnímu, tedy $U_{OUT} \geq U_{IN}$. Nevýhoda tohoto měniče je, že i při nečinnosti tohoto měniče (trvale vypnutém spínači SW) je při přítomnosti napětí na vstupu toto napětí i na výstupu. [10, 11]

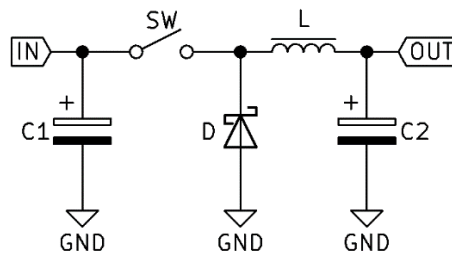


Obr. 5: Schéma zapojení zvyšujícího měniče.

3.3.2 Snižující měnič

Schéma zapojení snižujícího měniče je zobrazeno na obr. 6. Při sepnutí spínače SW začne téct proud ze vstupu a kondenzátoru C1 přes SW a induktor L na výstup a do kondenzátoru C2,

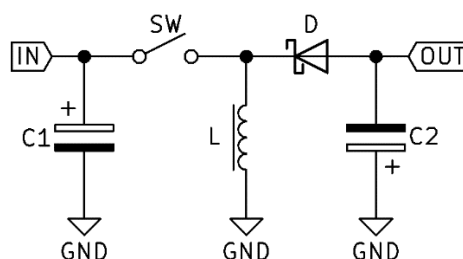
proud tekoucí induktorem začne lineárně růst a v induktoru se začne akumulovat energie. Po rozeptnutí SW napětí na induktoru změní orientaci a proud poteče z induktoru L do C2, na výstup a přes D zpět do L. Proud tekoucí induktorem bude lineárně klesat do doby, než opět sepne spínač SW. Jako spínač lze použít např. MOSFET tranzistor s kanálem P, popř. s kanálem N s plovoucím buzením. Napětí na výstupu tohoto měniče může být menší nebo rovno napětí vstupnímu, tedy $U_{OUT} \leq U_{IN}$. [10, 11]



Obr. 6: Schéma zapojení snižujícího měniče.

3.3.3 Invertující měnič

Příklad zapojení invertujícího měniče je uveden na obr. 7. Při sepnutí spínače SW začne téct proud ze vstupu a z kondenzátoru C1 induktorem L. Proud induktorem lineárně poroste, v induktoru se začne akumulovat energie. Po rozeptnutí SW napětí na induktoru změní orientaci a proud poteče z L přes kondenzátor C2, diodu D zpět do induktoru. Proud induktorem bude lineárně klesat, dokud SW opět neseptne. Poté se děj začne opakovat. Napětí na výstupu tohoto měniče je záporné (popř. nulové), tj. $U_{OUT} \leq 0$. [10, 11]



Obr. 7: Schéma zapojení invertujícího měniče.

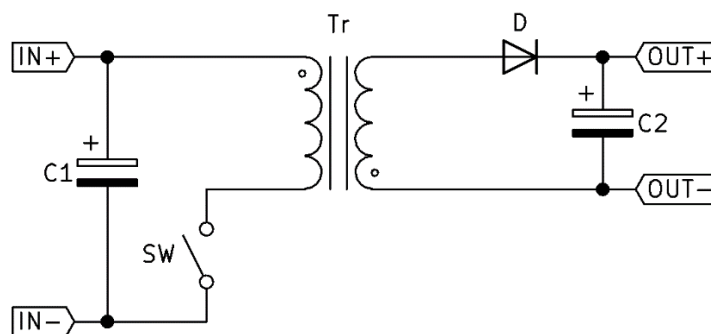
3.4 Měniče s transformátory

Další kategorie měničů jsou měniče s transformátorem. Používají se v případech, kdy je třeba měnit napětí na značně vyšší nebo nižší hodnotu, než je hodnota zdroje napětí, tam, kde vstupní napětí je třeba měnit na více (různých) hodnot napětí na výstupu, a dále pak při nutnosti galvanického oddělení vstupu a výstupu měniče. Jako spínací prvky bývají použity tranzistory

MOSFET (s kanálem N), bipolární NPN tranzistory, příp. pro vyšší napětí a proudy IGBT tranzistory. Pracovní kmitočet bývá obvykle nad 20 kHz. Měníče s transformátory dosahují, podobně jako měniče s induktory, účinnosti kolem 80 %, proti lineárním měničům mají obvykle větší zvlnění na výstupu mohou do okolí vyzařovat rušící signál. [10, 12]

3.4.1 Blokující zapojení

Příklad zapojení blokujícího (jinak též akumulujícího či flyback) měniče je na obr. 8. Při sepnutí spínače SW začne protékat proud primárním vinutím. Proud lineárně poroste a v transformátoru se bude akumulovat energie v podobě magnetického pole. Na sekundárním vinutí bude napětí orientované tak, že dioda D bude v nevodivém stavu. Po rozepnutí SW se orientace napětí na vinutích obrátí a proud poteče sekundárním vinutím přes diodu D do kondenzátoru C2 a na výstup. Proud tekoucí sekundárním vinutím bude lineárně klesat až do okamžiku opětovného sepnutí SW. Transformátor v tomto zapojení slouží jako prvek akumulující energii – pro tyto účely se většinou používá feritové jádro se vzduchovou mezerou. Používá se obvykle na výkony do 100 W. [10, 12]

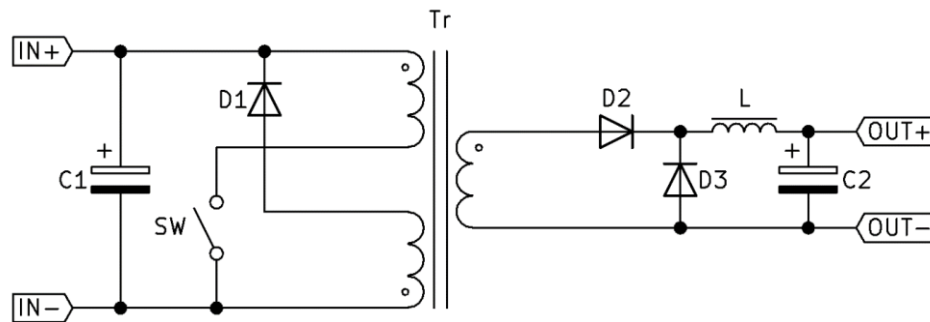


Obr. 8: Schéma zapojení blokujícího měniče.

3.4.2 Propustné zapojení

Příklad zapojení propustného (forward) měniče je na obr. 9. Při sepnutí spínače SW začne protékat proud primárním vinutím, ale zároveň i sekundárním vinutím přes diodu D2, induktor L do kondenzátoru C2 a na výstup. Na třetím vinutí (rekuperačním) je napětí orientováno tak, že dioda D1 je v nevodivém stavu. V transformátoru Tr a induktoru L se akumuluje energie v podobě magnetického pole. Po rozepnutí SW se orientace napětí na vinutích obrátí, D1 je ve vodivém stavu, proud teče rekuperačním vinutím přes D1 zpět do C1 a akumulovaná energie v transformátoru se přenáší zpět na vstup. Energie akumulovaná v induktoru L se uvolňuje do C2 a na výstup, proud teče z L přes C2 a výstup a přes D3 zpět do L. Po sepnutí SW se děj opakuje. Použit

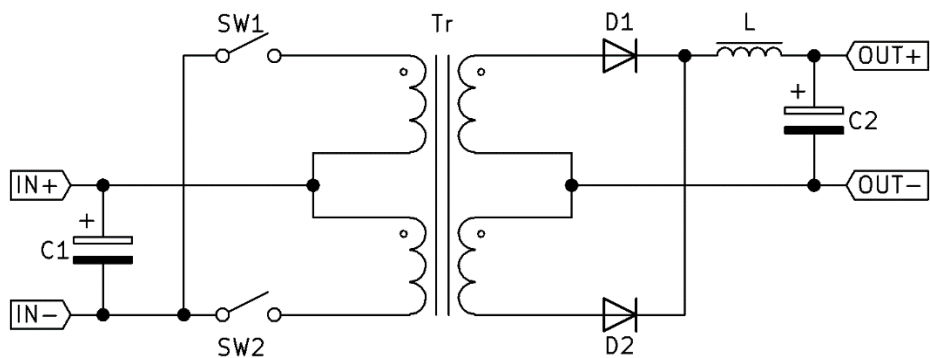
bývá transformátor s feritovým jádrem bez vzduchové mezery. Tento typ měniče se používá obvykle pro výkony v řádu stovek wattů. [12]



Obr. 9: Schéma zapojení propustného měniče.

3.4.3 Dvojčinné zapojení

Příklad zapojení dvojčinného (push-pull) měniče je na obr. 10. Při sepnutí spínače SW1 začne téct proud vrchní polovinou primárního vinutí, zároveň i vrchní polovinou sekundárního vinutí přes diodu D1, induktor L do kondenzátoru C2 a na výstup. Při rozepnutí spínače SW1 a sepnutí spínače SW2 teče proud spodní polovinou primárního vinutí a spodní polovinou sekundárního vinutí přes diodu D2, induktor L do C2 a na výstup. Výhoda zapojení je, že transformátor není stejnosměrně sycen. Toto zapojení se používá zejména pro výkony od stovek wattů výše. [10, 12]

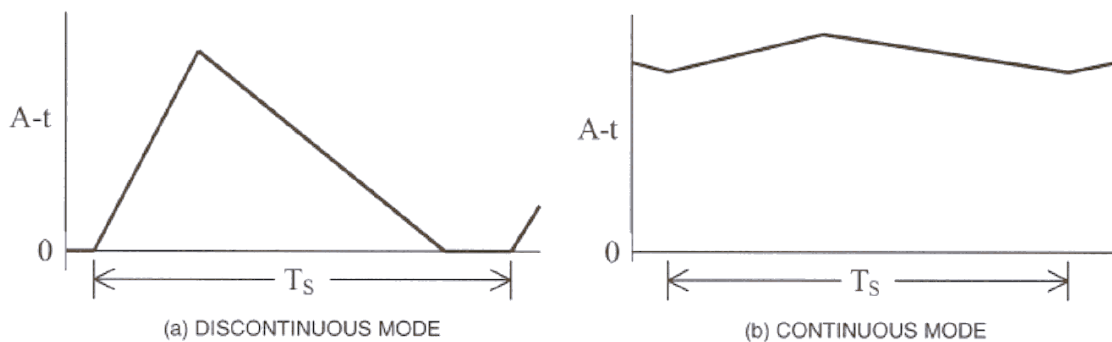


Obr. 10: Schéma zapojení dvojčinného měniče.

3.5 CCM a DCM

DC/DC měniče mohou pracovat v tzv. CCM nebo DCM módu. V DCM módu klesne proud protékající induktorem (nebo v případě transformátoru ve všech jeho vinutích) po určitý časový úsek v každé periodě na nulu. V případě CCM módu pak vždy protéká proud (v případě transformátoru alespoň jedním) vinutím, tj. vždy buď spínací tranzistor, nebo výstupní

usměrňovací diody, jsou ve vodivém stavu. Porovnání průběhů proudu v CCM a DCM módech je zobrazeno na obr. 11. [14]



Obr. 11: Porovnání průběhu proudu v induktoru: a) DCM a b) CCM, převzato z [14].

3.6 Řízení měničů s indukčnostmi

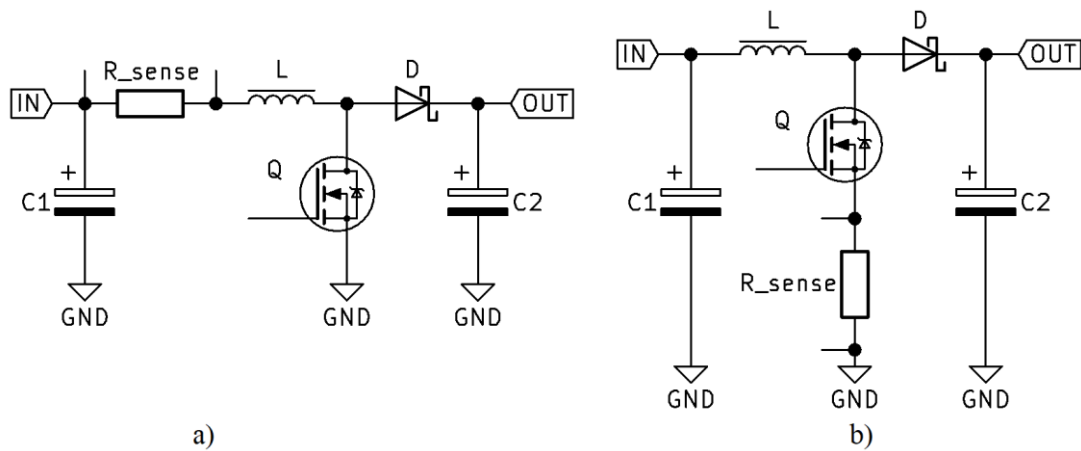
3.6.1 Měniče s IO

V dnešní době je většina měničů řízena IO k tomu určenými. Tyto obvody generují obvykle PWM signál pro ovládání spínacího tranzistoru za účelem regulace výkonu měniče v závislosti na zatížení měniče, resp. na výstupním napětí, popř. proudu či výkonu. [13]

Aby bylo na výstupu měniče konstantní napětí, snímá IO napětí na výstupu měniče (resp. obvykle na rezistorovém děliči) napětí, které je pak porovnáváno s referenčním napětím, a odchylka je zesílena; dle velikosti této odchylky obvod generuje pro spínací tranzistor signál o příslušné šířce pulzu (resp. střídě), díky čemuž zachovává konstantní napětí (proud, výkon) na výstupu. V případě měničů s galvanickým oddělením vstupu a výstupu je napětí snímáno buď na pomocném vinutí transformátoru, nebo je zpětná vazba zavedena přes optron, který bývá regulován např. IO TL431, popř. Zenerovou diodou. [10, 13]

Pro zamezení saturace jádra induktoru či transformátoru je nutné, aby proud nepřekročil danou maximální hodnotu. Proto je třeba snímat proud tekoucí induktorem nebo primárním vinutím transformátoru. Na obr. 12 je zobrazeno schéma zapojení zvyšujícího měniče se snímáním proudu tekoucího induktorem pomocí rezistoru R_{sense} . Zapojení a) se používá především u měničů s induktory, b) pak u měničů s transformátory. Mezi výhody tohoto zapojení patří přesnost snímání (teplotní i časová stálost), nevýhoda je nižší účinnost. Existují i IO (např. LTC3878), které jsou schopny snímání proudu pomocí úbytku napětí na sepnutém spínacím

tranzistoru, resp. na odporu R_{DSon} . Výhoda tohoto zapojení je ve vyšší účinnosti (ve srovnání se zapojením se snímacím rezistorem), jako nevýhodu lze zmínit nízkou přesnost. [15]



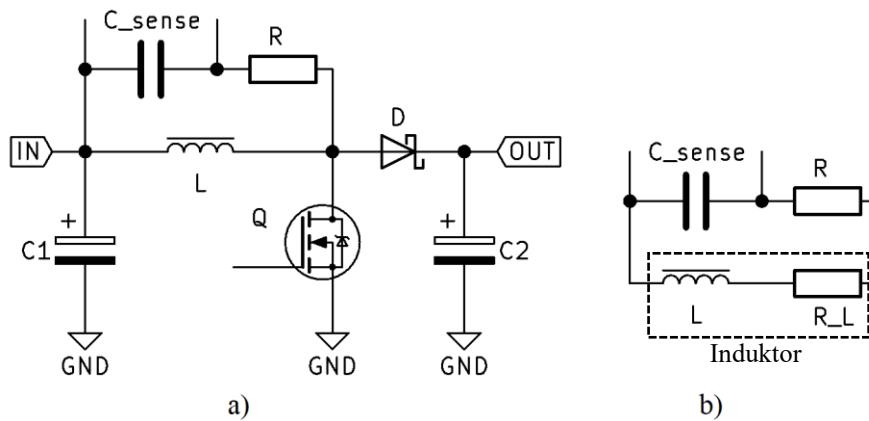
Obr. 12: Snímání proudu tekoucího indukčností pomocí snímacího rezistoru.

Další způsob snímání proudu je snímání pomocí DCR metody – metody, která využívá stejnosměrného odporu vinutí induktoru k měření proudu. Napětí přímo úměrné proudu je snímáno na snímacím kondenzátoru C_{sense} , který je zapojen v sérii s rezistorem R ; tyto dvě součástky jsou paralelně připojeny k induktoru, viz obr. 13 a) a b). Hodnoty součástek C_{sense} a R lze dle [15] vypočítat ze vztahu (2):

$$R \cdot C_{sense} = \frac{L}{R_L}, \quad (2)$$

kde L je indukčnost použitého induktoru a R_L je parazitní sériový (stejnoseměrný) odpor induktoru. Pro minimalizaci chyby jsou upřednostňovány nízké hodnoty odporu použitého rezistoru. Jako výhodu této metody lze uvést vyšší účinnost ve srovnání s metodou snímání pomocí snímacího rezistoru, mezi nevýhody patří zejména nemožnost detekce saturace, proto je doporučováno používat jádra s pozvolným nástupem saturace, např. železoprachová jádra. [15]

Existují i další metody snímání proudu, např. snímání proudu pomocí měřicího transformátoru proudu (výhoda galvanického oddělení) nebo pomocí spínacích tranzistorů s integrovaným snímáním proudu (tranzistory DrMOS). [15]



Obr. 13: Snímání proudu tekoucího indukčností s využitím DCR metody.

3.6.2 Samokmitající měniče

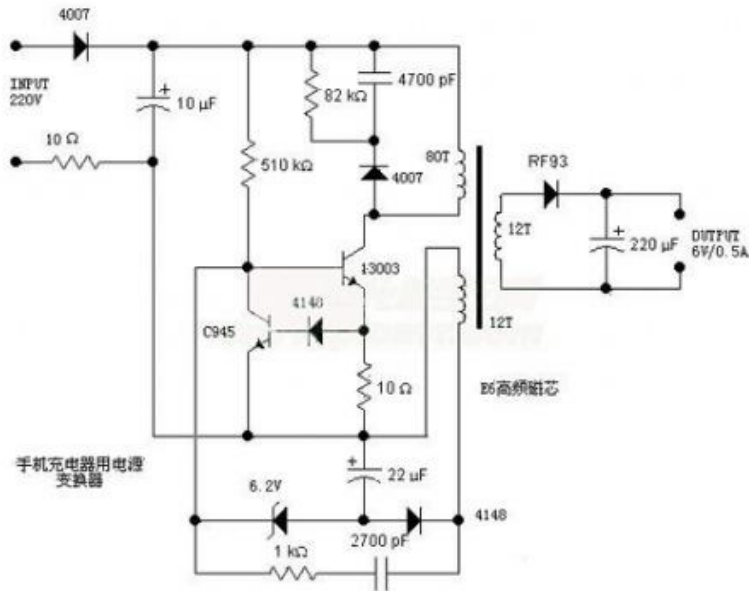
I u samokmitajících měničů bez řídicího kontroléru je nutné regulovat výstupní napětí a proud tekoucí primárním vinutím a spínacím tranzistorem. Na obr. 14 je příklad zapojení blokujícího měniče bez IO se dvěma NPN tranzistory, na kterém bude vysvětlena regulace výstupního napětí a omezení proudu tekoucího primárním vinutím pomocí vypínání spínacího tranzistoru. Nejprve ale musí dojít k jeho sepnutí.

Spínací tranzistor (ve schématu označen jako 13003) je sepnut přes rezistor o hodnotě 510 k Ω . Při sepnutí tranzistoru bude na pomocném vinutí kladné napětí a přes rezistor 1 k Ω a kondenzátor 2700 pF poteče do báze spínacího tranzistoru proud z pomocného vinutí. K vypnutí spínacího tranzistoru může dojít dvěma způsoby.

První způsob je vypnutí spínacího tranzistoru pomocným tranzistorem, ve schématu označeným jako C945. Při rostoucím proudu tekoucím primárním vinutím a spínacím tranzistorem začne růst úbytek napětí na rezistoru 10 Ω k němu připojeném. Pokud úbytek na tomto rezistoru překročí součet propustného napětí diody k němu připojené (označená 4148) a napětí přechodu báze-emitor pomocného tranzistoru, dojde k sepnutí pomocného tranzistoru a k připojení báze spínacího tranzistoru na společný vodič (resp. záporný pól vstupního filtračního kondenzátoru). Takto je zabráněno tomu, aby se transformátor dostal do saturace. Proud, při kterém dojde k vypnutí, lze nastavit změnou hodnoty odporu použitého rezistoru.

Druhým způsobem vypnutí spínacího tranzistoru je přes lavinovou diodu o Zenerově napětí 6,2 V. Tato dioda omezuje maximální napětí, které může být na bázi spínacího tranzistoru. Napětí na kondenzátoru 22 μ F je (při zanedbání ztrát, úbytků na usměrňovacích diodách apod.) přímo

úměrné napětí na výstupu měniče. Pokud je na výstupu (a tedy i na tomto kondenzátoru) požadované napětí, lavinová dioda tak díky nabitému kondenzátoru drží spínací tranzistor vypnutý až do chvíle, kdy napětí na kondenzátoru klesne pod nastavenou hodnotu. Hodnotu výstupního napětí lze nastavit změnou poměru počtu závitů sekundárního a pomocného vinutí.



Obr. 14: Schéma zapojení blokujícího měniče, převzato z [35].

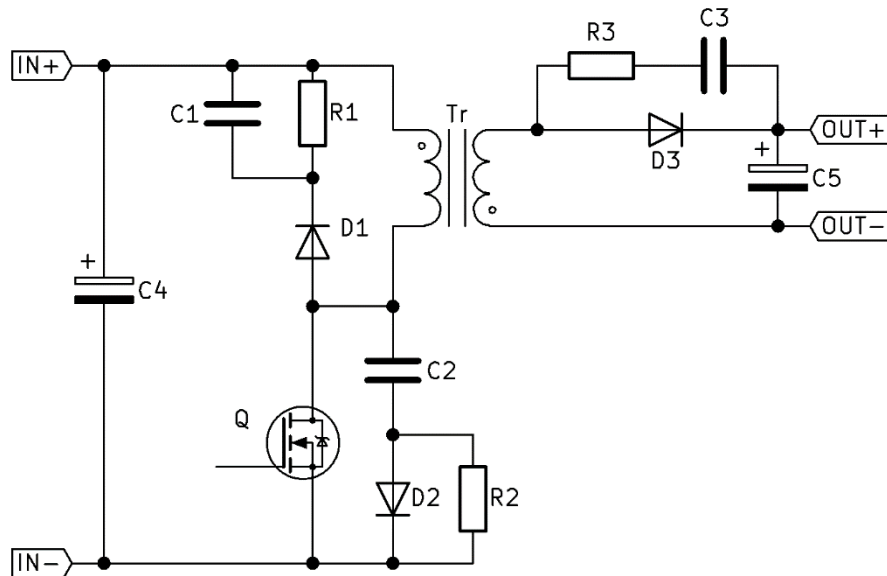
Používají se i zapojení pouze s jedním spínacím tranzistorem, kdy (bipolární) tranzistor se při vyšším proudu tekoucím primárním vinutím vypíná tím, že se dostane do aktivního režimu. U některých zdrojů je výstupní napětí snímáno přímo na výstupu: zpětná vazba je zavedena přes optron regulovaný Zenerovou diodou, příp. IO TL431.

3.7 Ochrany spínacích prvků

Spínací prvky (tranzistory, diody) je v určitých případech třeba chránit před napěťovými nebo proudovými špičkami či strmosti nárůstu napětí. K tomu slouží ochranné obvody, které jsou typicky složeny z kondenzátoru, rezistoru, příp. diody. Obr. 15 ukazuje příklad zapojení ochranných prvků u blokujícího měniče. [16, 17]

Obvod složený z R1, C1 a D1 na obr. 15 slouží k omezení napěťových špiček. Vlivem neideální vazby mezi jednotlivými vinutími transformátoru má primární (i ostatní) vinutí rozptylovou indukčnost. Protože rozptylová indukčnost (primárního) vinutí brání skokovým změnám proudu, poteče primárním vinutím proud i krátce po vypnutí spínacího tranzistoru Q; proud z primárního vinutí proteče přes D1 do C1. C1 je vybíjen R1, aby napětí stále nenarůstalo.

Poměr napětí na kondenzátorech C1 a C5 je přibližně roven poměru počtu závitů primárního vinutí ku počtu závitů sekundárního vinutí. Napětí na C1 se přičítá k napájecímu napětí, na součet těchto napětí musí být dimenzovaný spínací tranzistor (a také součástky C2, D2, R2 spolu s diodou D1). Při absenci obvodu složeného z R1, C1 a D1 by proud z primárního vinutí neměl kudy téct, což by zapříčinilo vznik napěťové špičky, která by mohla vést až k proražení spínacího tranzistoru.



Obr. 15: Schéma zapojení ochranných obvodů na blokujícím měnič.

K omezení strmosti nárůstu napětí slouží obvod složený z R2, C2 a D2, obr. 15. Při rozepnutí spínacího tranzistoru Q napětí na drainu tohoto tranzistoru začne růst. Kvůli parazitním kapacitám tranzistoru (Millerově kapacitě) a strmému nárůstu napětí na drainu by se ale mohlo stát, že napětí na řídicí elektrodě tranzistoru by narostlo a spínací tranzistor by zůstal pootevřený; při rostoucím napětí by jím stále protékal proud, což by vedlo k velké výkonové ztrátě a případně i ke zničení tranzistoru. Součástky D2 a C2 omezují strmost růstu napětí na drainu při vypnutí tranzistoru (rezistor R2 slouží k vybití C2 při sepnutí tranzistoru). Díky tomuto obvodu se spínací tranzistor stihne plně vypnout dříve, než napětí na drainu výrazněji naroste.

K omezení strmosti růstu napětí a k omezení napěťové špičky slouží součástky R3 a C3 na obr. 15; tyto součástky chrání usměrňovací diodu D3. Při rozepnutí spínacího tranzistoru Q proud poteče sekundárním vinutím přes usměrňovací diodu D3. Než ale dojde k jejímu sepnutí, proud poteče přes C3 a R3 a omezí tak napěťovou špičku, která by nastala při absenci této ochrany, pokud by se D3 neotevřela včas. Při sepnutí spínacího tranzistoru součástky C3 a R3 zpomalí

pokles napětí na sekundárním vinutí tak, že se D3 stihne včas zavřít, tudíž přes D3 neproteče velký proud v závěrném směru.

4 Měniče pracující s velmi nízkým napětím

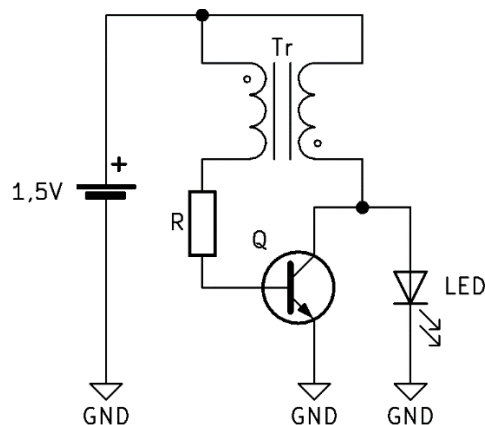
Měniče pracující s nízkými napětími bývají obvykle používány v oblasti energy harvesting (tj. získávání malého množství energie např. z termočlánků, FV článku apod.) Méně obvyklé je pak použití těchto obvodů k napájení zařízení vyžadujících více energie. Pro vyšší výkony (jednotky wattů) při velmi nízkých napětích výrazně roste proud spotřebovávaný zdrojem, tedy i klesá účinnost. To vede k použití synchronního usměrnění a spínacích tranzistorů s nízkým odporem kanálu v sepnutém stavu. Měniče schopné dodávat vyšší výkony mají ale obvykle také vyšší startovací napětí. Pro nastartování měniče tak může sloužit méně výkonný obvod, který je schopen funkce i při nižších napětích. V této kapitole bude uvedeno několik obvodů z řad nábojových pump a měničů s indukčnostmi, které jsou určeny pro velmi nízká vstupní napětí. [18]

4.1 Měniče bez IO – „Joule Thief“

Na internetu se pod názvem „Joule Thief“ vyskytuje jednoduché zapojení samokmitajícího měniče s bipolárním tranzistorem (schéma viz obr. 16), podrobnosti viz [19]. Tento obvod je schopen měnit napětí z řádově desetin voltu na jednotky voltů. „Joule Thief“ bývá typicky používán k napájení bílé LED z (vybité) tužkové baterie. Obvod je složen z rezistoru, bipolárního NPN tranzistoru, LED a dvou vinutí na společném (obvykle toroidním) jádru. Poměr počtu závitů bývá volen 1:1.

Při připojení baterie k obvodu začne přes první vinutí a rezistor R téct proud do báze tranzistoru Q. Tranzistor sepne, na druhém vinutí bude úbytek napětí přibližně roven napětí zdroje, proud tekoucí druhým vinutím začne lineárně růst a v jádru se ukládá energie v podobě magnetického pole. Poměr napětí na prvním a druhém vinutí (ve smyslu orientace vinutí) je roven poměru počtu závitů prvního a druhého vinutí. Napětí na prvním vinutí se přičte k napětí zdroje. Proud druhým vinutím roste, dokud se tranzistor nedostane do aktivního režimu. V aktivním režimu začne růst úbytek napětí na přechodu kolektor-emitor a klesat úbytek napětí na druhém vinutí, kvůli čemuž klesne i napětí na prvním vinutí; kvůli poklesu napětí klesne proud do báze a takto postupně dojde k uzavření tranzistoru. Napětí na obou vinutích změní orientaci,

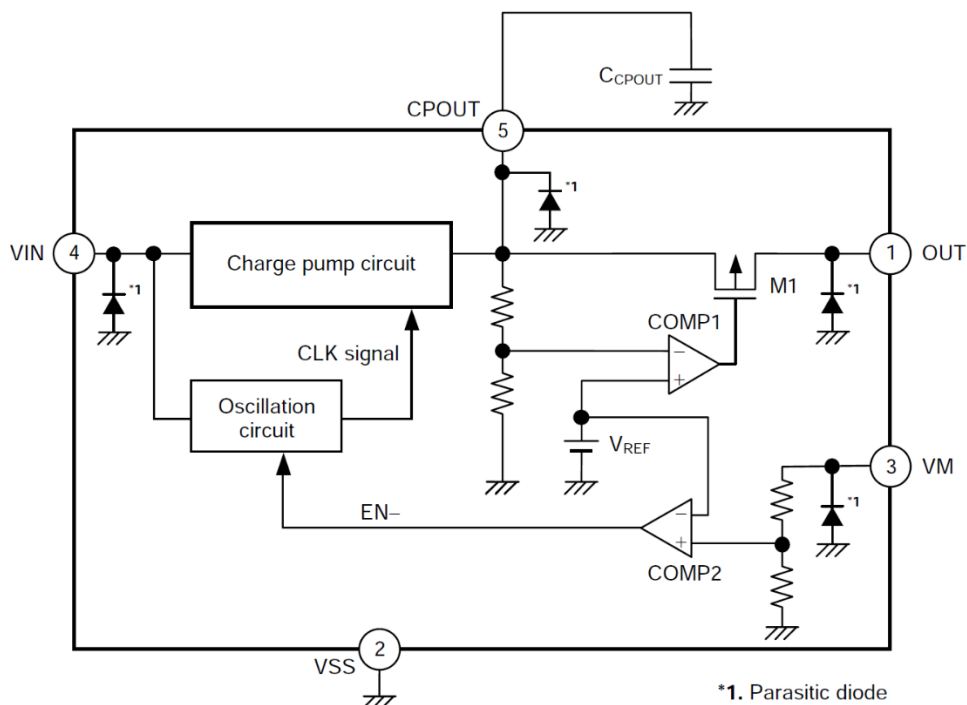
úbytek napětí na druhém vinutí je roven rozdílu propustného napětí LED a napětí zdroje. Napětí na bázi tranzistoru je rovné rozdílu napětí zdroje a napětí na druhém vinutí, tento rozdíl je menší než napětí přechodu báze-emitor, tranzistor zůstává zavřen. Do LED teče proud a energie uložená v jádru se uvolňuje, proud klesá. Po uvolnění energie z jádra klesne napětí na obou vinutích k nule. Do báze tranzistoru začne ze zdroje napětí přes první vinutí a rezistor R opět téct proud a tranzistor se začne otevírat. Takto se děj periodicky opakuje. Takovýto zdroj je obvykle schopen dodat na výstup jednotky mA při napětí na výstupu kolem jednotek voltů (při vstupním napětí asi 1 V). Zdroj funguje od napětí přibližně 0,7 V.



Obr. 16: Schéma obvodu „Joule Thief“.

4.2 Nábojové pumpy – obvod S-882Z

Obvykle mají IO nábojových pump pracovní napětí asi od 1,5 V, existují ale i obvody s nižším pracovním napětím. Od 0,35 V funguje např. IO S-882Z, podrobnosti viz [20]. Tento obvod je primárně určen k nastartování DC/DC měniče s IO, který potřebuje ke své funkci napětí kolem 1 V ÷ 2 V. Blokové schéma IO je k dispozici na obr. 17. Obvod obsahuje samotnou nábojovou pumpu, oscilační obvody pro její řízení a další pomocné obvody (např. pro vypnutí obvodu po spuštění připojeného IO DC/DC měniče, jehož výstup je připojen na vstup VM). Dle datasheetu se obvod odlišuje od ostatních tím, že používá technologii fully depleted SOI (Silicon on Insulator), což umožňuje fungování obvodu i při malých napětích. [20]



Obr. 17: Blokové schéma IO S-882Z, převzato z [20].

4.3 Měniče s IO s indukčnostmi

4.3.1 IO LTC3108

Integrovaný obvod LTC3108 je obvod sloužící ke zvyšování velmi nízkých napětí v řádu desítek milivoltů. Obvod je určený k napájení zařízení s velmi nízkou spotřebou např. z termočlánku nebo fotovoltaického článku. Obvod je schopen funkce v rozsahu napětí typicky 20 mV až max. 500 mV, na výstup je schopen dodat jednotky mA při jednotkách voltů v závislosti na vstupním napětí. Blokové schéma tohoto obvodu je na obr. 18. [21]

Základ měniče tvoří transformátor s poměrem počtu závitů primárního vinutí ku sekundárnímu vinutí 1:100. Sekundární vinutí tvoří spolu s kondenzátorem C2 rezonanční LC obvod, jehož rezonanční frekvenci lze spočítat dle [21] ze vztahu (3):

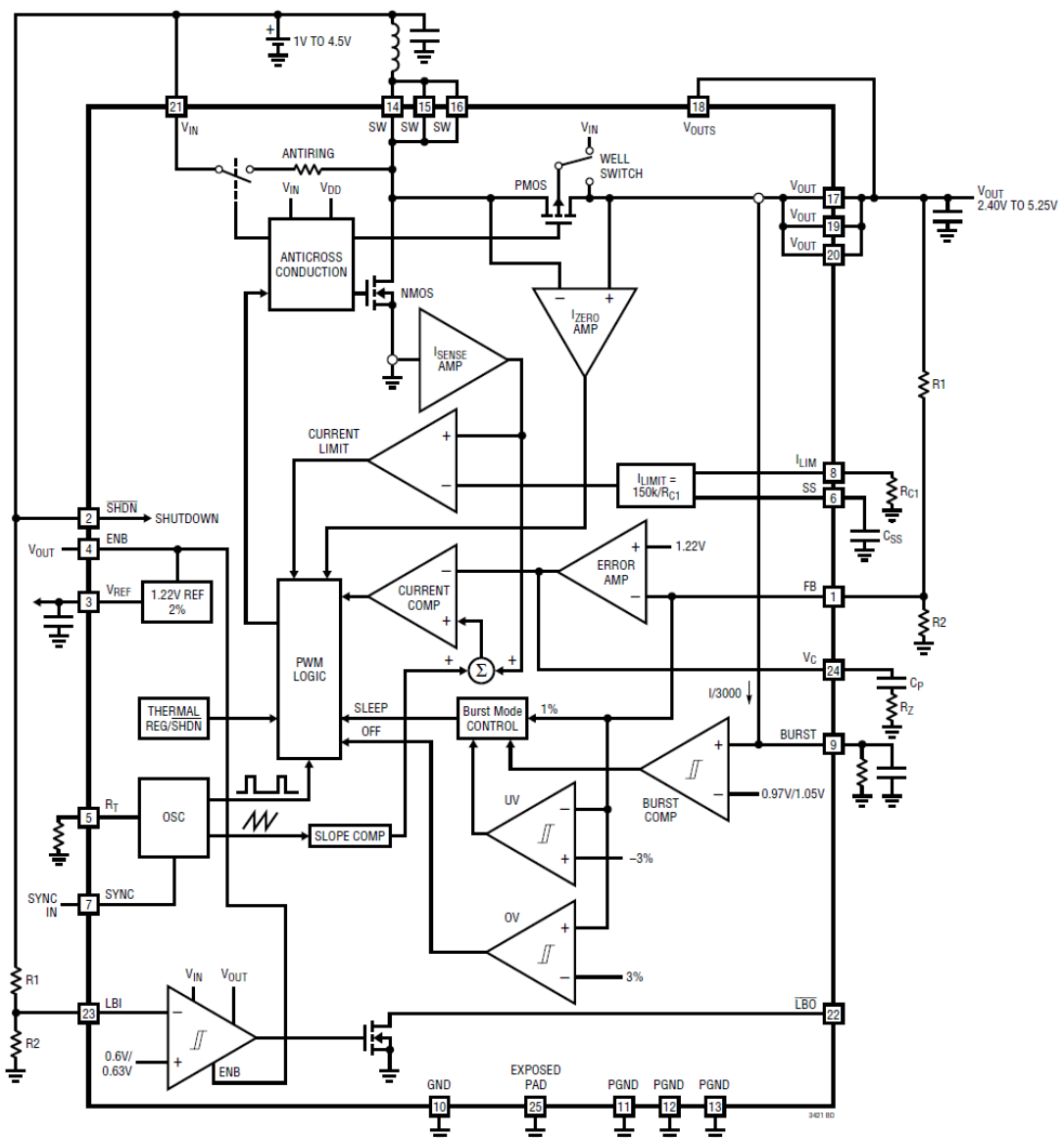
$$f = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C_2}}, \quad (3)$$

kde L je indukčnost sekundárního vinutí a C_2 je kapacita kondenzátoru. Rezonanční frekvence by měla být volena v řádu desítek kHz. Rezonanční LC obvod je připojen na řídicí elektrodu spínacího MOSFETu s kanálem N (pravděpodobně se záporným prahovým napětím) s odporem kanálu v sepnutém stavu $0,5 \Omega$. Na drain spínacího tranzistoru je připojeno primární vinutí. Při

4.3.2 IO LTC3421

Tento integrovaný obvod slouží ke zvyšování vstupního napětí v rozsahu $0,5\text{ V} \div 4,5\text{ V}$, typické minimální napětí potřebné pro start tohoto obvodu je $0,88\text{ V}$. IO podporuje synchronní usměrňování a má integrované spínací tranzistory (MOSFET kanál N a P, odpor v sepnutém stavu $0,1\ \Omega$ a $0,14\ \Omega$). Pomocí rezistoru lze zvolit pracovní frekvenci, k dispozici je funkce synchronizace spínání s externím zdrojem signálu, podporuje soft-start apod. IO je schopen pracovat s nízkým napětím i díky tomu, že některé obvody mohou být napájeny i z výstupu měniče, kde je vyšší napětí než na vstupu (např. napěťová reference $1,22\text{ V}$). Výstupní napětí lze nastavit v rozmezí hodnot $2,4\text{ V} \div 5,25\text{ V}$. Blokové schéma tohoto integrovaného obvodu je na obr. 19.

[22]



Obr. 19: Blokové schéma IO LTC3421, převzato z [22].

Princip funkce tohoto měniče je velice podobný klasickému zapojení step-up (viz kapitola 3.3.1) s tím rozdílem, že místo usměrňovací diody je použito synchronní usměrnění, v tomto případě pomocí MOSFET tranzistoru s kanálem P.

5 Návrh DC/DC měniče

Od DC/DC měniče požadujeme, aby byl schopen funkce při vstupním napětí od desetin voltů a na výstup dodával výkon kolem 1 W. Při takto malých napětích bude měnič spotřebovávat proud v řádu jednotek ampérů, proto je důležité použití spínacího tranzistoru s nízkým odporem kanálu v sepnutém stavu a nízký odpor vinutí indukčnosti; účinnost by mělo zvýšit i použití synchronního usměrnění. Protože většina IO DC/DC kontrolérů má minimální startovací napětí kolem 1 V a více (příčemž IO se synchronním usměrněním mívají startovací napětí ještě vyšší), bude použit měnič schopný dodat požadovaný výkon s vyšším startovacím napětím pro napájení LED a měnič s nízkým startovacím napětím, který bude sloužit pro nastartování měniče pro LED, který po svém startu bude dodávat energii nejen pro LED, ale i pro svůj provoz. Startovací měnič bude pak pro úsporu energie vypnut.

5.1 Návrh měniče pro napájení LED

Tento měnič je určen pro zvyšování napětí ze superkondenzátoru (tj. z napětí do 2,5 V, resp. 2,7 V) na napětí pro bílou LED na jednotky voltů při výkonu kolem 1 W. Pro realizaci měniče bylo vybráno step-up zapojení, protože proti všem ostatním zde uvedeným zapojením má výhodu: při CCM totiž ze zdroje energie (superkondenzátoru) měnič odebírá proud stále, nikoliv jen část periody (jako tomu je u ostatních zapojení), což pro stejný výstupní výkon znamená nižší hodnotu proudu tekoucího indukčností (po dobu sepnutí spínacího tranzistoru), tedy i nižší ztráty. Z těchto důvodů bylo vybráno step-up zapojení.

5.1.1 Výběr DC/DC kontroléru step-up měniče

Od IO DC/DC kontroléru požadujeme synchronní usměrnění a fungování při napětích v řádu jednotek voltů (kolem 5 V a níže, potřebné napětí bude ze začátku generováno startovacím měničem). Protože e-shopy s elektronickými součástkami obvykle neumožňují vyhledat DC/DC kontroléry pouze se synchronním usměrněním, byly tyto obvody vyhledávány na stránkách výrobců, konkrétně Analog Devices (Linear Technology), Texas Instruments, STMicroelectronics a Maxim Integrated. Z těchto stránek byly vybrány vhodné obvody, které

LDO: 5,4 V (proti asi 7,5 V u zbylých dvou obvodů), podrobnosti v dalších kapitolách. Blokové zapojení obvodu LTC3786 je na obr. 20. [23, 24, 25]

Tento DC/DC kontrolér má dle [23] maximální střihu asi 94 %. Ze simulací vyplývá, že je schopen dodávat na výstup výkon kolem 1 W při nízkém vstupním napětí kolem 0,5 V při výstupním napětí měniče kolem 6 V, což je přibližně napětí dvou sériově zapojených bílých LED. Toto napětí se jeví ideální i z toho důvodu, že na výstupu vnitřního LDO je napětí (5,4 V) nižší než napětí na výstupu měniče, tj měnič bude po nastartování schopen napájet sám sebe. Na výstup měniče budou na základě výše uvedeného sériově zapojeny 2 bílé LED (2 LED v jednom pouzdru). Pro výkon LED kolem 1 W poteče svítkami proud kolem 170 mA při napětí asi 6 V.

5.1.2 Snímání proudu tekoucího LED

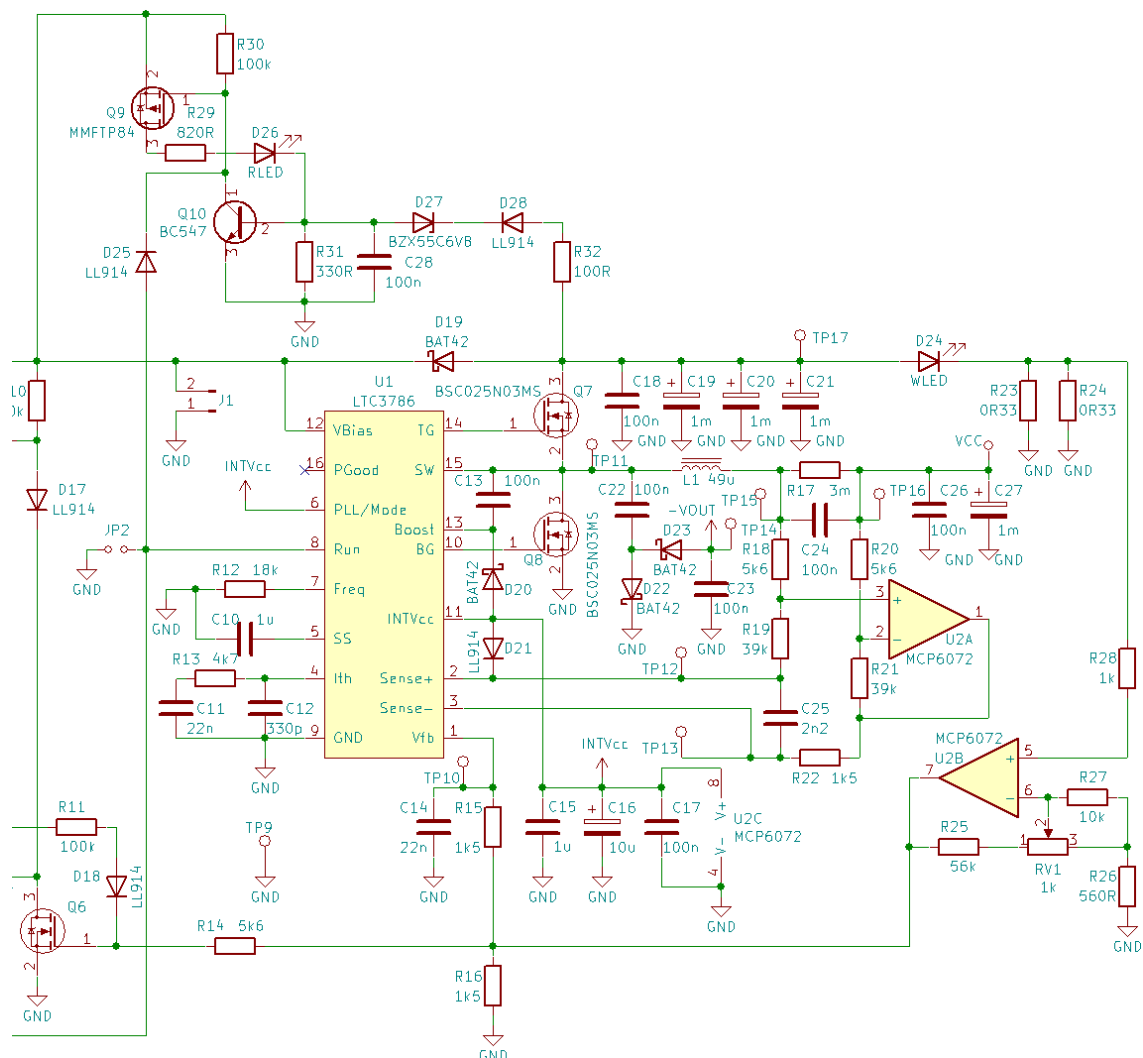
Napájení LED je možné dvěma základními způsoby: zdrojem konstantního napětí, ke kterému je LED připojena v sérii s předřadným rezistorem, nebo je možné LED napájet zdrojem proudu. Pro omezení ztrát na předřadném rezistoru volíme napájení zdrojem proudu.

Proud tekoucí LED je možné snímat pomocí snímacího rezistoru. Pro omezení ztrát na tomto rezistoru volíme odpor rezistoru nízké hodnoty, konkrétně 165 mΩ (dva rezistory 330 mΩ paralelně – R23 a R24 ve schématu zapojení měniče pro LED na obr. 21, příp. ve schématu zapojení obou měničů na obr. 33 v příloze). Úbytek napětí na snímacích rezistorech lze zesílit použitím OZ, výstup OZ bude připojen na vstup zpětné vazby IO DC/DC kontroléru (ve schématu U1), vstup 1. Pro potlačení případného šumu OZ či VF rušení je před vstupem zpětné vazby IO připojen RC filtr – dolní propust (součástky R15 a C14). OZ (ve schématu U2B) je v tomto případě zapojen jako neinvertující zesilovač. Se součástkami R25 – R27 a RV1 je zesílení tohoto zesilovače rovno min. asi 39 a max asi 122. To odpovídá proudům tekoucím LED max. asi 190 mA a min. 75 mA. Vybraná bílá LED má maximální dovolený (trvalý) proud 200 mA, tzn. lze pro tyto účely použít. Informace o vybrané LED jsou k dispozici v [36].

Pro případ selhání LED (přerušení LED, příp. odpojení LED) nepoteče svítkou žádný proud, tj. úbytek napětí na snímacích rezistorech bude nulový, bude tedy nulové i napětí na vstupu zpětné vazby, která reguluje výkon měniče. To by mělo za následek vzrůst napětí na výstupu měniče, dokud by nedošlo k jeho zničení. Pro ochranu měniče byl tedy navržen obvod kolem tranzistorů Q9 a Q10. Při překročení napětí na výstupu přes asi 8 V dojde k sepnutí Q10, který sepne Q9 a zároveň přes D25 připojí vstup Run IO U1 na společný vodič (GND), což má za

následek vypnutí IO DC/DC měniče pro napájení LED. Zároveň dojde k rozsvícení červené LED signalizující překročení maximálního napětí na výstupu měniče. (Vzhledem k tomu, že při absenci napětí na vstupu zpětné vazby se automaticky zapne startovací měnič, bude tento obvod po dobu nečinnosti měniče pro napájení LED napájen startovacím měničem; více o startovacím měniči v kapitole 5.2.) Resetování této ochrany je možné vypnutím vypínače SW, vyčkáním zhasnutí červené LED a opětovným zapnutím SW; více o vypínání měničů viz kapitola 5.3.

Při volbě příslušného OZ pro zesílení úbytku napětí na snímacích rezistorech je nutné, aby na svých vstupech dokázal snímat i malá napětí v řádu desítek mV, pro přesnost měření je taktéž důležitá nízká vstupní napěťová nesymetrie. Více o výběru OZ v následující kapitole.



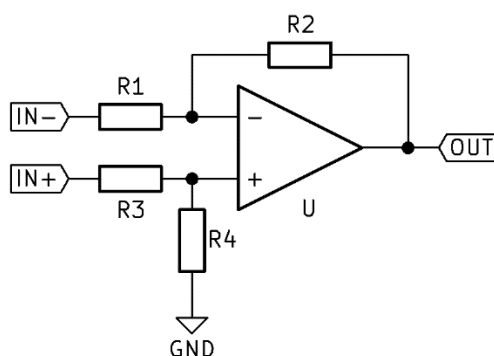
Obr. 21: Schéma zapojení měniče pro napájení LED.

5.1.3 Snímání proudu tekoucího induktorem

IO LTC3786 podporuje snímání proudu tekoucího induktorem pomocí snímacího rezistoru a pomocí DCR metody, viz. obr. 12 a) a obr. 13, kapitola 3.6 . Napětí na snímacím rezistoru (nebo kondenzátoru v případě DCR metody) je přivedeno na vstupy Sense+ a Sense-. Na vstupu Sense+ však musí být pro korektní funkci obvodu dle [23] minimální napětí 2,5 V. Tuto podmínku lze splnit pomocí rozdílového (diferenčního) zesilovače např. s využitím zapojení s operačním zesilovačem; základní schéma zapojení diferenčního zesilovače s OZ je na obr. 22. Zesilovač je schopen úbytek napětí na snímacím prvku přenést na snímací vstupy při zachování dostatečného napětí na vstupu Sense+, navíc je schopen rozdíl napětí zesílit. Pro zesílení rozdílového napětí za podmínky $R_1 = R_3$ a $R_2 = R_4$ platí dle [32] vztah (4):

$$A_{\text{dif}} = \frac{R_2}{R_1}. \quad (4)$$

Aby však bylo zachováno potřebné napětí na vstupech Sense+ a Sense-, zapojení z obr. 22 bylo upraveno. Rezistor R4 nemůže být připojen na společný vodič, nýbrž na napěťovou referenci. Jako napěťovou referenci lze použít výstup LDO IO DC/DC kontroléru, jehož napětí bude sníženo pomocí diody tak, aby odpovídalo rozsahu výstupního napětí OZ. Na vstupu Sense+ bude tedy napětí LDO (5,4 V) sníženo o úbytek napětí na diodě. Schéma zapojení je na obr. 21 výše (OZ U2A).



Obr. 22: Základní zapojení rozdílového zesilovače s OZ.

Použití operačního zesilovače zároveň vylučuje použití DCR metody snímání proudu: snímací kondenzátor by byl přes rezistory připojen k OZ (v případě obr. 22 R1 a R3) nabíjen, což by kompletně zkreslilo výsledky měření proudu. Pro snímání proudu tekoucího induktorem tedy bude použita metoda se snímacím rezistorem.

Pro omezení ztrát na snímacím rezistoru je nutno volit rezistor s malým odporem. DC/DC kontrolér začne dle [23] omezovat proud tekoucí induktorem (resp. snižovat střihu) při rozdílu napětí na snímacích vstupech asi 75 mV. Úbytek napětí na rezistoru lze však pomocí OZ zesílit pro omezení ztrát na snímacím rezistoru. Snímání malých napětí na snímacím rezistoru ale klade značné nároky na použitý zesilovač, zejména na jeho vstupní napěťovou nesymetrii. Pro malou chybu měření by měl mít použitý operační zesilovač značně nižší vstupní napěťovou nesymetrii (offset), než je napětí měřené na snímacím rezistoru (offset je stejně jako signál zesílen dle vztahu (4), viz výše). Zároveň by měl použitý OZ fungovat z nesymetrického napájení, resp. korektně fungovat i pro nízká napětí na vstupech (v případě poklesu napětí zdroje – superkondenzátoru – na desetiny voltů). Vybrán byl OZ MCP6072 se vstupní napěťovou nesymetrií max. 150 μ V, rail-to-rail vstupem a výstupem a rozsahem napájecího napětí 1,8 V ÷ 6 V (absolutní maximum 7 V); podrobnosti viz [26]. Jako napájecí napětí je možno použít pomocný výstup LDO stabilizátoru DC/DC kontroléru INTV_{CC}, na kterém je udržováno konstantní napětí 5,4 V; v případě použití jiného IO DC/DC kontroléru s vyšším napětím na výstupu LDO by toto nebylo možné (to je další důvod pro použití IO LTC3786).

Jako snímací rezistor byl vybrán 3m Ω SMD rezistor v pouzdru 2512. Jako každý vodič bude mít i tento rezistor určitou parazitní indukčnost, která může zkreslovat měření proudu – tato indukčnost se projeví tím, že úbytek napětí neideálního rezistoru bude součtem úbytků napětí ideálního rezistoru a této parazitní indukčnosti. Vzhledem k tomu, že při velkých proudech tekoucích indukčností (tj. při nízkých vstupních napětích) je zvlnění proudu tekoucího induktorem a tímto snímacím rezistorem malé, úbytek napětí na této parazitní indukčnosti se tak významněji neprojeví. Při nižších proudech tekoucích induktorem (při vyšších vstupních napětích) je sice zvlnění tohoto proudu daleko větší, (tedy i úbytek napětí na této parazitní indukčnosti bude větší), přesnost měření proudu tekoucího indukčností ale není v tomto případě kritická. (Použitý IO DC/DC kontroléru má navíc dle [23] pro tyto účely kompenzaci (slope compensation), která je schopna potlačit úbytek napětí na parazitní indukčnosti snímacího rezistoru.)

Maximální proud tekoucí induktorem byl nastaven rezistory R18 – R21 na hodnotu asi 3,25 A, tzn. že měnič by měl být schopen dodávat požadovaný proud i při nízkých napětích na vstupu.

Pro částečné potlačení šumu OZ či VF rušení byl na vstupy Sense+ a Sense– umístěn RC filtr – dolní propust, součástky R22 a C25, a ke snímacímu rezistoru byl připojen paralelně kondenzátor C24.

5.1.4 Výběr induktoru

Pro frekvence v řádu desítek kHz lze použít induktory s toroidními železoprachovými jádry. Tato jádra mají cívkovou konstantu A_L v řádu desítek až stovek nH. Pro cívkovou konstantu platí dle [14] vztah (5):

$$A_L = \frac{L}{N^2}, \quad (5)$$

kde L je indukčnost induktoru a N je počet závitů. Pro minimalizaci ztrát ve vinutí volíme v rámci možností krátké vinutí, resp. menší počet závitů. Pro minimalizaci spínacích ztrát volíme spínací frekvenci kolem 50 kHz. Pro přijatelné zvlnění proudu tekoucího induktorem pro široký rozsah napětí na vstupu volíme (na základu simulace) hodnotu indukčnosti kolem 50 μ H.

Např. pro cívkovou konstantu (železoprachového jádra) 100 nH a indukčnost 50 μ H vychází přibližně 22 závitů. Feritová jádra mají vyšší cívkovou konstantu, to vede na nižší počet závitů. Proto bylo zvoleno feritové hrníčkové jádro se vzduchovou mezerou (podrobnosti viz [27]) které má cívkovou konstantu $A_L = 1000$ nH, přičemž pro dosažení požadované indukčnosti postačí asi 7 závitů. Se sedmi závity vychází proud, při kterém se induktor dostane do saturace, přes 3,5 A, což by mělo být dostatečné pro dodání požadovaného výkonu i pro nízká napětí kolem 0,5 V. Vzhledem k tomu, že při vyšším napětí na vstupu měniče bude zvlnění proudu tekoucího induktorem výrazné, bude 7 závitů vinuto (pro minimalizaci odporu a skin efektu vinutí) čtyřmi vodiči o průměru 0,7 mm. [34]

5.1.5 Výběr spínacích tranzistorů a filtračních kondenzátorů

Pro minimalizaci ztrát na spínacích tranzistorech byly vybrány tranzistory BSC025N03MS (tranzistory MOSFET s kanálem N), které mají odpor kanálu v sepnutém stavu pouze 3 m Ω při napětí U_{GS} 5 V. Tranzistor je schopen spínat proudy v řádu desítek (pulzně až stovek) ampérů; podrobnosti viz [28].

Na výstupní filtrační kondenzátory jsou kladeny následující požadavky: musí snést impulzní proud větší než 3 A, měly by mít malý ESR (ekvivalentní sériový odpor) a pro zvlnění

v řádu do desítek mV při výstupním napětí kolem 6 V by měly mít kapacitu kolem 1 mF. Zvoleny byly elektrolytické kondenzátory Hitano, 1000 μ F, 16 V, s maximálním proudem (RMS) 1,2 A. Datasheet neuvádí jejich vnitřní odpor, ale pouze impedanci na frekvenci 100 kHz, která je rovna 68 m Ω ; podrobnosti viz [29]. S přihlédnutím ke stárnutí elektrolytických kondenzátorů (růstu ESR a poklesu kapacity) umístíme na výstup 3 tyto kondenzátory zapojené paralelně. Na vstup tohoto měniče umístíme jeden tento kondenzátor (vzhledem k řádově nižšímu zvlnění proudu na vstupu).

5.2 Návrh startovacího měniče

Požadavky na měnič sloužící ke zvýšení napětí pro nastartování výkonnějšího měniče jsou následující: rozsah pracovního napětí desetin voltu až 2,5 V, resp. 2,7 V, a napětí na výstupu alespoň 4,5 V při jednotkách až desítkách mA. Měnič bude v rámci úspory energie vypnut po nastartování výkonnějšího měniče, který bude zároveň napájet sám sebe.

Pro realizaci takového měniče se nabízí použití různých k tomu určených integrovaných obvodů, naneštěstí mají ale téměř všechny IO DC/DC kontrolérů i nábojových pump startovací napětí kolem 1 V, což vylučuje jejich použití pro tyto účely. Výjimkou je např. IO nábojové pumpy zmíněný v kapitole 4.2 (obvod S-882Z), nicméně tento obvod má výstupní napětí dle [20] pouze 2,4 V a už prakticky není k dostání. Parametry nesplňuje ani obvod LTC3108 zmíněný v kapitole 4.3.1, je schopen dodávat proud pouze několik mA a maximální vstupní napětí je 0,5 V. IO splňující výše uvedené se nepodařilo v rozumné cenové kategorii naleznout, volíme proto návrh vlastního (samokmitacího) měniče bez integrovaného obvodu.

Pro měnič volíme zapojení s transformátorem s primárním vinutím, sekundárním vinutím a pomocným vinutím, které bude sloužit k buzení spínacího tranzistoru. Vzhledem k velmi nízkému požadovanému výkonu tohoto měniče volíme blokuující (flyback) zapojení.

5.2.1 Výběr spínacího tranzistoru

Aby byl měnič schopen pracovat od napětí v řádu desetin voltu, musí být použit spínací tranzistor s nízkým, resp. záporným prahovým napětím. Do úvahy tak připadají unipolární tranzistory MOSFET s vodivým kanálem a tranzistory JFET. Zároveň by spínací tranzistor měl být schopen spínat proudy větší než alespoň desetin ampérů, aby pro nízká napětí byl schopen dosáhnout napětí na výstupu kolem jednotek voltů a proudů v řádu jednotek až desítek

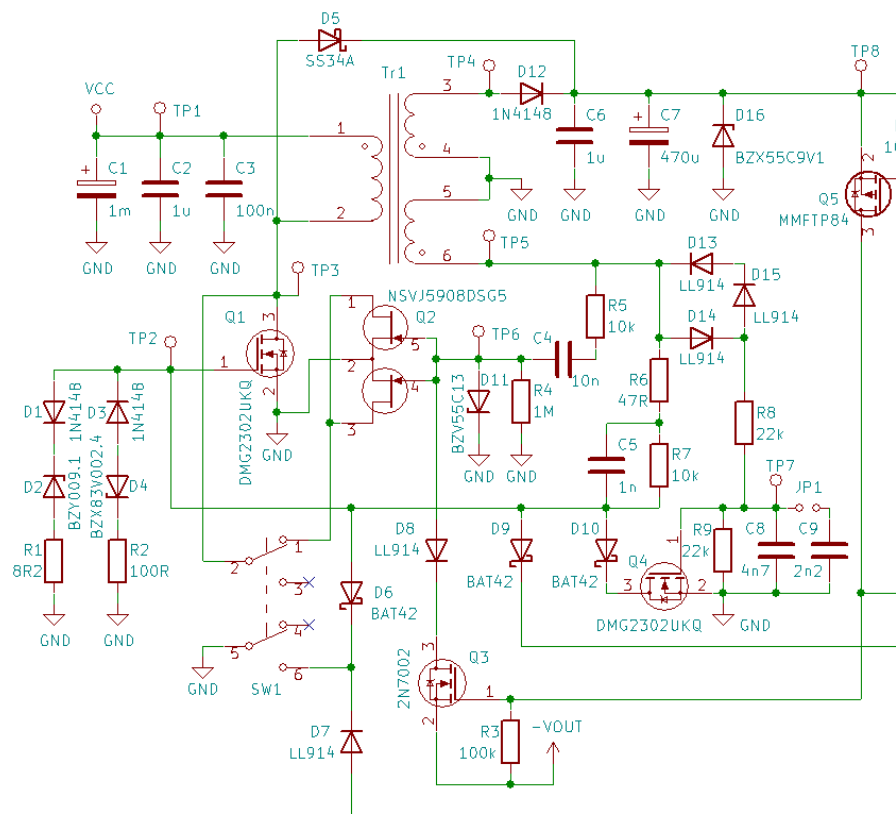
miliampérů. Naneštěstí takovéto požadavky nesplňují v rozumné cenové kategorii ani tranzistory MOSFET s vodivým kanálem, ani tranzistory JFET. Byla tedy zvolena jiná koncepce: jako spínací tranzistor byl vybrán tranzistor MOSFET DMG2302UKQ s indukovaným kanálem s nízkým prahovým napětím (typické prahové napětí tohoto tranzistoru je dle [30] 0,6 V) a paralelně k němu bude přidán tranzistor se záporným prahovým napětím, který poslouží k rozkmitání obvodu tak, aby na pomocném vinutí bylo dostatečné napětí pro sepnutí MOSFETu s nízkým prahovým napětím. Po rozkmitání obvodu převezme téměř veškerý proud spínací MOSFET (kvůli řádově nižšímu odporu kanálu v sepnutém stavu). Z důvodu nižších vstupních kapacit a zároveň větší rozšířenosti byl jako tranzistor se záporným prahovým napětím vybrán JFET tranzistor (nikoliv tedy MOSFET s vodivým kanálem), konkrétně NSVJ5908DSG5 (2 tranzistory v jednom pouzdru, odpor kanálu v sepnutém stavu obou tranzistorů paralelně je asi 25 Ω), podrobněji v [31].

5.2.2 Návrh a popis zapojení

Jak již bylo zmíněno výše, pomocné vinutí bude sloužit k buzení spínacích tranzistorů. Aby byl startovací měnič schopen funkce i při velmi nízkých napětích na vstupu měniče (a zároveň ještě správně fungoval při napětích kolem 2,5 V), byl dle výsledků simulace zvolen poměr počtu závitů primárního, sekundárního a pomocného vinutí $N_1:N_2:N_3 = 1:10:10$. Smysl vinutí je zobrazen ve schématu zapojení startovacího měniče na obr. 23, příp. ve schématu zapojení obou měničů na obr. 33 v příloze. Při napětí 2,5 V na vstupu však bude při sepnutí spínacích tranzistorů (ve schématu Q1 a Q2) na pomocném vinutí kolem 25 V, maximální napětí U_{GS} spínacího MOSFETu je dle [30] pouze 12 V. Na řídicí elektrody spínacích tranzistorů je proto nutné připojit ochrany proti napěťovým špičkám, tj. diody (D1 – D4 a D11). Protože napětí na pomocném vinutí může být vyšší než maximální napětí U_{GS} spínacích tranzistorů, byly řídicí elektrody těchto tranzistorů připojeny k pomocnému vinutí přes rezistor a kondenzátor (C4, C5, R5, R6), což znamená, že proud přes ochrany tranzistorů poteče pouze do okamžiku nabití kondenzátorů C4 a C5. (Pro zmírnění proudové špičky při průtoku proudu přes ochrany spínacího MOSFETu Q2 byly k ochranám přidány do série rezistory R1 a R2.)

Dle výše popsaného by však měnič fungoval pouze pro nízká vstupní napětí. Při připojení napětí na vstup měniče by spínací JFET byl v sepnutém stavu, napětí na pomocném vinutí by bylo přibližně desetinásobné ve srovnání se vstupním napětím a došlo by k sepnutí spínacího

MOSFETu, který by převzal téměř všechny proud tekoucí primárním vinutím. Proud tekoucí primárním vinutím lineárně poroste a v jádru transformátoru se začne ukládat energie v podobě magnetického pole. Proud tekoucí primárním vinutím naroste na takovou hodnotu, kdy se spínací MOSFET dostane do saturace. To způsobí zvyšování úbytku napětí U_{DS} spínacích tranzistorů a snižování úbytku napětí na primárním vinutí, což se přeneso i na pomocné vinutí; z toho důvodu začne klesat napětí na řídicích elektrodách spínacích tranzistorů. Tímto způsobem dojde k vypnutí spínacího MOSFETu a JFETu, napětí na vinutích se přepóluje a energie uložená v jádru transformátoru se uvolňuje – proud teče skrze usměrňovací diodu D12 na výstup měniče. Po uvolnění energie z jádra vzroste napětí na pomocném vinutí na nulu, což způsobí sepnutí JFETu a následně i MOSFETu, děj se takto periodicky opakuje.



Obr. 23: Schéma zapojení startovacího měniče.

Vyšší napětí na vstupu znamená i vyšší napětí na pomocném vinutí (tj. vyšší napětí U_{GS} spínacího MOSFETu), což by znamenalo daleko větší proudy, při nichž se spínací tranzistor dostane do saturace (pro použitý tranzistor až desítky ampérů). To by znamenalo, že by se nejprve dostal do saturace transformátor a poté až tranzistor; následkem by bylo velice pravděpodobné

zničení spínacího tranzistoru, který na takto velké proudy není stavěný. Při vyšších vstupních napětích je tak třeba zajistit vypínání spínacího MOSFETu jiným způsobem.

V kapitole 3.6.2 je na obr. 14 uvedeno zapojení měniče, kde je pomocným tranzistorem snímán úbytek napětí na snímacím rezistoru a v případě překročení nastavené hodnoty proudu pomocný tranzistor vypne spínací tranzistor. Vzhledem k nízkým vstupním napětím je však pro tento měnič snímání úbytku napětí na snímacím rezistoru prakticky nepoužitelné (bez použití složitějších integrovaných obvodů vyžadujících stabilní napájení pro správnou funkci) – úbytek napětí na rezistoru by musel být v určitých případech větší než napětí na vstupu měniče, což nedává smysl.

Pro vypínání spínacího tranzistoru byl vybrán totožný MOSFET (ve schématu Q4) s nízkým prahovým napětím (dle měření asi 0,4 V): na řídicí elektrodu pomocného tranzistoru Q4 byly připojeny rezistory R8 a R9 a kondenzátor C8, viz schéma výše, obr. 23. Při sepnutí spínacích tranzistorů je na pomocném vinutí kladné napětí, kondenzátor C8 připojený k řídicí elektrodě tranzistoru se nabíjí přes rezistor R8. Poté, co se C8 nabije na napětí větší než prahové napětí pomocného tranzistoru, tranzistor sepne a přes diodu D10 připojí řídicí elektrodu spínacího tranzistoru na společný vodič. Takto dojde k vypnutí spínacího tranzistoru Q1 (a následně Q2). Napětí na vinutích změní orientaci a kondenzátor C8 se přes rezistory R8 a R9 vybíjí, dokud nedojde k opětovnému sepnutí spínacích tranzistorů a k opakování děje.

Protože strmost růstu proudu i tekoucího induktorem je přímo úměrná velikosti vstupního napětí (napětí na induktoru) U_L , (viz vztah (6), zdroj [37])

$$U_L = -L \frac{di}{dt}, \quad (6)$$

přičemž vstupní napětí je přímo úměrné napětí na pomocném vinutí (při sepnutých spínacích tranzistorech při zanedbání ztrát, překmitů apod.) a proud rezistorem R8 je přímo úměrný napětí (z Ohmova zákona) na pomocném vinutí (napětí na nabíjeném kondenzátoru C8, stejně tak i úbytek napětí na diodách D13 – D15, je pro větší vstupní napětí zanedbatelné vůči napětí na pomocném vinutí), lze pomocí hodnoty rezistorů R8, R9 a kondenzátoru C8 ovlivnit rychlost nabíjení kondenzátoru a tím nepřímo i maximální proud tekoucí induktorem. S použitými součástkami je proud nastaven (téměř nezávisle na vstupním napětí s výjimkou nízkých vstupních napětí) na hodnotu kolem 1,5 A. (Pro ilustraci vlivu zvýšení kapacity byl pro výukové účely

přidán kondenzátor C9, který lze připojit k obvodu pomocí propojky JP1. Připojení C9 má za následek zvýšení maximální hodnoty spínacího proudu, tj. zvýšení výkonu měniče.)

Mezi pomocné vinutí a rezistor R8 byly přidány diody D13 – D15. Tyto diody zde slouží k tomu, aby při malých napětích na vstupu (a tedy i na pomocném vinutí) vyřadily (díky jejich úbytkům napětí v propustném směru) pomocný (vypínací) tranzistor Q4 z činnosti (spínací tranzistor Q2 se v těchto situacích vypíná tak, že se dostane do saturace); toto má za následek nižší zatížení pomocného vinutí, tedy i nižší zatížení spínacích tranzistorů. To je důležité tehdy, když ještě nedošlo k sepnutí spínacího MOSFETu při malých vstupních napětích: z důvodu relativně velkého odporu spínacího JFETu jím při malém vstupním napětí teče malý proud, proto jakékoliv snížení odběru proudu z pomocného a sekundárního vinutí při nízkých vstupních napětích znamená nižší zátěž spínacího JFETu, čímž dojde ke snížení minimálního vstupního napětí měniče, které je potřebné pro fungování měniče.

Za účelem omezení odběru energie ze sekundárního vinutí při malých napětích byla použita usměrňovací dioda D12 s vyšším úbytkem napětí v propustném směru (1N4148). To má za následek dvě věci: snížení napětí, při kterém je měnič schopen funkce, a zhoršení účinnosti. Účinnost by se teoreticky dala zvýšit použitím synchronního usměrňování, které by začalo fungovat po nastartování tohoto měniče.

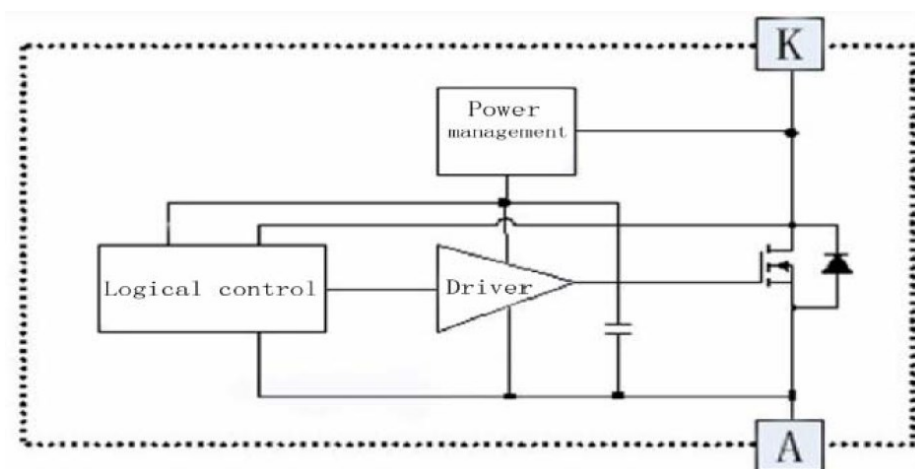
Vzhledem k tomu, že tento měnič je schopen dodávat na výstup pouze jednotky až desítky mA, proud na výstupu tohoto měniče není (zejména při nízkých vstupních napětích) dostatečně velký na to, aby dokázal pokrýt spotřebu IO DC/DC kontroléru. Proto je na výstup tohoto měniče připojen kondenzátor C7 jako zásobárna energie pro start IO. (Napětí potřebné pro start měniče je 4,5 V, minimální pracovní napětí po startu IO je 2,5 V.) Vzhledem k výše uvedenému není nutná regulace výstupního napětí startovacího měniče, nicméně pro případ nižší spotřeby IO DC/DC kontroléru, než jaký proud dodává startovací měnič na svůj výstup, byla na výstup měniče připojena ochranná lavinová dioda D16 (se Zenerovým napětím 9,1 V), která tak omezí maximální napětí na výstupu tohoto měniče, aby nedošlo k proražení spínacích tranzistorů Q1 a Q2.

Pro ochranu spínacích tranzistorů Q1 a Q2 byla k primárnímu vinutí připojena ochranná Schottkyho dioda D5, která ochrání spínací tranzistory při rozepínání před napěťovou špičkou svedením proudu tekoucího primárním vinutím na výstup startovacího měniče. Navíc urychlí start

startovacího měniče při vyšších vstupních napětích: při připojení napětí na vstup startovacího měniče se přes primární vinutí transformátoru a tuto diodu D5 nabije výstupní kondenzátor na napětí blízké se napětí na vstupu měniče. Kvůli této diodě D5 na výstupu startovacího měniče bude vždy přítomné napětí menší nebo rovné vstupnímu napětí (sníženému o úbytek na této diodě). To ovšem nevadí, protože při vypnutí měniče pro napájení LED (např. připojením vstupu Run na společný vodič) bude mít IO DC/DC kontroléru zanedbatelnou spotřebu, a pokud výkonnější měnič bude v provozu, bude na výstupu tohoto (startovacího) měniče napětí rovné výstupnímu napětí výkonnějšího měniče snížené o úbytek napětí na diodě D19 (viz schéma obr. 33 v příloze).

5.2.3 Synchronní usměrnění

Pro synchronní usměrnění lze použít např. IO DK5V45R20, podrobnosti viz [33]. Tento obvod lze použít, pokud měnič splňuje podmínku funkce v DCM a flyback zapojení, což je v tomto případě splněno. Blokové schéma tohoto obvodu je na obr. 24. Tento synchronní usměrňovač obsahuje řídicí obvody a spínací MOSFET tranzistor. Pokud řídicí obvod detekuje proud tekoucí diodou spínacího tranzistoru (pomocí úbytku napětí na diodě), sepne spínací tranzistor. Tranzistor je sepnut, dokud napětí U_{DS} na spínacím tranzistoru neklesne k nule. Při změně orientace napětí na sekundárním vinutí se uvnitř obvodu nabíjí kondenzátor zajišťující napájení obvodu. Pokud kondenzátor obvodu není nabitý, obvod se chová jako klasická usměrňovací dioda. Než by tedy startovací měnič nastartoval, fungoval by tento IO jako usměrňovací dioda (s vyšším úbytkem napětí), po startu měniče by se nabil kondenzátor a obvod by se choval jako synchronní usměrňovač.



Obr. 24: Blokové schéma synchronního usměrňovače DK5V45R20, převzato z [33].

Vzhledem k tomu, že výrobce neudává vlastní spotřebu obvodu ani proud, při kterém je spínací tranzistor sepnut a rozepnut, není jisté, zda by použití tohoto obvodu zvýšilo účinnost startovacího měniče. Sekundárním vinutím startovacího měniče tečou poměrně malé proudy, je tedy možné, že by ani k sepnutí spínacího tranzistoru nedošlo. Vzhledem k tomu, že IO obsahuje kondenzátor, který se při startu měniče musí nabít, je pravděpodobné, že by v důsledku toho došlo ke zvýšení potřebného vstupního napětí pro start měniče. Vzhledem k tomu, že startovací měnič je určen (zejména) pro nastartování výkonnějšího měniče a bude tedy většinu času vypnutý, ztrácí použití synchronního usměrnění smysl a použití synchronního usměrnění tedy zavrhuje.

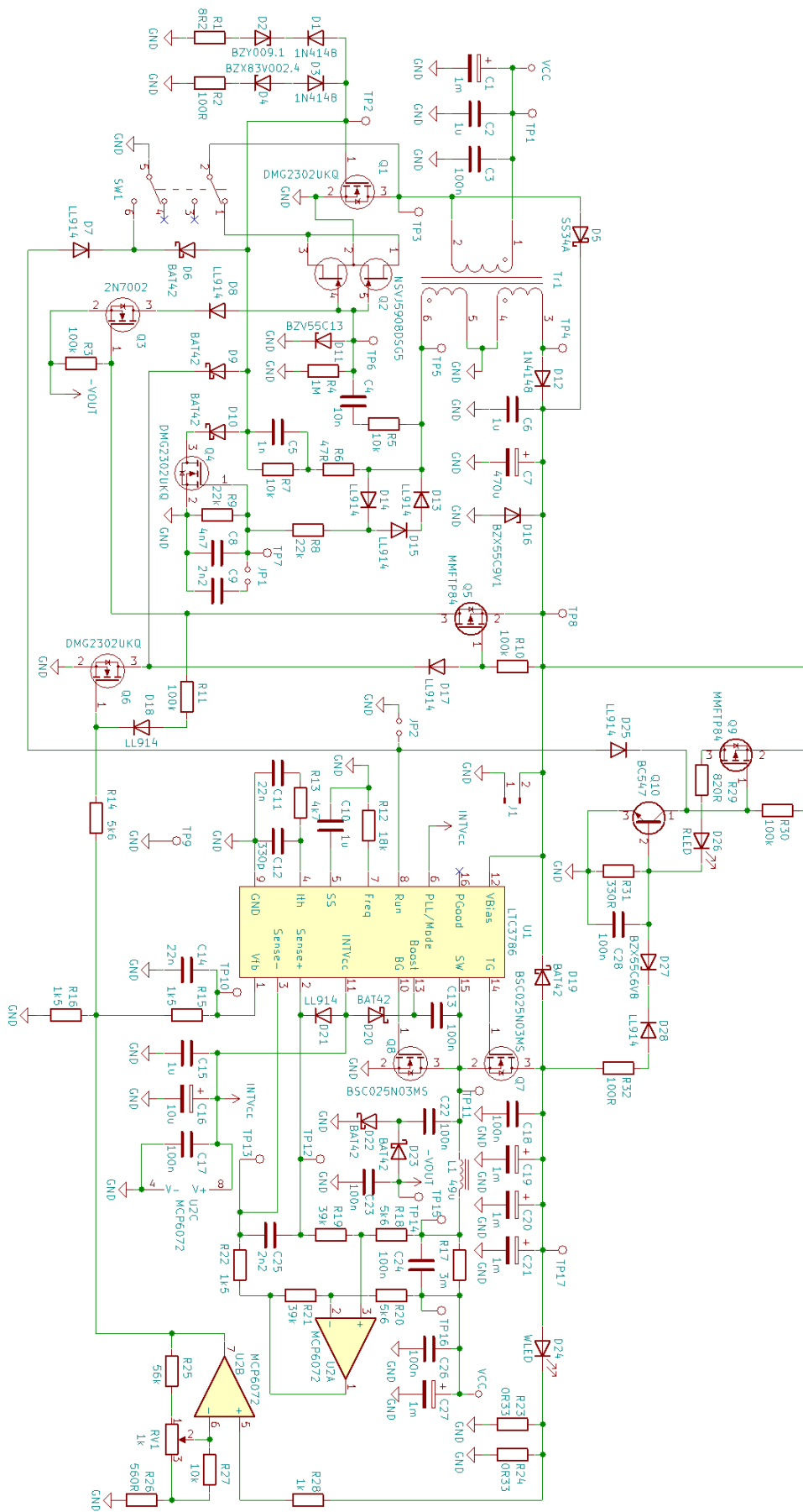
5.2.4 Výběr jádra transformátoru a vinutí

Požadovaná indukčnost primárního vinutí byla ze simulace stanovena na hodnotu asi 50 μH , poměr počtu závitů byl zvolen $N_1:N_2:N_3 = 1:10:10$. Za účelem snížení počtu závitů vinutí (z důvodu snížení odporu vinutí a úspory místa) bylo upřednostněno jádro s větší cívkovou konstantou. Pro proudy tekoucí primárním vinutím o hodnotě kolem 1,5 A i rozměrově (pro daný počet závitů) vyhovuje stejné hrníčkové jádro, které bylo použito pro induktor zvyšujícího měniče (podrobnosti viz [27]). Jeho cívková konstanta je rovna 1 μH , což pro požadovanou indukčnost odpovídá asi 7 závitům primárního vinutí a 70 závitům sekundárního a pomocného vinutí.

Tento měnič pracuje v DCM módu, převládá tedy střídavá složka proudu. Pro omezení ztrát vlivem skinefektu (při spínací frekvenci v řádu desítek kilohertzů) bylo primární vinutí vinuto dvěma měděnými vodiči o průměru 0,4 mm, sekundární vinutí bylo vinuto jedním vodičem o průměru 0,4 mm a na pomocné vinutí byl použit drát o průměru 0,3 mm. [34]

5.3 Vypínání měničů

Vypnutí startovacího měniče lze realizovat připojením řídicí elektrody spínacího MOSFETu Q1 na společný vodič a zároveň připojením řídicí elektrody spínacího JFETu Q2 na záporné napětí (např. pomocí dalších pomocných/vypínacích MOSFETů), viz schéma, obr. 25. Jako zdroj záporného napětí může posloužit nábojová pumpa (ve schématu součástky C22, C23, D22, D23) v zapojení jako zdroj záporného napětí (viz kapitola 3.2 a obr. 4): jako spínač lze využít spínací tranzistory připojené k DC/DC kontroléru. Při asi 6 V na výstupu výkonnějšího měniče bude na výstupu nábojové pumpy po odečtení úbytků na diodách kolem 5 V, což je dostatečné pro rozepnutí JFET tranzistoru.



Obr. 25: Schéma zapojení (vypínání) měničů.

Pro pomocné (vypínací) MOSFETy je třeba generovat signál sloužící k jejich sepnutí. Jako zdroj signálu by teoreticky mohl posloužit výstup PGood DC/DC kontroléru (open drain výstup), který signalizuje (logickou 1), že napětí (resp. v našem případě proud) na výstupu měniče je v příslušné toleranci. Nevýhoda takového řešení je, že jakmile by napětí na vstupu měniče kleslo na hodnotu, při které ani při maximální střídě není měnič schopen dodat na výstup požadovaný proud, na výstupu PGood by se objevila logická nula a došlo by ke spuštění pomocného měniče.

Další možnost je použít MOSFET s nízkým prahovým napětím Q6, jehož řídicí elektroda bude přes rezistor R14 připojena na výstup OZ sloužícího k zesílení úbytku napětí na snímacích rezistorech připojených k LED. Tento tranzistor spíná už při napětí kolem 0,4 V (zjištěno experimentálně). Při zavedení kladné zpětné vazby přes tranzistor Q5 (a součástky R11, D18), jehož výstup může být zároveň použit k sepnutí MOSFETu Q3 pro vypínání spínacího JFET tranzistoru Q2 (přes D8), může být startovací měnič vypnut. Tranzistor Q3 je připojen k nábojové pumpě generující záporné napětí. (Vzhledem k tomu, že při velmi nízkých napětích na vstupu obou měničů (desetiny voltu), kdy ani při maximální střídě DC/DC kontrolér není schopen dodat na výstup požadovaný proud, je schopen startovací měnič vypomoci výkonnějšímu měniči, což se projeví mírným zvýšením výkonu měniče, byla zpětná vazba nastavena tak, aby došlo k nastartování startovacího měniče, pokud je výstupní proud výkonnějšího měniče nižší než asi čtvrtina nastaveného proudu – to je značně nižší proud, než při kterém by došlo ke startu měniče při použití výstupu PGood DC/DC kontroléru.)

Pro manuální vypnutí obou měničů lze použít mechanický vypínač. Pokud by však vstupy měničů byly ke zdroji energie (superkondenzátoru) připojeny přímo přes tento vypínač, sepnutím vypínače by vlivem malých ESR superkondenzátoru a vstupních filtračních kondenzátorů došlo k výskytu velké proudové špičky v řádu desítek ampérů při nabíjení filtračních kondenzátorů, na což tyto kondenzátory (a ani spínače obecně) nejsou stavěné. Z tohoto důvodu je třeba najít jinou variantu zapínání.

DC/DC kontrolér disponuje vstupem označeným Run. Připojením vstupu Run na společný vodič dojde k vypnutí obvodu. To lze realizovat např. pomocí již výše zmíněného vypínače. Na výstupu měniče ale i přesto bude napětí: napětí na výstupu bude rovné napětí zdroje (superkondenzátoru) sníženému o propustné napětí diody horního spínacího tranzistoru Q7. Toto napětí však bude vždy menší než propustné napětí bílých LED (dvě LED v sérii) připojených na

výstup, tzn. že přítomnost napětí na výstupu měniče nevádí – svítkami nepoteče prakticky žádný proud.

Startovací měnič lze pomocí vypínače vypnout odpojením drainu spínacího JFETu Q1 od transformátoru a připojením řídicí elektrody spínacího MOSFETu na společný vodič. K tomuto účelu je nutno použít dvoupólový vypínač SW1: jeden pól bude sloužit k odpojení spínacího JFETu Q1, druhý pól pak může sloužit k připojení řídicí elektrody spínacího MOSFETu Q2 a zároveň vstupu Run DC/DC kontroléru na společný vodič. Aby se vstup Run neovlivňoval s řídicí elektrodou MOSFETu Q2, budou oba zapojeny přes diody D6 a D7, viz obr. 25.

Díky takovéto realizaci vypínání měničů lze mít trvale připojený superkondenzátor ke vstupům měničů, a přitom nebude docházet k žádným proudovým špičkám při jejich zapnutí vlivem nabíjení vstupních filtračních kondenzátorů měničů.

6 Výroba přípravku, oživování

Vzhledem k tomu, že byl přípravek vyráběn v období koronavirové krize, kdy docházelo k omezování volného pohybu osob, hromadné dopravy i činnosti některých firem, byla zvolena výroba DPS v domácích podmínkách. Z toho důvodu byla navržena pouze jednovrstvá DPS, která byla vyrobena metodou přezhelení toneru z laserové tiskárny na měděnou vrstvičku budoucí DPS, a to z důvodu předchozích zkušeností autora s touto metodou. Přestože tato metoda není vhodná pro komplikovanější DPS, výroba destičky se v rámci možností zdařila. Foto vyrobené DPS, motiv DPS, osazovací plánek a seznam součástek jsou k dispozici v příloze.

Oživování startovacího měniče probíhalo relativně bez problémů – po přidání kondenzátoru C1 (viz např. obr. 33, příloha), rezistoru R4 na řídicí elektrodu tranzistoru JFET a následné úpravě hodnot některých součástek (např. R1, R2, C5, C8) měnič spolehlivě funguje v celém rozsahu napětí $0,2 \div 2,8$ V.

Při oživování měniče určeného pro napájení LED bylo problémů více. Problémy byly zejména se zakmitáváním měniče. Vlivem toho, že IO DC/DC měniče reaguje na změnu proudu na výstupu s určitým zpožděním, než stačil měnič na změnu hodnoty proudu zareagovat, hodnota přesáhla určitou toleranci a IO tak začal napětí z výstupu snižovat, proud začal téci z výstupu na vstup měniče (obvod se tak choval jako snižující měnič se synchronním usměrněním). Tyto

zákmity byly doprovázeny nejen znatelným poklesem účinnosti, ale i hlasitými akustickými projevy vycházející od induktoru (přestože spínací frekvence je nastavena na asi 50 kHz).

Vlivem šumu na výstupech použitého OZ a rušení na vstupech Sense+, Sense– a Vfb také docházelo k nekonstantní střídě signálu (při konstantním zatížení) pro spínací tranzistory, což mělo za následek slyšitelný akustický šum induktoru. Šum se téměř podařilo odstranit filtrováním pomocí dolních propustí (RC filtry) na vstupech DC/DC kontroléru – je slyšitelný pouze při omezování střídě signálu při velkých proudech tekoucích induktorem, nicméně úroveň tohoto šumu je nízká.

Zákmity se podařilo odstranit optimalizací hodnot součástek C11, C12, R13 na pomocném výstupu Ith DC/DC kontroléru, vynucením CCM i při nízkém zatížení měniče (připojením vstupu 6 PLL/MODE na pomocný výstup 11 INTV_{CC}) a zejména zvětšením připojené kapacity C10 na vstupu 5 SS (soft-startu) ze (v datasheetu uvedených) 100 nF na 1 μ F, což má za následek pomalejší nárůst napětí na výstupu měniče po jeho spuštění, tzn. zpětná vazba stihne vlivem pomalejšího nárůstu napětí včas zareagovat a omezit střídě signálu pro spínací tranzistory tak, aby nastavený proud nepřekročil příslušnou mez. Zapojení bylo vyzkoušeno pro různá vstupní napětí a různé výstupní proudy v rozsahu 75 mA ÷ 190 mA s příslušnou LED a bylo zjištěno, že se kmity prakticky nevyskytují, resp. pokud už se vyskytnou, pak jen velice krátce při startu měniče.

Pro LED jako výstupní zátěž (pro něž je tento měnič určen) je měnič funkční, nicméně není zaručeno, že by jako zdroj proudu korektně (tj. bez zákmítů a akustických projevů) fungoval i pro jiný typ zátěže – zejména takové, která vyžaduje rychlou reakci zpětné vazby (a to i z důvodu velké hodnoty filtračních kondenzátorů na výstupu měniče). (Použitý IO DC/DC kontroléru je standardně určen pro použití jako zdroj konstantního napětí, nikoliv proudu. Při použití tohoto IO jako zdroje konstantního napětí by k takovýmto problémům velice pravděpodobně vůbec nedošlo. Pro použití IO jako zdroje konstantního napětí by stačilo na vstup 1 Vfb místo výstupu OZ připojit rezistorový dělič, na kterém by bylo napětí 1,2 V při požadovaném výstupním napětí, a změnit hodnoty součástek C11, C12, R13 na hodnoty uvedené v datasheetu.)

Další problémy byly s opětovným zapínáním startovacího měniče těsně po vypnutí měniče, kdy sice došlo k sepnutí spínacího JFETu (ve schématu tranzistor Q2, obr. 33, příloha), ale nedošlo k sepnutí spínacího MOSFETu (Q1). Bylo zjištěno, že na výstupu 7 OZ (U2B) bylo

přítomno napětí, které způsobovalo částečné sepnutí tranzistoru Q6, který zabraňoval spínání Q1. Problém byl vyřešen jednoduše přidáním rezistoru R16 na výstup OZ.

7 Vlastnosti realizovaných měničů

Společná vlastnost měničů je, že na jejich výstupech je přítomné napětí, i když je vypínač vypnutý. Toto napětí se přibližně rovná napětí na vstupech měničů. Zdroje tedy nejsou zkratu-vzdorné, při trvalém provozu se superkondenzátorem jako zdrojem elektrické energie je třeba použít adekvátní pojistku, při napájení měničů laboratorním zdrojem je třeba správně nastavit proudové omezení (kolem 3,5 A).

Vzhledem k tomu, že vstupy obou měničů jsou i při vypnutém vypínači připojeny ke zdroji elektrické energie (pokud je zapojen), spotřebovávají určitý (klidový) proud. Tento proud byl změřen a pro napětí na vstupech měničů 2,5 V se pohybuje kolem 50 μ A. To je proud řádově srovnatelný se svodovým proudem superkondenzátorů.

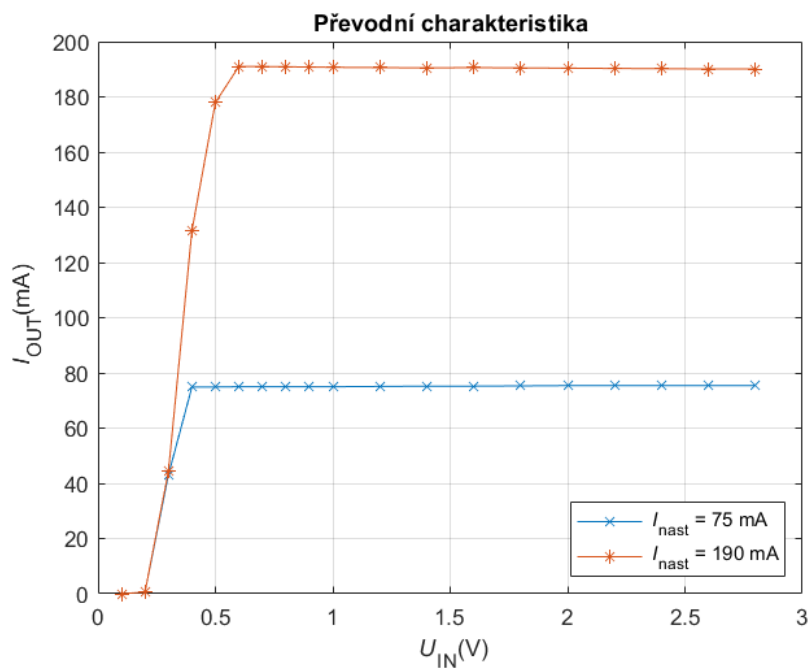
7.1 Vlastnosti měniče pro napájení LED

Měnič pro napájení LED je určen pro napájení svítek s pracovním napětím asi 6 V. Rozsah výstupního napětí je tedy 5 V \div 7 V, proud na výstupu lze regulovat v rozsahu asi 75 mA \div 190 mA. Rozsah vstupních napětí měniče je 0,2 V \div 2,8 V, maximální vstupní proud je omezen na přibližně 3,25 A. Měnič disponuje ochranou před překročením napětí na výstupu měniče nad asi 8 V; při překročení tohoto napětí dojde k vypnutí měniče pro napájení LED (a zapnutí startovacího měniče) a rozsvícení červené LED indikující překročení výstupního napětí nad stanovenou mez. Pro resetování této ochrany stačí vypnout vypínač a vyčkat několik sekund, dokud červená LED nezhasne.

Pro zjištění vlastností měniče určeného k napájení LED byly změřeny převodní charakteristika, zatěžovací charakteristika a závislost účinnosti měniče na vstupním napětí, viz obr. 26, obr. 27, obr. 28 a obr. 29, resp. tab. 2, tab. 3, tab. 4 a tab. 5 v příloze. Je třeba připomenout, že startovací měnič se vypne, pokud proud tekoucí LED překročí asi třetinu nastavené hodnoty I_{nast} , zapíná pak při poklesu proudu LED pod asi čtvrtinu I_{nast} . Měření probíhalo vždy od nejvyššího vstupního napětí k nejnižšímu, tzn. startovací měnič začal fungovat při proudu

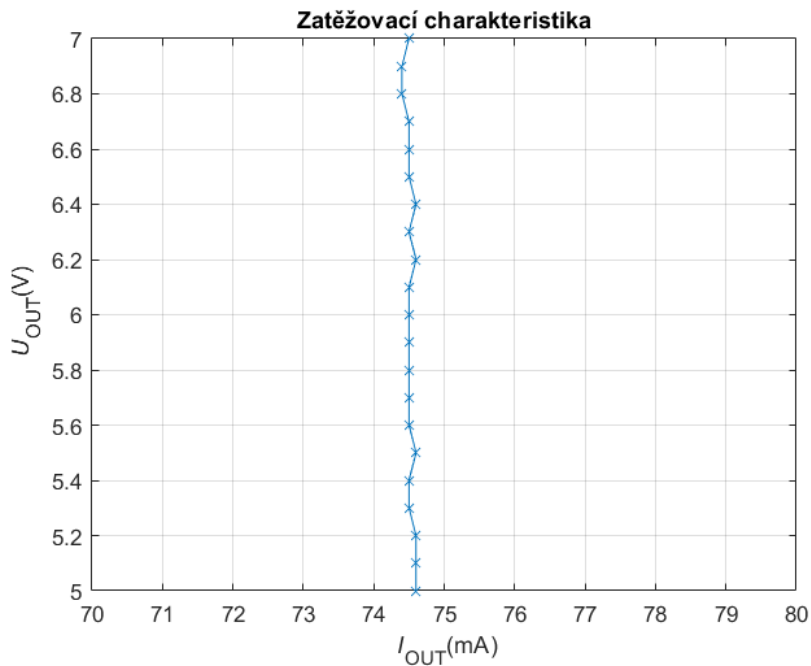
tekoucím LED rovném asi čtvrtině I_{nast} a vypomáhal měniči pro napájení LED při nízkých vstupních napětích pod asi 0,3 V nebo 0,4 V.

Převodní charakteristika byla měřena se zátěží v podobě LED s propustným napětím asi 6 V na výstupu měniče (podrobnosti o použité LED viz [36]). Proud tekoucí LED byl nastaven na asi 75 mA a 190 mA, tedy přibližně na minimální a maximální možnou hodnotu. Z grafu převodní charakteristiky, obr. 26, vyplývá, že při napětí na vstupu měniče asi 0,5 V už je měnič schopen dodávat nastavený proud, nicméně měnič je (s omezeným výkonem) použitelný už od vstupního napětí kolem 0,35 V.

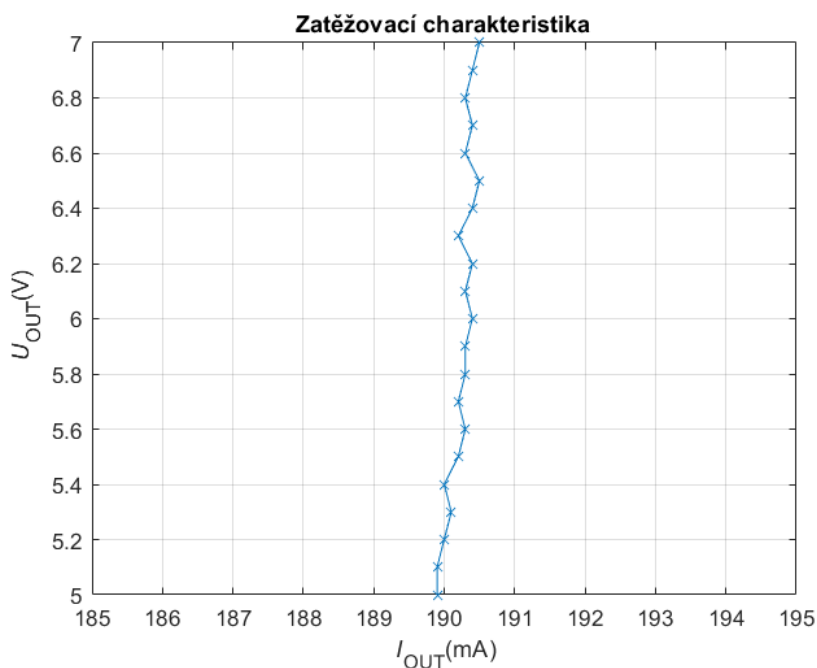


Obr. 26: Převodní charakteristika měniče pro napájení LED.

Dále byla měřena zatěžovací charakteristika měniče v rozsahu napětí na výstupu 5 V ÷ 7 V, pro které je tento měnič určen. Měření probíhalo při vstupním napětí 1,25 V. Charakteristika byla měřena pro nastavený proud přibližně 75 mA a 190 mA. Z grafů (obr. 27, obr. 28) je patrné, že nastavený proud v rozsahu výstupních napětí 5 V ÷ 7 V je téměř konstantní, odchylky jsou v řádu desetin mA (desetin procent nastavené hodnoty); měnič se tedy chová jako zdroj proudu a je vhodný pro napájení LED.

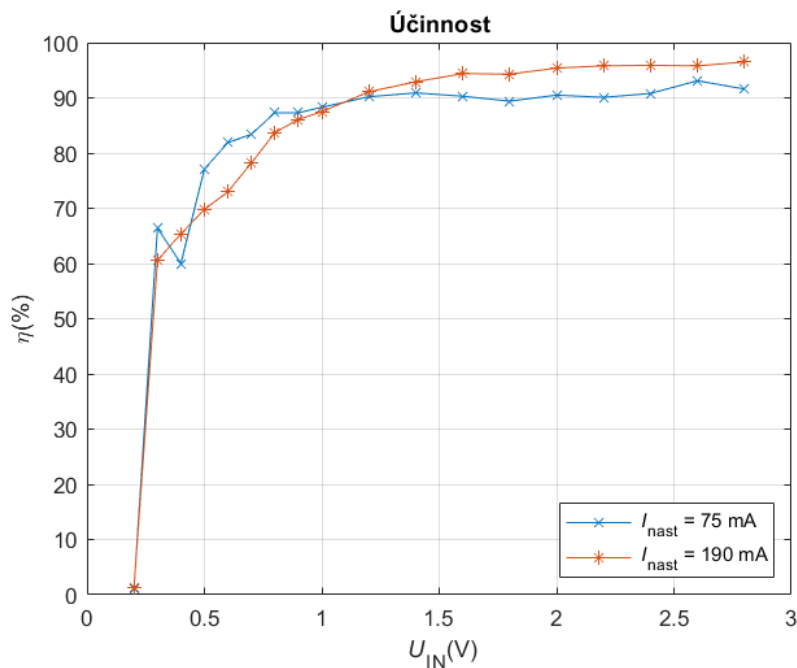


Obr. 27: Zatěžovací charakteristika měniče pro napájení LED, $I_{nast} = 75$ mA.



Obr. 28: Zatěžovací charakteristika měniče pro napájení LED, $I_{nast} = 190$ mA.

Účinnost měniče pro napájení LED byla měřena taktéž s výše uvedenou LED připojenou na výstup měniče pro hodnoty I_{nast} rovné přibližně 75 mA a 190 mA. Z grafu (obr. 29) vyplývá, že účinnost měniče je od napětí na vstupu kolem 0,5 V větší než 70 % a od napětí asi 1,25 V větší než 90 %. To je pravděpodobně dáno zejména velkými vstupními proudy při nízkém napětí.

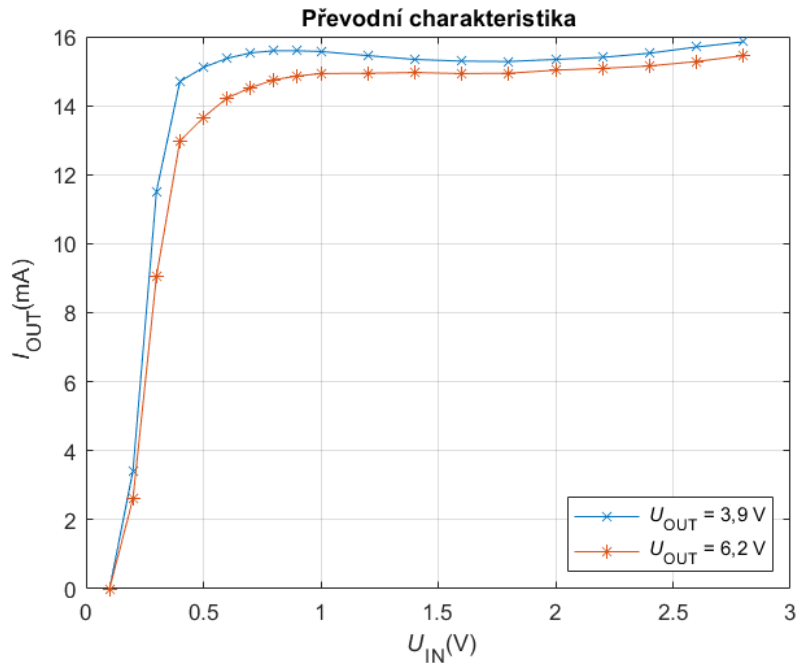


Obr. 29: Účinnost měniče pro LED v závislosti na vstupním napětí.

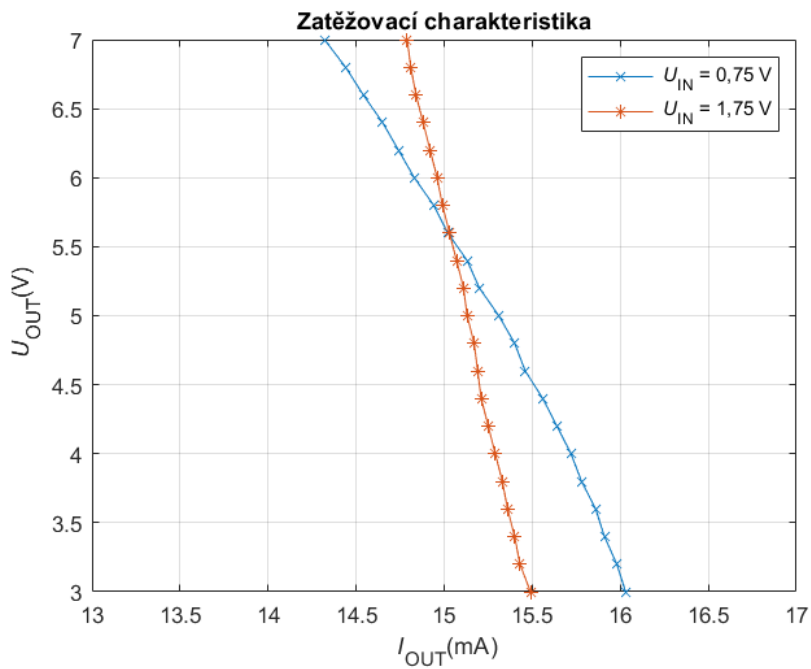
7.2 Vlastnosti startovacího měniče

Startovací měnič je určen pro zvyšování napětí pro spuštění IO DC/DC kontroléru, který se spouští při napětí kolem 4,5 V (dokud napětí nepřekročí tuto hodnotu, IO neodebírá téměř žádný proud). Startovací měnič je určen pro provoz při napětích na výstupu zhruba v rozsahu 3 V ÷ 7 V. Výstup měniče není regulován, maximální napětí na výstupu měniče je omezeno lavinovou diodou na hodnotu kolem 9,1 V. Rozsah vstupních napětí je 0,2 V ÷ 2,8 V, měnič odebírá ze vstupu desítky až stovky mA. Vzhledem k tomu, že se tento měnič chová podobně jako zdroj proudu, byly jako zátěž měniče při měření převodní charakteristiky a účinnosti měniče použity Zenerovy (resp. lavinové) diody o Zenerově napětí 3,9 V a 6,2 V. Naměřené hodnoty jsou k dispozici v příloze, tab. 6, tab. 7, tab. 8 a tab. 9. Naměřené údaje zobrazují grafy na obr. 30, obr. 31 a obr. 32.

Převodní charakteristika byla měřena se zátěží měniče v podobě Zenerových (resp. lavinových) diod. Graf převodní charakteristiky je na obr. 30. Z grafu je patrné, že od napětí asi 0,6 V na vstupu měniče je proud tekoucí do zátěže téměř konstantní, rovný přibližně 15 mA. Zároveň je vidět, že velikost proudu tekoucího do zátěže téměř nezávisí na výstupním napětí měniče.



Obr. 30: Převodní charakteristika startovacího měniče.

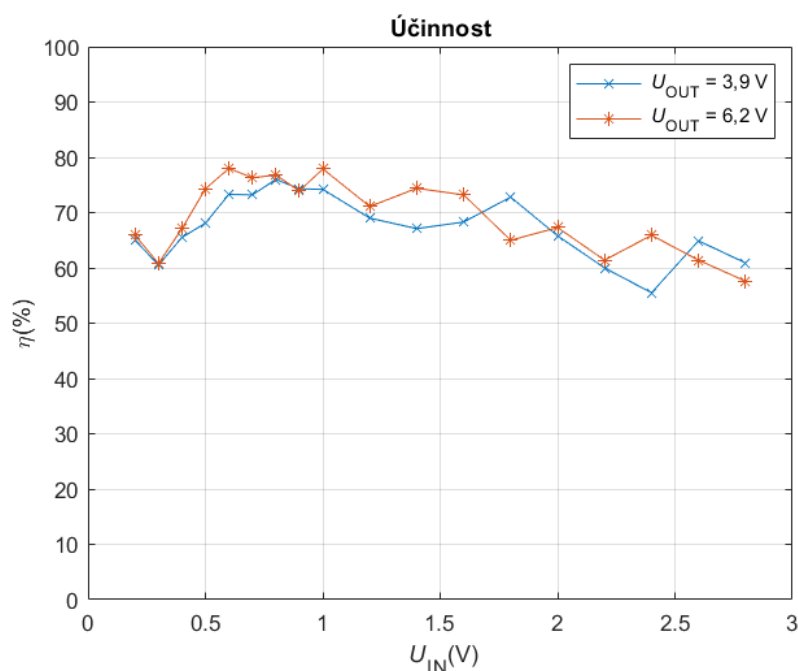


Obr. 31: Zatěžovací charakteristika startovacího měniče.

Zatěžovací charakteristika startovacího měniče byla měřena pro hodnoty vstupního napětí 0,75 V a 1,75 V v rozsahu výstupních napětí 3 V ÷ 7 V. Graf zatěžovací charakteristiky je zobrazen na obr. 31. Z té je patrné, že průběh výstupního proudu v závislosti na výstupním napětí se blíží zdroji proudu. Průběh je strmější pro napětí na vstupu 1,75 V a mírnější pro 0,75 V. Graf

nicméně ukazuje, že v rozsahu výstupních napětí 3 V ÷ 7 V je proud tekoucí na výstup roven přibližně 15 mA a s klesajícím napětím na výstupu mírně roste.

Dále byla měřena účinnost startovacího měniče v závislosti na vstupním napětí pro napětí na zátěži přibližně 3,9 V a 6,2 V. Graf je na obr. 32. Z něj vyplývá, že účinnost tohoto měniče se pohybuje v rozmezí asi 55 % ÷ 80 %. Přestože vykreslený průběh účinnosti silně kolísá (kvůli malému rozlišení ampérmetru, kterým byl měřen proud tekoucí na vstup měniče), je z tohoto grafu patrné, že nejvyšší účinnost má měnič při vstupním napětí kolem 0,75 V, nejnižší pak při napětích nad 2 V a pod 0,4 V.



Obr. 32: Účinnost startovacího měniče v závislosti na vstupním napětí.

8 Zhodnocení výsledků

Z naměřených charakteristik měniče pro napájení LED vyplývá, že měnič se chová jako zdroj proudu, přičemž odchylka hodnoty proudu se pro výstupní napětí v rozsahu 5 V ÷ 7 V pohybuje v řádu desetin mA (resp. pod 1 % z nastavené hodnoty), což je dostatečné pro napájení LED. Účinnost až 95 % pro vyšší vstupní napětí je velice dobrá, s nižším napětím na vstupu a s vyššími vstupními proudy účinnost postupně klesá na asi 70 % při napětí na vstupu 0,5 V. Pro zvýšení účinnosti při nízkých vstupních napětích by pravděpodobně bylo třeba snížit odpor vodivých cest na DPS (např. použitím destičky s tlustší měděnou vrstvičkou), dále pak ještě

více minimalizovat odpor použitých součástek (spínacích tranzistorů, snímacího rezistoru a vinutí induktoru). Vzhledem k tomu, že měnič pro napájení LED je schopen pracovat až do napětí asi 0,5 V, resp. s omezeným výkonem i do napětí kolem 0,35 V (platí pro použitou LED), je tak schopen využít asi 96 % energie uložené v superkondenzátoru (viz obr. 1, kapitola 2), což je o přibližně 10 % více, než běžný měnič fungující pouze při vstupním napětí vyšším než 1 V.

Z převodní charakteristiky startovacího měniče je patrné, že tento měnič funguje už od vstupního napětí 0,2 V a proud kolem 15 mA je schopen dodat na výstup při vstupním napětí vyšším než asi 0,6 V. Při nižších vstupních napětích, kdy dodává nižší proud na výstup, může start měniče pro napájení LED trvat delší dobu (v řádu desetin, případně jednotek sekund). Účinnost startovacího měniče se pohybuje v rozmezí asi 55 % ÷ 80 %, nicméně vzhledem k tomu, že je tento měnič většinu času vypnutý, nižší účinnost nehraje velkou roli.

Oba měniče byly úspěšně otestovány (na laboratorním zdroji i na dvou paralelně zapojených superkondenzátorech o udávané kapacitě 22 F) s různými vstupními napětími a s různými nastavenými proudy tekoucími LED. Z testování vyplynulo, že měniče jsou plně funkční, nicméně při nízkých napětích na vstupech měničů však může být slyšet akustický šum vycházející z induktoru měniče pro napájení LED a pískání vycházející z transformátoru startovacího měniče (startovací měnič pracuje při nízkých napětích na slyšitelných frekvencích). Úroveň hlasitosti pískání i šumu je nízká, není tedy překážkou pro užívání měničů.

Jako možné vylepšení měničů se nabízí zvýšení pracovní frekvence: vyšší pracovní frekvence by měla za následek nižší hodnotu kapacity použitých filtračních kondenzátorů a nižší cívkovou konstantu jádra transformátoru a induktoru, bylo by tak možné použít menší (i rozměrově) a levnější komponenty. Zároveň by tím bylo odstraněno pískání startovacího měniče při nízkých vstupních napětích, protože startovací měnič pracuje při nízkých napětích na slyšitelných frekvencích.

9 Závěr

Cíle této práce byly:

1. Návrh a realizace měniče pro napájení LED schopného maximalizovat využití energie akumulované v superkondenzátoru.
2. Test funkčnosti tohoto měniče, měření dosažených parametrů.
3. Zhodnocení výsledků a návrh možných budoucích řešení.

Měnič určený k napájení LED byl realizován ve step-up zapojení s DC/DC kontrolérem – IO LTC3786. Pro generování dostatečného napětí pro start IO byl realizován druhý měnič, startovací. Z důvodu absence vhodného IO (schopného funkce při napětí v řádu desetin voltů) pro řízení tohoto měniče byl měnič realizován jako samokmitající měnič ve flyback zapojení. Pro měniče byla navržena a vyrobena jednovrstvá DPS.

Pro ověření vlastností měničů byly změřeny zatěžovací a převodní charakteristiky, dále pak závislost účinnosti měničů na vstupním napětí. Měniče byly testovány na laboratorním zdroji i superkondenzátorech.

Z měření měničů vyplývá, že jsou schopny využít asi 96 % energie akumulované v superkondenzátoru, fungují i při nízkém vstupním napětí kolem 0,5 V a jsou vhodné pro napájení LED. Z testování měničů plyne, že měniče slouží svému účelu a jsou plně funkční. Při nízkém vstupním napětí měničů je však slyšitelné pískání a akustický šum měničů, nicméně úroveň pískání (šumu) je nízká.

Jako možné vylepšení se nabízí zvýšení spínací frekvence měničů pro omezení velikosti součástek a snížení jejich ceny, což by pravděpodobně odstranilo pískání startovacího měniče.

10 Použitá literatura

- [1] Supercapacitor Information: How does a Supercapacitor Work? In: *Battery University* [online]. 17. 4. 2019 [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/learn/article/whats_the_role_of_the_supercapacitor
- [2] ABRUÑA, Héctor D., Yasuyuki KIYA a Jay C. HENDERSON. Batteries and Electrochemical Capacitors. In: *University of Colorado Boulder: Electrical, Computer & Energy Engineering* [online]. Prosinec 2008 [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <http://ecee.colorado.edu/~ecen4555/SourceMaterial/ElectricalEnerStor1208.pdf>
- [3] DĚDOUREK, Pavel. Superkondenzátor – princip, použití. In: *Dědalebeda* [online]. 15. 5. 2007 [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: http://www.dedalebeda.wz.cz/skola/upload/02FM1/super_capacitor.pdf
- [4] Stabilizátor napětí. In: *Wikipedie: otevřená encyklopedie* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Stabilizátor_napětí
- [5] NOVÁK, Jan. Lineární stabilizátory: parametrické, diskrétní, integrované trísrvorkové. In: *Moodle FEL* [online]. 2. 3. 2015 [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <https://moodle.fel.cvut.cz/mod/resource/view.php?id=36474>
- [6] L78: Datasheet. In: *STMicroelectronics* [online]. září 2018 [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/l78.pdf>
- [7] PATOUX, Jerome. Ask The Applications Engineer—37: Low-Dropout Regulators. In: *Analog Devices* [online]. květen 2007 [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/analog-dialogue/volume-41/number-2/articles/low-dropout-regulators.pdf>
- [8] KNIGHT, Dave. Introduction to Linear Voltage Regulators. In: *DigiKey* [online]. 13. 2. 2016 [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <https://www.digikey.com/en/maker/blogs/introduction-to-linear-voltage-regulators>
- [9] VLČEK, Jirí. Měniče napětí a spínané zdroje – teoretická základna. *TZB-Info: Elektronika* [online]. 30. 7. 2007 [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <https://elektro.tzb-info.cz/teorie-elektrotechnika/4263-menice-napeti-a-spinane-zdroje-teoreticka-zakladna>

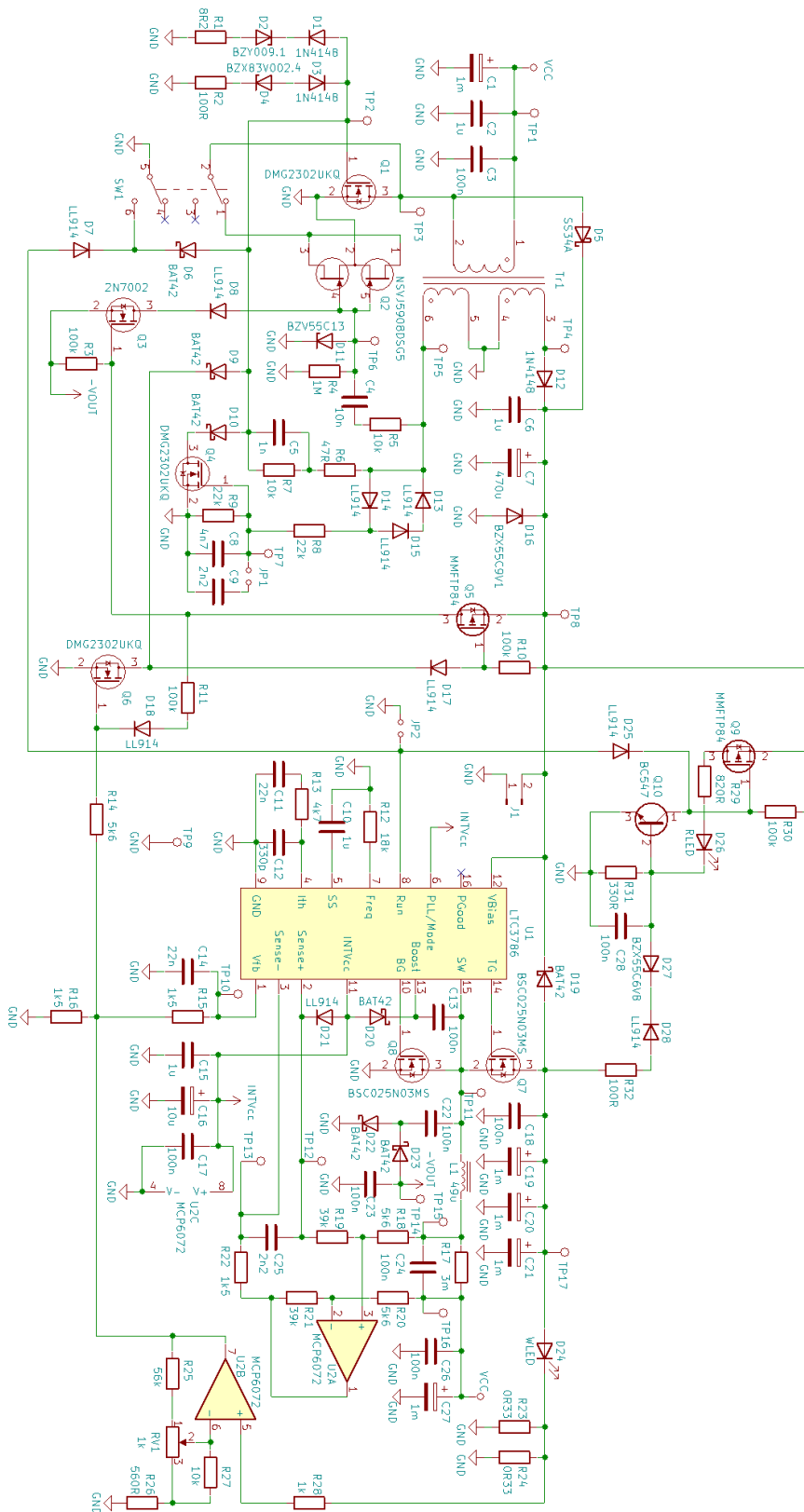
- [10] KREJČIŘÍK, Alexandr. *Napájecí zdroje I: Základní zapojení analogových a spínaných napájecích zdrojů*. 2. vydání. Praha: BEN - technická literatura, 1997. ISBN 80-86056-02-3.
- [11] *Impulzní zdroje a měniče II: Přehled topologií impulzních měničů (bez galvanického oddělení)*. [online]. [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <http://danyk.cz/menice.html>
- [12] *Impulzní zdroje a měniče I: Přehled topologií impulzních zdrojů (s galvanickým oddělením)*. [online]. [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <http://danyk.cz/zdroje.html>
- [13] Application Note 4087: Guide to Switch Mode Power Supply Basics. In: *Maxim Integrated* [online]. 27. 9. 2007 [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <https://www.maximintegrated.com/en/design/technical-documents/app-notes/4/4087.html>
- [14] Inductor and Flyback Transformer Design. In: *Texas Instruments* [online]. 2001 [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ml/slup127/slup127.pdf>
- [15] SCOTT, Kevin a Henry ZHANG. Switch Mode Power Supply Current Sensing - Part 3: Current Sensing Methods. *Analog Devices* [online]. [cit. 2020-01-05]. Dostupné z: <https://www.analog.com/en/technical-articles/switch-mode-power-supply-current-sensing-part-3-current-sensing-methods.html>
- [16] SEVERNS, Rudy. Design of Snubbers for Power Circuits. *Cornell Dubilier* [online]. [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <https://www.cde.com/resources/technical-papers/design.pdf>
- [17] *Impulzní zdroje a měniče III: Ochrana tranzistorů a MOSFETů* [online]. [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <http://danyk.cz/mosfety.html>
- [18] KIMBALL, J. W., T. L. FLOWERS a P. L. CHAPMAN. Issues with low-input-voltage boost converter design. In: *PESC Record – IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference*. 2004. DOI: 10.1109/PESC.2004.1355452.
- [19] Joule Thief Circuit How to Make and Circuit Explanation. *Instructables* [online]. [cit. 2019-12-24]. Dostupné z: <https://www.instructables.com/id/Joule-Thief-Circuit-How-to-Make-and-Circuit-Explan/>
- [20] S-882Z Series: Ultra-Low Voltage Operation Charge Pump IC For Step-up DC-DC Converter Startup. In: *DigiKey Electronics* [online]. [cit. 2019-12-24]. Dostupné z: [https://media.digikey.com/pdf/Data Sheets/Seiko Instruments PDFs/S-882Z.pdf](https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Seiko%20Instruments%20PDFs/S-882Z.pdf)

- [21] LTC3108: Ultralow Voltage Step-Up Converter and Power Manager. In: *Analog Devices* [online]. [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/LTC3108.pdf>
- [22] LTC3421: 3A, 3MHz Micropower Synchronous Boost Converter with Output Disconnect. In: *Analog Devices* [online]. [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/LTC3421.pdf>
- [23] LTC3786: Low IQ Synchronous Boost Controller. In: *Analog Devices* [online]. [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/3786fc.pdf>
- [24] TPS4306x: Low Quiescent Current Synchronous Boost DC-DC Controller With Wide VIN Range. In: *Texas Instruments* [online]. [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps43060.pdf>
- [25] LM5122: Wide-Input Synchronous Boost Controller With Multiple Phase Capability. In: *Texas Instruments* [online]. [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm5122.pdf>
- [26] MCP6071/2/4: 110 μ A, High Precision Op Amps. In: *Microchip* [online]. [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/22142_B_MCP6071.pdf
- [27] Lj P26x16-1000nH CF138: POT core - hrníčkové jádro s mezerou. In: *Semic Trade* [online]. [cit. 2019-12-24]. Dostupné z: <https://www.semic.cz/cz-detail-147120-lj-p26x16-1000nh-cf138.html>
- [28] BSC025N03MS G: OptiMOS™3 M-Series Power-MOSFET. In: *Infineon* [online]. [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-BSC025N03MSG-DS-v02_00-en.pdf?fileId=db3a304313d846880113de52b02d034c
- [29] Hitano EXR Series. In: *GM Electronic* [online]. [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.123-983.1.pdf>
- [30] DMG2302UKQ: N-Channel Enhancement Mode MOSFET. In: *Diodes Incorporated* [online]. [cit. 2019-12-24]. Dostupné z: <https://www.diodes.com/assets/Datasheets/DMG2302UKQ.pdf>

- [31] NSVJ5908DSG5: N-Channel JFET. In: *ON Semiconductor* [online]. [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/NSVJ5908DSG5-D.PDF>
- [32] HAVLÍK, Jan a Zdeněk HORČÍK. Zesilovače biologických signálů. In: *Web Server Noel* [online]. [cit. 2020-03-22]. Dostupné z: http://noel.feld.cvut.cz/vyu/x31zle/Lectures/04_Zesilovac.pdf
- [33] Synchronous Rectifier-DK5V45R20. In: *Global Sources* [online]. [cit. 2019-12-24]. Dostupné z: <https://p.globalsources.com/IMAGES/PDT/SPEC/915/K1144395915.pdf>
- [34] FAKTOR, Zdeněk. *Transformátory a tlumivky pro spínané napájecí zdroje*. Praha: BEN - technická literatura, 2002. ISBN 80-86056-91-0.
- [35] Self-oscillating circuit for 5V power supply. In: *Electronics Point* [online]. [cit. 2020-03-23]. Dostupné z: <https://www.electronicspoint.com/forums/threads/self-oscillating-circuit-for-5v-power-supply.244029/>
- [36] 3030N Series 2Sin1. *TME* [online]. 16. 8. 2018 [cit. 2020-04-16]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/Document/7e4caef7b63954df377f9d4fbdd95e7c/LEMWS36X80.pdf>
- [37] ZÁHLAVA, Vít. Vlastnosti DPS. In: Moodle FEL [online]. [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/99843/mod_resource/content/2/01_Vlastnosti_DPS.pdf

11 Příloha

11.1 Dokumentace k přípravku



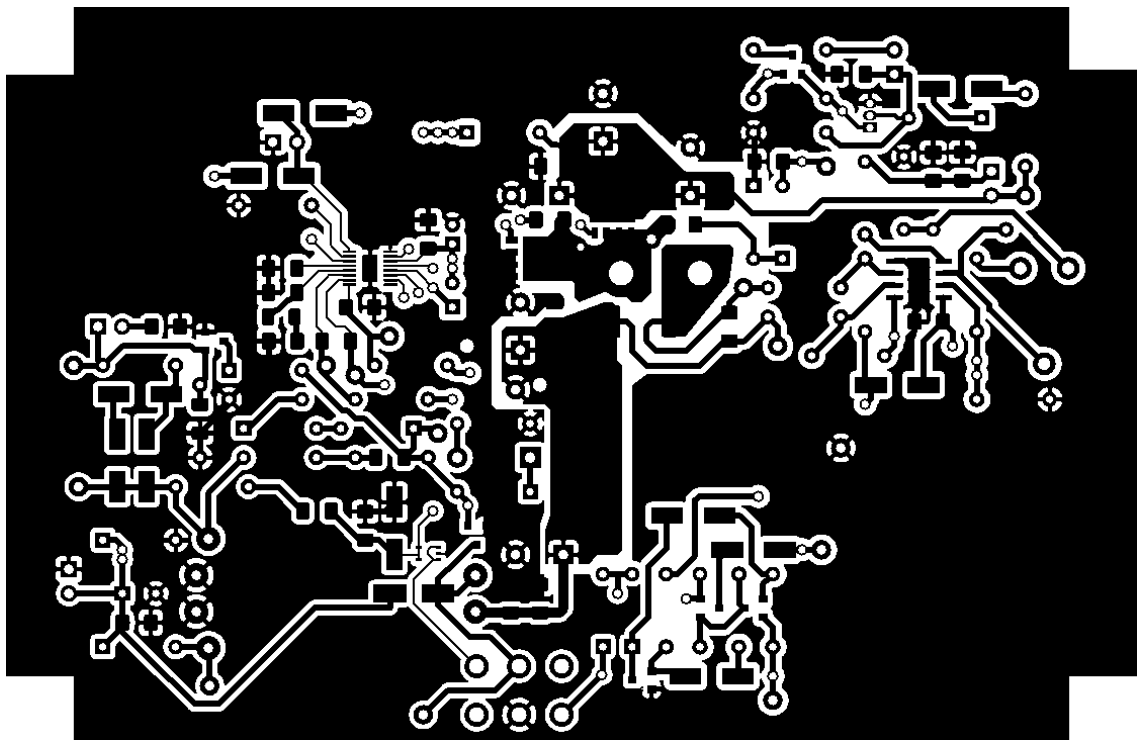
Obr. 33: Schéma měničů pro zvyšování napětí ze superkondenzátoru.

Tab. 1: Seznam použitých součástek

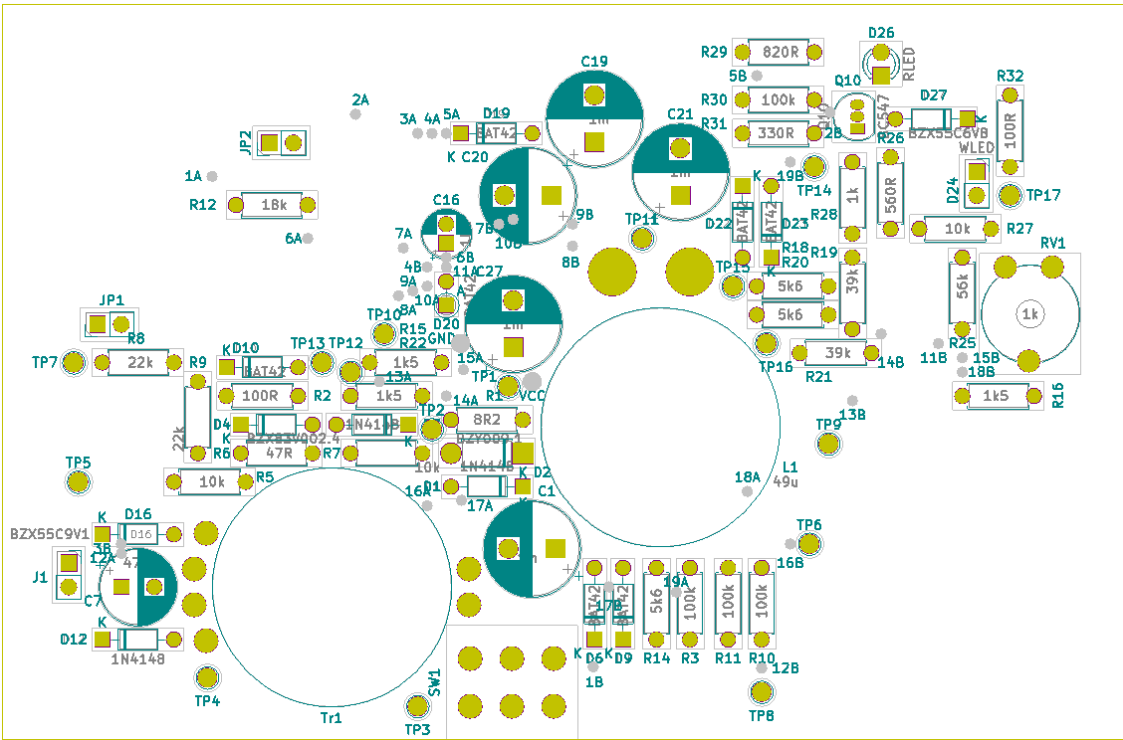
Seznam použitých součástek			
Číslo součástky	Hodnota	Pouzdro	Počet
> C1, C19-C21, C27	1m/16V	Capacitor_THT:CP_Radial_D10.0mm_P5.00mm	5
> C2, C6, C10, C15	1u/16V	Capacitor_SMD:C_1206_3216Metric_Pad1.42x1.75mm_HandSolder	4
> C3, C13, C17, C18, C22-C24, C26, C28	100n	Capacitor_SMD:C_1206_3216Metric_Pad1.42x1.75mm_HandSolder	9
C4	10n	Capacitor_SMD:C_1206_3216Metric_Pad1.42x1.75mm_HandSolder	1
C5	1n	Capacitor_SMD:C_1206_3216Metric_Pad1.42x1.75mm_HandSolder	1
C7	470u/10V	Capacitor_THT:CP_Radial_D8.0mm_P3.50mm	1
C8	4n7	Capacitor_SMD:C_1206_3216Metric_Pad1.42x1.75mm_HandSolder	1
> C11, C14	22n	Capacitor_SMD:C_1206_3216Metric_Pad1.42x1.75mm_HandSolder	2
C12	330p	Capacitor_SMD:C_1206_3216Metric_Pad1.42x1.75mm_HandSolder	1
C16	10u/16V	Capacitor_THT:CP_Radial_D5.0mm_P2.00mm	1
> C9, C25	2n2	Capacitor_SMD:C_1206_3216Metric_Pad1.42x1.75mm_HandSolder	2
D2	BZY009.1	Diode_THT:D_DO-41_SOD81_P7.62mm_Horizontal	1
D4	BZX83V002.4	Diode_THT:D_DO-35_SOD27_P7.62mm_Horizontal	1
D5	SS34A	Diode_SMD:D_SMA_Handsoldering	1
> D6, D9, D10, D19, D22, D23	BAT42	Diode_THT:D_DO-35_SOD27_P7.62mm_Horizontal	6
D11	BZV55C13	Diode_SMD:D_MiniMELF_Handsoldering	1
> D1, D3, D12	1N4148	Diode_THT:D_DO-35_SOD27_P7.62mm_Horizontal	3
> D7, D8, D13-D15, D17, D18, D21, D25, D28	LL914	Diode_SMD:D_MiniMELF_Handsoldering	10
D16	BZX55C9V1	Diode_THT:D_DO-35_SOD27_P7.62mm_Horizontal	1
D20	BAT42	Diode_THT:D_DO-35_SOD27_P2.54mm_Vertical_AnodeUp	1
D24	WLED	Connector_PinSocket_2.54mm:PinSocket_1x02_P2.54mm_Vertical	1
D26	RLED	LED_THT:LED_D3.0mm_FlatTop	1
D27	BZX55C6V8	Diode_THT:D_DO-35_SOD27_P7.62mm_Horizontal	1

Seznam součástek			
Číslo součástky	Hodnota	Pouzdro	Počet
J1		Connector_PinSocket_2.54mm:PinSocket_1x02_P2.54mm_Vertical	1
> JP1, JP2		Connector_PinHeader_2.54mm:PinHeader_1x02_P2.54mm_Vertical	2
L1	49u	Transformer_THT:Transformer_POT_BPROJ2	1
Q2	NSVJ5908DSG5	Package_DirectFET:MCPH5	1
Q3	2N7002	Package_TO_SOT_SMD:SOT-23	1
> Q1, Q4, Q6	DMG2302UKQ	Package_TO_SOT_SMD:SOT-23	3
> Q5, Q9	MMFTP84	Package_TO_SOT_SMD:SOT-23	2
> Q7, Q8	BSC025N03MS	Package_SO:PG-TDSON-8	2
Q10	BC547	Package_TO_SOT_THT:TO-92_Inline	1
R1	8R2	Resistor_THT:R_Axial_DIN0207_L6.3mm_D2.5mm_P7.62mm_Horizontal	1
> R2, R32	100R	Resistor_THT:R_Axial_DIN0207_L6.3mm_D2.5mm_P7.62mm_Horizontal	2
R4	1M	Resistor_SMD:R_1206_3216Metric_Pad1.42x1.75mm_HandSolder	1
R6	47R	Resistor_THT:R_Axial_DIN0207_L6.3mm_D2.5mm_P7.62mm_Horizontal	1
> R5, R7, R27	10k	Resistor_THT:R_Axial_DIN0207_L6.3mm_D2.5mm_P7.62mm_Horizontal	3
> R8, R9	22k	Resistor_THT:R_Axial_DIN0207_L6.3mm_D2.5mm_P7.62mm_Horizontal	2
> R3, R10, R11, R30	100k	Resistor_THT:R_Axial_DIN0207_L6.3mm_D2.5mm_P7.62mm_Horizontal	4
R12	18k	Resistor_THT:R_Axial_DIN0207_L6.3mm_D2.5mm_P7.62mm_Horizontal	1
R13	4k7	Resistor_SMD:R_1206_3216Metric	1
> R15, R16, R22	1k5	Resistor_THT:R_Axial_DIN0207_L6.3mm_D2.5mm_P7.62mm_Horizontal	3
R17	3m	Resistor_SMD:R_2512_6332Metric	1
> R19, R21	39k	Resistor_THT:R_Axial_DIN0207_L6.3mm_D2.5mm_P7.62mm_Horizontal	2
> R14, R18, R20	5k6	Resistor_THT:R_Axial_DIN0207_L6.3mm_D2.5mm_P7.62mm_Horizontal	3
> R23, R24	0R33	Resistor_SMD:R_1206_3216Metric_Pad1.42x1.75mm_HandSolder	2
R25	56k	Resistor_THT:R_Axial_DIN0207_L6.3mm_D2.5mm_P7.62mm_Horizontal	1
R26	560R	Resistor_THT:R_Axial_DIN0207_L6.3mm_D2.5mm_P7.62mm_Horizontal	1
R28	1k	Resistor_THT:R_Axial_DIN0207_L6.3mm_D2.5mm_P7.62mm_Horizontal	1
R29	820R	Resistor_THT:R_Axial_DIN0207_L6.3mm_D2.5mm_P7.62mm_Horizontal	1

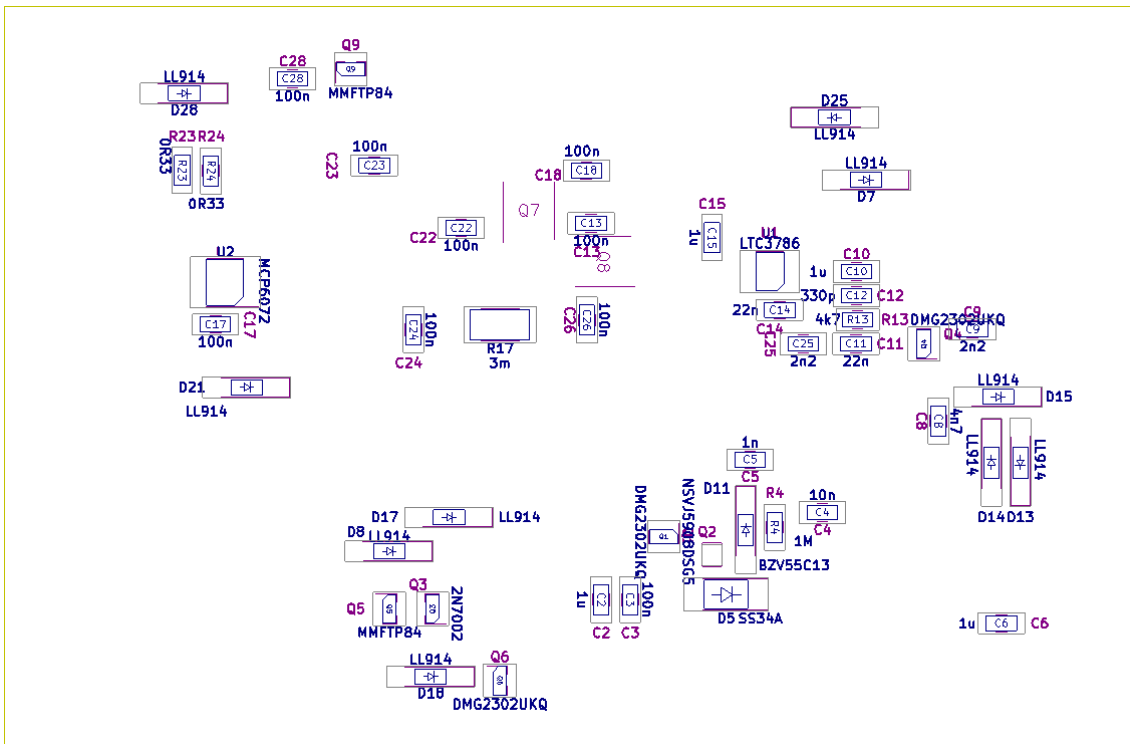
Seznam součástek			
Číslo součástky	Hodnota	Pouzdro	Počet
R31	330R	Resistor_THT:R_Axial_DIN0207_L6.3mm_D2.5mm_P7.62mm_Horizontal	1
RV1	1k	Potentiometer_THT:Potentiometer_Piher_PT-10-V10_Vertical	1
SW1		Button_Switch_THT:SW2páčka	1
> TP1-TP17		TestPoint:TestPoint_THTPad_D2.0mm_Drill1.0mm	17
Tr1		Transformer_THT:Transformer_POT_BPROJ	1
U1	LTC3786	Package_SO:MSOP-16-1EP_3x4mm_P0.5mm_EP1.65x2.85mm	1
U2	MCP6072	Package_SO:SO-8_3.9x4.9mm_P1.27mm	1



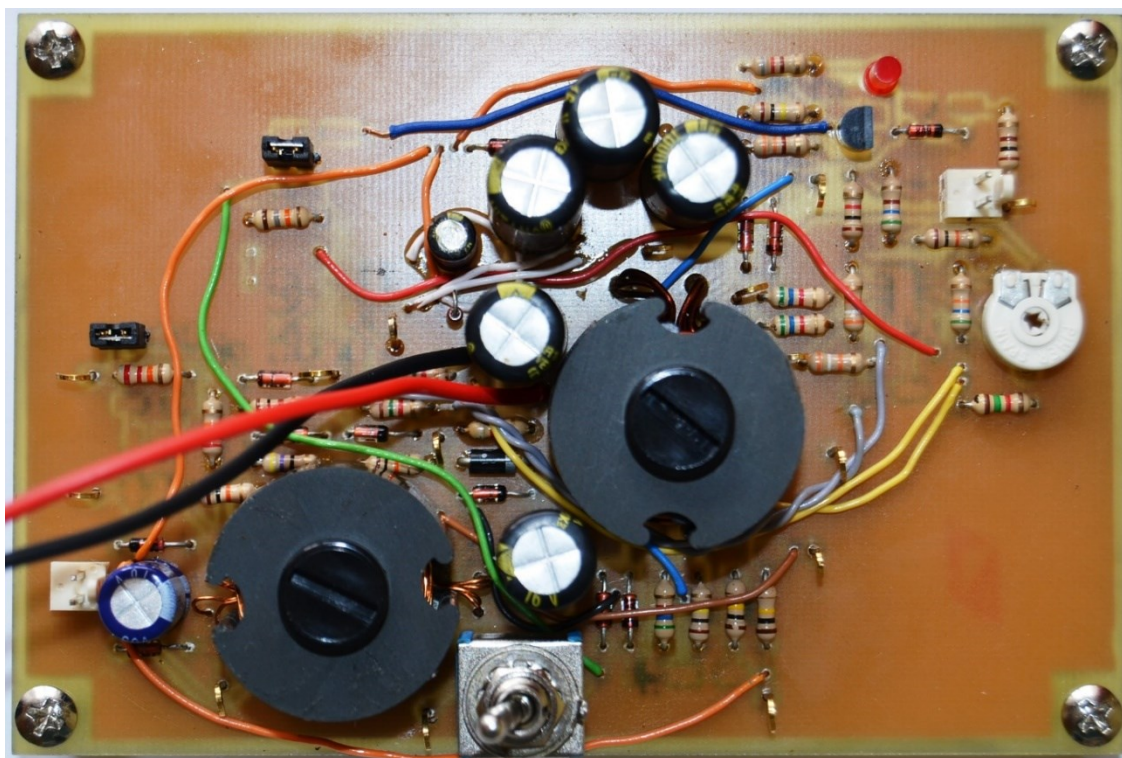
Obr. 34: Návrh motivu DPS.



Obr. 35: Osazovací pláněk DPS – THT montáž – pohled shora.



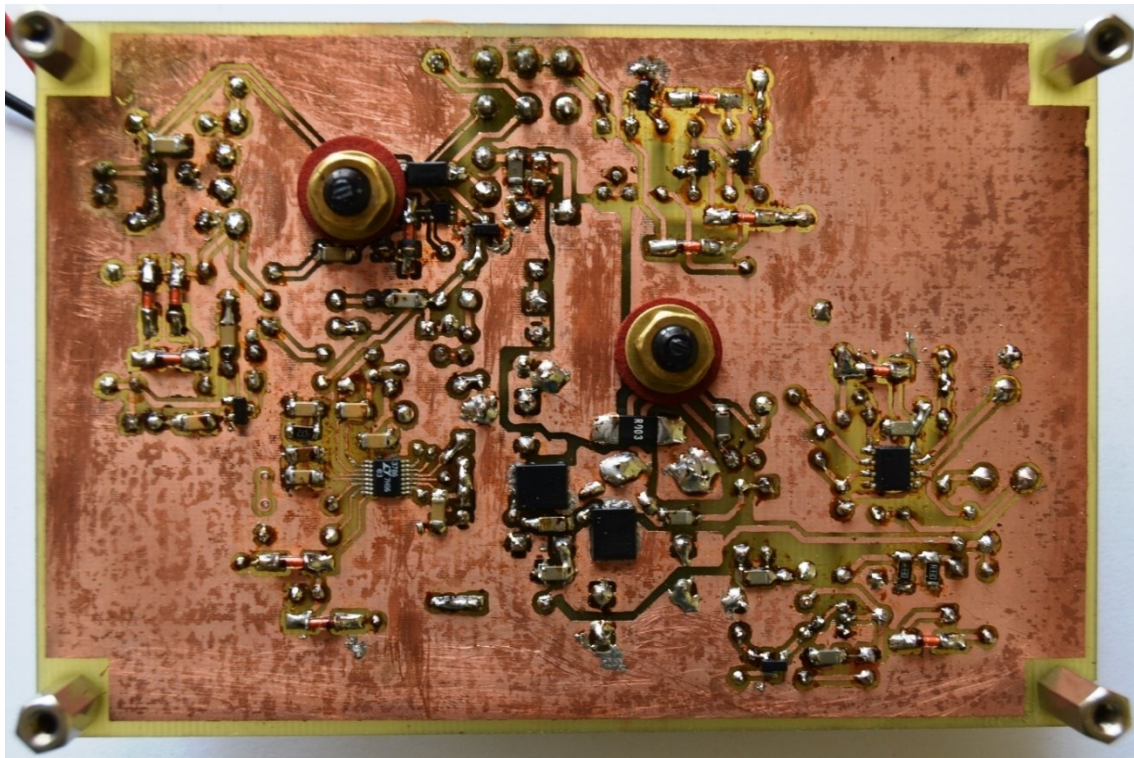
Obr. 36: Osazovací pláněk DPS – SMD montáž – pohled zdola (zrcadlově).



Obr. 37: Osazená DPS – pohled shora.



Obr. 38: Osazená DPS – pohled z boku.



Obr. 39: Osazená DPS – pohled zdola.

11.2 Tabulky naměřených hodnot

Tab. 2: Převodní charakteristika měniče pro napájení LED.

Převodní charakteristika			
$I_{\text{nast}} = 75 \text{ mA}$		$I_{\text{nast}} = 190 \text{ mA}$	
$U_{\text{IN}}(\text{V})$	$I_{\text{OUT}}(\text{mA})$	$U_{\text{IN}}(\text{V})$	$I_{\text{OUT}}(\text{mA})$
0,1	0,0	0,1	0,0
0,2	0,6	0,2	0,6
0,3	43,1	0,3	44,4
0,4	74,9	0,4	131,6
0,5	74,9	0,5	178,0
0,6	75,0	0,6	191,0
0,7	75,0	0,7	191,0
0,8	75,0	0,8	190,9
0,9	75,0	0,9	190,8
1,0	75,0	1,0	190,7
1,2	75,1	1,2	190,6
1,4	75,2	1,4	190,5
1,6	75,2	1,6	190,6
1,8	75,3	1,8	190,5
2,0	75,4	2,0	190,4
2,2	75,4	2,2	190,3
2,4	75,4	2,4	190,2
2,6	75,4	2,6	190,1
2,8	75,4	2,8	190,1

Tab. 3: Zatěžovací charakteristika měniče pro napájení LED.

Zatěžovací charakteristika			
$I_{\text{nast}} = 75 \text{ mA}$		$I_{\text{nast}} = 190 \text{ mA}$	
$U_{\text{OUT}}(\text{V})$	$I_{\text{OUT}}(\text{mA})$	$U_{\text{OUT}}(\text{V})$	$I_{\text{OUT}}(\text{mA})$
5,0	74,6	5,0	189,9
5,1	74,6	5,1	189,9
5,2	74,6	5,2	190,0
5,3	74,5	5,3	190,1
5,4	74,5	5,4	190,0
5,5	74,6	5,5	190,2
5,6	74,5	5,6	190,3
5,7	74,5	5,7	190,2
5,8	74,5	5,8	190,3
5,9	74,5	5,9	190,3
6,0	74,5	6,0	190,4
6,1	74,5	6,1	190,3
6,2	74,6	6,2	190,4
6,3	74,5	6,3	190,2
6,4	74,6	6,4	190,4
6,5	74,5	6,5	190,5
6,6	74,5	6,6	190,3
6,7	74,5	6,7	190,4
6,8	74,4	6,8	190,3
6,9	74,4	6,9	190,4
7,0	74,5	7,0	190,5

Tab. 4: Účinnost měniče pro napájení LED v závislosti na vstupním napětí, $I_{\text{nast}} = 75 \text{ mA}$.

Účinnost, $I_{\text{nast}} = 75 \text{ mA}$						
$U_{\text{IN}}(\text{V})$	$I_{\text{IN}}(\text{A})$	$U_{\text{OUT}}(\text{V})$	$I_{\text{OUT}}(\text{mA})$	$P_{\text{IN}}(\text{mW})$	$P_{\text{OUT}}(\text{mW})$	$\eta(\%)$
0,1	0,00	3,12	0,0	0	0	-
0,2	0,16	5,09	0,1	32	0	1
0,3	0,77	5,54	27,7	231	153	66
0,4	1,77	5,80	73,3	708	425	60
0,5	1,12	5,81	74,3	560	432	77
0,6	0,88	5,81	74,4	528	432	82
0,7	0,74	5,81	74,4	518	432	83
0,8	0,62	5,81	74,5	496	433	87
0,9	0,55	5,81	74,4	495	432	87
1,0	0,49	5,81	74,5	490	433	88
1,2	0,40	5,81	74,5	480	433	90
1,4	0,34	5,81	74,5	476	433	91
1,6	0,30	5,81	74,6	480	433	90
1,8	0,27	5,81	74,8	486	435	89
2,0	0,24	5,81	74,8	480	435	91
2,2	0,22	5,82	74,9	484	436	90
2,4	0,20	5,82	74,9	480	436	91
2,6	0,18	5,82	74,9	468	436	93
2,8	0,17	5,82	74,9	476	436	92

Tab. 5: Účinnost měniče pro napájení LED v závislosti na vstupním napětí, $I_{\text{nast}} = 190 \text{ mA}$.

Účinnost, $I_{\text{nast}} = 190 \text{ mA}$						
$U_{\text{IN}}(\text{V})$	$I_{\text{IN}}(\text{A})$	$U_{\text{OUT}}(\text{V})$	$I_{\text{OUT}}(\text{mA})$	$P_{\text{IN}}(\text{W})$	$P_{\text{OUT}}(\text{W})$	$\eta(\%)$
0,1	0,00	3,17	0,0	0	0	-
0,2	1,16	5,08	0,6	0,23	0,00	1
0,3	1,03	5,51	34,0	0,31	0,19	61
0,4	2,80	6,07	120,6	1,12	0,73	65
0,5	3,22	6,38	176,1	1,61	1,12	70
0,6	2,80	6,42	191,0	1,68	1,23	73
0,7	2,24	6,42	190,9	1,57	1,23	78
0,8	1,83	6,42	190,8	1,46	1,22	84
0,9	1,58	6,42	190,7	1,42	1,22	86
1,0	1,40	6,42	190,8	1,40	1,22	87
1,2	1,12	6,42	190,7	1,34	1,22	91
1,4	0,94	6,42	190,4	1,32	1,22	93
1,6	0,81	6,42	190,5	1,30	1,22	94
1,8	0,72	6,42	190,3	1,30	1,22	94
2,0	0,64	6,42	190,3	1,28	1,22	95
2,2	0,58	6,42	190,5	1,28	1,22	96
2,4	0,53	6,42	190,1	1,27	1,22	96
2,6	0,49	6,43	189,9	1,27	1,22	96
2,8	0,45	6,40	190,0	1,26	1,22	97

Tab. 6: Převodní charakteristika startovacího měniče.

Převodní charakteristika			
$U_{OUT} = 3,9 \text{ V}$		$U_{OUT} = 6,2 \text{ V}$	
$U_{IN}(\text{V})$	$I_{OUT}(\text{mA})$	$U_{IN}(\text{V})$	$I_{OUT}(\text{mA})$
0,1	0,00	0,1	0,00
0,2	3,42	0,2	2,61
0,3	11,52	0,3	9,06
0,4	14,70	0,4	12,98
0,5	15,11	0,5	13,66
0,6	15,37	0,6	14,22
0,7	15,53	0,7	14,52
0,8	15,59	0,8	14,75
0,9	15,59	0,9	14,86
1,0	15,57	1,0	14,93
1,2	15,45	1,2	14,94
1,4	15,34	1,4	14,96
1,6	15,29	1,6	14,93
1,8	15,28	1,8	14,94
2,0	15,34	2,0	15,03
2,2	15,40	2,2	15,08
2,4	15,52	2,4	15,15
2,6	15,70	2,6	15,28
2,8	15,85	2,8	15,45

Tab. 7: Zatěžovací charakteristika startovacího měniče.

Zatěžovací charakteristika			
$U_{IN} = 0,75 \text{ V}$		$U_{IN} = 1,75 \text{ V}$	
$U_{OUT}(\text{V})$	$I_{OUT}(\text{mA})$	$U_{OUT}(\text{V})$	$I_{OUT}(\text{mA})$
3,0	16,03	3,0	15,49
3,2	15,98	3,2	15,43
3,4	15,91	3,4	15,40
3,6	15,86	3,6	15,36
3,8	15,78	3,8	15,33
4,0	15,72	4,0	15,29
4,2	15,64	4,2	15,25
4,4	15,56	4,4	15,21
4,6	15,46	4,6	15,19
4,8	15,40	4,8	15,17
5,0	15,31	5,0	15,13
5,2	15,20	5,2	15,11
5,4	15,13	5,4	15,07
5,6	15,02	5,6	15,03
5,8	14,94	5,8	14,99
6,0	14,83	6,0	14,96
6,2	14,74	6,2	14,92
6,4	14,65	6,4	14,88
6,6	14,54	6,6	14,84
6,8	14,44	6,8	14,81
7,0	14,32	7,0	14,79

Tab. 8: Účinnost startovacího měniče v závislosti na vstupním napětí, $U_{OUT} = 3,9 \text{ V}$.

Účinnost, $U_{OUT} = 3,9 \text{ V}$						
$U_{IN}(\text{V})$	$I_{IN}(\text{A})$	$U_{OUT}(\text{V})$	$I_{OUT}(\text{mA})$	$P_{IN}(\text{mW})$	$P_{OUT}(\text{mW})$	$\eta(\%)$
0,1	0,00	0,00	0,0	0	0	-
0,2	0,09	3,75	3,1	18	12	65
0,3	0,27	4,22	11,6	81	49	61
0,4	0,24	4,29	14,7	96	63	65
0,5	0,19	4,29	15,1	95	65	68
0,6	0,15	4,30	15,3	90	66	73
0,7	0,13	4,30	15,5	91	67	73
0,8	0,11	4,30	15,6	88	67	76
0,9	0,10	4,30	15,6	90	67	74
1,0	0,09	4,30	15,5	90	67	74
1,2	0,08	4,30	15,4	96	66	69
1,4	0,07	4,30	15,3	98	66	67
1,6	0,06	4,30	15,3	96	66	68
1,8	0,05	4,30	15,2	90	66	73
2,0	0,05	4,30	15,3	100	66	66
2,2	0,05	4,30	15,4	110	66	60
2,4	0,05	4,30	15,5	120	67	55
2,6	0,04	4,31	15,7	104	67	65
2,8	0,04	4,31	15,8	112	68	61

Tab. 9: Účinnost startovacího měniče v závislosti na vstupním napětí, $U_{OUT} = 6,2 \text{ V}$.

Účinnost, $U_{OUT} = 6,2 \text{ V}$						
$U_{IN}(\text{V})$	$I_{IN}(\text{A})$	$U_{OUT}(\text{V})$	$I_{OUT}(\text{mA})$	$P_{IN}(\text{mW})$	$P_{OUT}(\text{mW})$	$\eta(\%)$
0,1	0,00	0,00	0,0	0	0	-
0,2	0,12	6,20	2,6	24	16	66
0,3	0,31	6,24	9,1	93	57	61
0,4	0,30	6,26	12,9	120	81	67
0,5	0,23	6,26	13,7	115	85	74
0,6	0,19	6,27	14,2	114	89	78
0,7	0,17	6,27	14,5	119	91	76
0,8	0,15	6,27	14,7	120	92	77
0,9	0,14	6,27	14,9	126	93	74
1,0	0,12	6,27	14,9	120	93	78
1,2	0,11	6,28	14,9	132	94	71
1,4	0,09	6,28	14,9	126	94	74
1,6	0,08	6,28	14,9	128	94	73
1,8	0,08	6,28	14,9	144	94	65
2,0	0,07	6,28	15,0	140	94	67
2,2	0,07	6,28	15,1	154	95	61
2,4	0,06	6,28	15,1	144	95	66
2,6	0,06	6,28	15,3	156	96	61
2,8	0,06	6,28	15,4	168	97	58

11.3 Protokol k měření

DC/DC měnič pro maximalizaci využití energie akumulované v superkondenzátoru pro napájení bílé LED

Teorie

Aby byl měnič schopen maximalizovat využití energie akumulované v superkondenzátoru, měl by být schopen pracovat i při velice nízkých vstupních napětích v řádu desetin voltů. Pro taková napětí bude (pro větší výkony řádově jednotek wattů) měnič spotřebovávat proud v řádu jednotek ampérů. Aby však byla zachována dostatečná účinnost měniče i při nízkých vstupních napětích, je třeba použít synchronní usměrnění a spínací tranzistory s nízkým odporem kanálu v sepnutém stavu – to vede na použití DC/DC kontroléru s podporou synchronního usměrnění. Tyto DC/DC kontroléry mají startovací napětí zpravidla vyšší než několik desetin (či jednotek) voltů.

Použitý DC/DC kontrolér (LTC3786) potřebuje ke svému startu napětí alespoň 4,5 V. Maximální napětí superkondenzátoru je obvykle 2,5 V či 2,7 V, ani při nabitém superkondenzátoru by DC/DC kontrolér nebyl schopen startu. Tento přípravek se proto skládá ze dvou měničů: Zvyšujícího (step-up) měniče s DC/DC kontrolérem podporujícím synchronní usměrnění, určeného pro napájení LED s provozním napětím asi 6 V (max. asi 1,25 W), a startovacího (flyback) měniče, který generuje potřebné napětí pro start IO DC/DC kontroléru zvyšujícího měniče a po jeho startu je vypnut, protože zvyšující měnič pak napájí nejen připojenou zátěž, ale i sám sebe.

K DC/DC kontroléru (ve schématu U1) jsou připojeny spínací MOSFETy s kanálem N s nízkým odporem kanálu v sepnutém stavu ($3\text{ m}\Omega$ při $5\text{ V } U_{GS}$). Na snímacím rezistoru R17 (s odporem $3\text{ m}\Omega$) je snímán proud tekoucí induktorem, který je následně zesílen pomocí OZ (U2A) zapojeného jako diferenční zesilovač. Zesílený signál je připojen na snímací vstupy IO Sense+ a Sense-. Aby se tento měnič choval jako zdroj proudu, byly přidány snímací rezistory R23 a R24, na nichž je snímán úbytek napětí přímo úměrný proudu tekoucího připojenou LED a těmito rezistory. Úbytek napětí je zesílen pomocí OZ (U2B) a zaveden do zpětné vazby (vstup Vfb) DC/DC kontroléru, kde je napětí porovnáváno s napětíovou referencí 1,2 V. OZ (MCP6072)

je napájen z pomocného výstupu LDO stabilizátoru DC/DC kontroléru, na kterém je udržováno konstantní napětí 5,4 V.

Vzhledem k tomu, že se měnič chová jako zdroj proudu, při odpojení zátěže nepoteče snímacími rezistory žádný proud, na vstupu 1 zpětné vazby Vfb DC/DC kontroléru bude tedy nulové napětí; to by mělo za následek nárůst napětí na výstupu nad dovolenou mez, což by mohlo zničit výstupní filtrační kondenzátory či spínací tranzistory. Pro předejití této situaci přípravek disponuje obvodem kolem tranzistorů Q9 a Q10, který má za úkol vypnout DC/DC kontrolér při výskytu napětí na výstupu měniče vyššího než asi 8 V připojením vstupu Run DC/DC kontroléru (přes D25) na společný vodič (ve schématu označen jako GND). Zároveň dojde k rozsvícení červené LED signalizující překročení výstupního napětí nad dovolenou mez. Pro resetování této ochrany stačí vypnout vypínač, počkat, dokud červená LED nezhasne, a vypínač opět zapnout.

Ke spínacím tranzistorům je rovněž připojena nábojová pumpa v zapojení jako zdroj záporného napětí (součástky C22, C23, D22, D23); její účel bude objasněn níže.

Pro generování potřebného napětí pro start DC/DC kontroléru slouží startovací měnič. Ten je realizován jako samokmitající flyback měnič bez IO. Základ tohoto měniče tvoří transformátor s primárním, sekundárním a pomocným vinutím (poměr počtu závitů primární:sekundární:pomocné vinutí je 1:10:10) a dva spínací tranzistory: JFET (Q2, se záporným prahovým napětím) a MOSFET (Q1) s nízkým prahovým napětím. (Protože JFET Q2 není schopen vlivem velkého odporu kanálu v sepnutém stavu spínat velké proudy, je k němu paralelně přidán MOSFET Q1 s nízkým prahovým napětím, který má nízký odpor kanálu v sepnutém stavu a je schopen spínat proudy v řádu jednotek ampérů.)

Při připojení nízkého napětí na vstup měniče je spínací JFET (Q2) v sepnutém stavu, na pomocném vinutí tedy bude napětí asi desetkrát větší (vlivem poměru počtu závitů a při zanedbání ztrát). Při napětí na vstupu kolem 0,2 V je na pomocném vinutí větší než prahové napětí spínacího MOSFETu (Q1) a dojde tak k jeho sepnutí. Proud tekoucí primárním vinutím lineárně poroste a v jádru transformátoru se začne ukládat energie v podobě magnetického pole. Proud tekoucí primárním vinutím naroste na takovou hodnotu, kdy se spínací MOSFET dostane do saturace. To způsobí zvyšování úbytku napětí U_{DS} spínacích tranzistorů a snižování úbytku napětí na primárním vinutí, sníží se tedy i napětí na pomocném vinutí; kvůli tomu klesne napětí na řídicích elektrodách spínacích tranzistorů. Tak dojde k vypnutí spínacího MOSFETu a JFETu, napětí na

vinutích změni orientaci a energie uložená v jádru transformátoru se uvolňuje – proud teče skrze usměrňovací diodu D12 na výstup měniče. Po uvolnění energie z jádra transformátoru vzroste napětí na pomocném vinutí na nulu, což způsobí sepnutí JFETu a děj se takto periodicky opakuje. Pro vyšší napětí na vstupu měniče (a tedy i na pomocném vinutí a na řídicích elektrodách spínacích tranzistorů) by však vzrostla hodnota proudu tekoucího primárním vinutím, při které by se spínací MOSFET dostal do saturace, což by mělo za následek dvě věci: Saturaci jádra transformátoru a pravděpodobné zničení spínacího tranzistoru.

Pro vypnutí spínacího tranzistoru dříve, než se jádro transformátoru dostane do saturace, slouží obvod kolem tranzistoru Q4: Při sepnutí spínacích tranzistorů je na pomocném vinutí kladné napětí, kondenzátor C8 připojený k řídicí elektrodě tranzistoru Q4 se nabíjí přes rezistor R8. Poté, co se C8 nabije na napětí větší než prahové napětí tranzistoru Q4, tranzistor sepne a přes diodu D10 připojí řídicí elektrodu spínacího tranzistoru na společný vodič. Takto dojde k vypnutí spínacího tranzistoru Q1 (a následně Q2). Orientace napětí na vinutích se obrátí a kondenzátor C8 se přes rezistory R8 a R9 vybíjí, dokud nedojde k opětovnému sepnutí spínacích tranzistorů a k opakování děje.

Vzhledem k tomu, že rychlost nárůstu proudu induktorem je závislá na vstupním napětí, které je přímo úměrné napětí na pomocném vinutí (při sepnutých spínacích tranzistorech a při zanedbání ztrát, překmitů apod.) a proud rezistorem R8 je přímo úměrný napětí na pomocném vinutí (napětí na nabíjeném kondenzátoru C8 je, stejně jako úbytek na diodách D13 – D15, pro větší vstupní napětí zanedbatelné vůči napětí na pomocném vinutí), lze pomocí změny hodnoty rezistorů R8, R9 a kondenzátoru C8 ovlivnit rychlost nabíjení C8 a tím nepřímo i maximální proud tekoucí induktorem. S použitými součástkami je proud nastaven (téměř nezávisle na vstupním napětí s výjimkou nízkých vstupních napětí, kdy se tranzistor vypíná tak, že se dostane do saturace) na hodnotu kolem 1,5 A. Pro ilustraci vlivu zvýšení kapacity C8 byl přidán kondenzátor C9, který lze připojit k obvodu pomocí vložení propojky JP1. Připojení C9 má za následek zvýšení maximální hodnoty spínacího proudu.

Aby startovací měnič nebyl v činnosti i po nastartování zvyšujícího měniče (kdy zvyšující měnič pak napájí sám sebe), je startovací měnič vypnut. Vypnutí je realizováno pomocí tranzistorů Q3, Q5 a Q6: Q6 připojí řídicí elektrodu spínacího MOSFETu Q1 (přes D9) na společný vodič a Q3, jehož source je připojen na zdroj záporného napětí (nábojovou pumpu),

připojí řídicí elektrodu spínacího JFETu Q2 na záporné napětí. Tím je startovací měnič (resp. oba spínací tranzistory) vypnut. Startovací měnič se vypíná, pokud proud tekoucí zátěží přesáhne asi třetinu nastavené hodnoty, k zapnutí startovacího měniče dochází při poklesu proudu zátěží pod asi čtvrtinu nastavené hodnoty (při malých vstupních napětích, kdy zvyšující měnič není schopen dodat do zátěže požadovaný proud, tak startovací měnič vypomáhá zvyšujícímu měniči). Oba měniče lze vypnout manuálně pomocí dvoupólového vypínače, manuální vypnutí pouze zvyšujícího měniče (např. pro účely měření startovacího měniče) je možné vložením propojky JP2.

K připojení zátěže na startovací měnič slouží konektor J1, k připojení LED k měniči pro napájení LED slouží konektor označený jako D24.

Vlastnosti měničů

Pracovní oblast měničů	Měnič pro LED	Startovací měnič
Vstupní napětí	0,2 V ÷ 2,8 V	0,2 V ÷ 2,8 V
Vstupní proud	max. 3,25 A	max. 0,5 A
Výstupní napětí	5 V ÷ 7 V	$V_{IN} \div 9,1$ V
Výstupní proud	75 mA ÷ 190 mA	max. 16 mA (bez C9)

V případě napájení přípravku laboratorním zdrojem je třeba správně nastavit proudové omezení zdroje na asi 3,5 A. Pozor na polaritu. **Přípravek NEpřipojujte na napětí vyšší než 2,8 V (!)** – může dojít ke zničení startovacího měniče. Na výstupech obou měničů musí být vždy napětí větší nebo rovné vstupnímu napětí – **měniče NEjsou zkratuvzdorné**. Před připojením LED na výstup měniče vypněte vypínač a přesvědčte se, že na výstupu daného měniče (na filtračních kondenzátorech) je nižší napětí než asi 6 V, v opačném případě může dojít ke zničení LED.

Zadání

1. Seznamte se s teorií a vlastnostmi měřených měničů (popsáno výše).
2. Zobrazte na osciloskopu průběhy napětí na testovacích kontaktech (TP) startovacího měniče při různém zatížení měniče a různém vstupním napětí (pro vypnutí měniče pro napájení LED vložte propojku JP2).

3. Zjistěte vliv připojení a odpojení C9 do obvodu (pomocí vložení propojky JP1) na výkon startovacího měniče a na spínací frekvenci pro vstupní napětí větší než 0,6 V. Na osciloskopu zobrazte průběhy napětí na testovacím kontaktu TP7. (Jako zátěž můžete použít bílou LED standardně připojenou ke druhému měniči).
4. Změřte zatěžovací charakteristiku startovacího měniče (bez vložené propojky JP1) pro dvě hodnoty vstupního napětí v rozsahu 0,6 V ÷ 2,8 V.
5. Změřte převodní charakteristiku startovacího měniče pro dvě hodnoty výstupního napětí v rozsahu 3 V ÷ 7 V.
6. Zobrazte na osciloskopu průběhy napětí na testovacích kontaktech zvyšujícího měniče (TP11, TP15 proti TP16, TP12 proti TP13) pro různá vstupní napětí (pro spuštění zvyšujícího měniče odstraňte vloženou propojku JP2). Jako zátěž použijte bílou LED.
7. Změřte zatěžovací charakteristiku měniče pro napájení LED pro hodnotu vstupního napětí v rozsahu 0,6 V ÷ 2,8 V. Proud zátěží nastavte kolem 130 mA (lze nastavit trimrem RV1).
8. Změřte převodní charakteristiku startovacího měniče pro výstupní proud nastavený na hodnotu 75 mA a 190 mA (lze nastavit trimrem RV1). Jako zátěž použijte bílou LED. Měřte od nejvyššího vstupního napětí po nejnižší.

Vypracování

Zatěžovací charakteristiky startovacího měniče.

Zatěžovací charakteristika			
$U_{IN} = \text{---} \text{ V}$		$U_{IN} = \text{---} \text{ V}$	
$U_{OUT}(\text{V})$	$I_{OUT}(\text{mA})$	$U_{OUT}(\text{V})$	$I_{OUT}(\text{mA})$
3,0		3,0	
3,5		3,5	
4,0		4,0	
4,5		4,5	
5,0		5,0	
5,5		5,5	
6,0		6,0	
6,5		6,5	
7,0		7,0	

Převodní charakteristiky startovacího měniče.

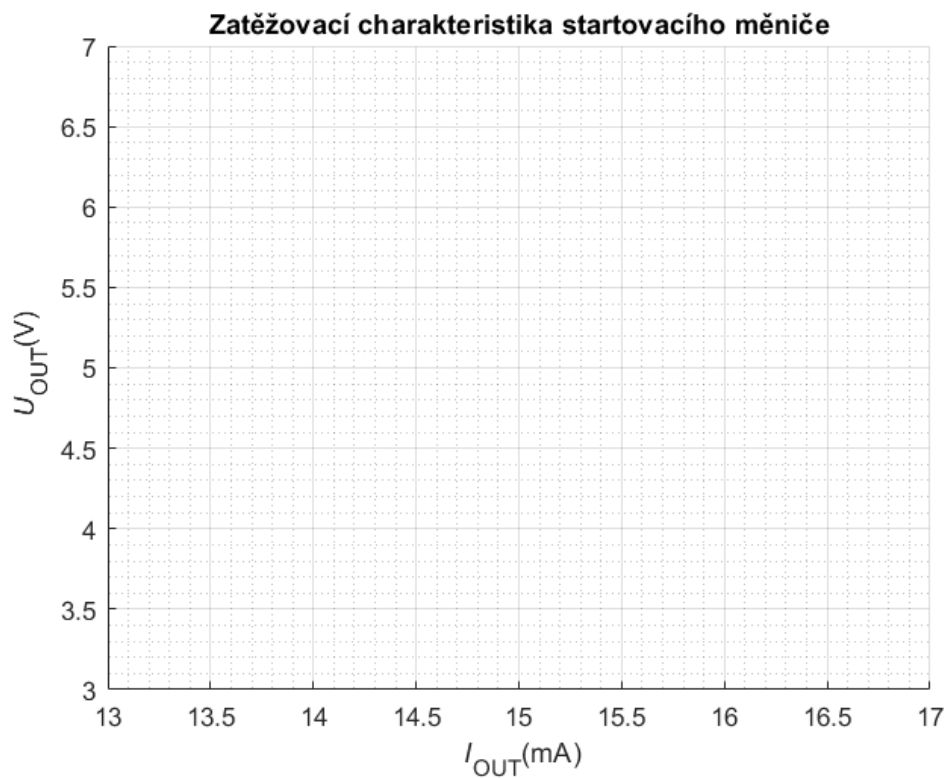
Převodní charakteristika			
$U_{OUT} \doteq \underline{\hspace{1cm}} \text{ V}$		$U_{OUT} \doteq \underline{\hspace{1cm}} \text{ V}$	
$U_{IN}(\text{V})$	$I_{OUT}(\text{mA})$	$U_{IN}(\text{V})$	$I_{OUT}(\text{mA})$
0,1		0,1	
0,2		0,2	
0,3		0,3	
0,4		0,4	
0,5		0,5	
0,6		0,6	
0,7		0,7	
0,8		0,8	
0,9		0,9	
1,0		1,0	
1,2		1,2	
1,4		1,4	
1,6		1,6	
1,8		1,8	
2,0		2,0	
2,2		2,2	
2,4		2,4	
2,6		2,6	
2,8		2,8	

Zatěžovací charakteristika měniče pro napájení LED, $U_{IN} = \underline{\hspace{1cm}} \text{ V}$.

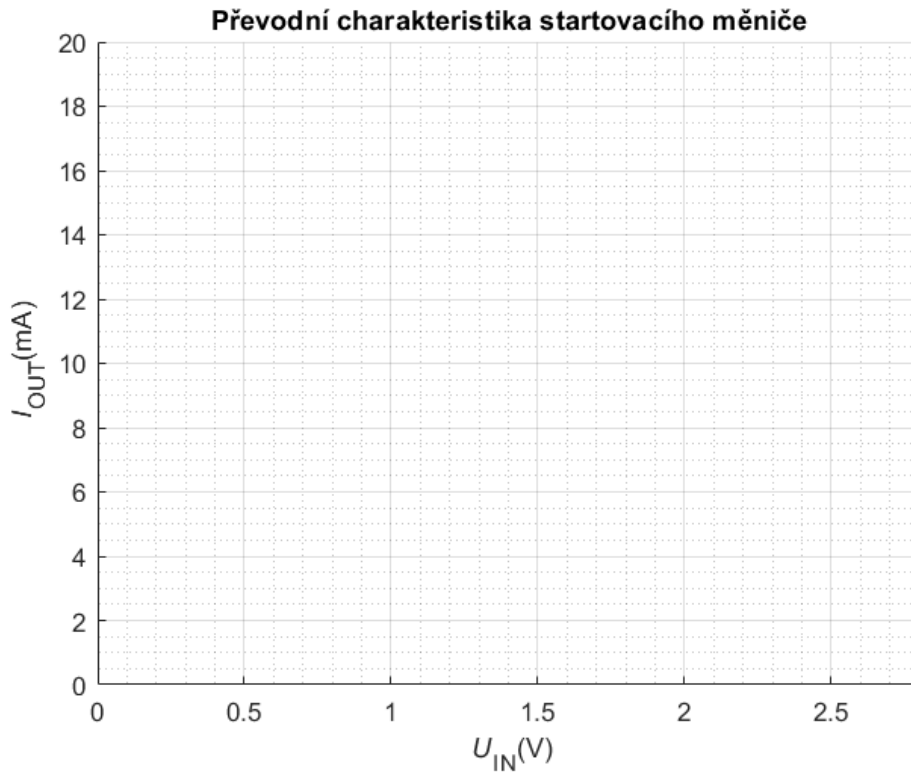
Zatěžovací charakteristika	
$I_{nast} \doteq 130 \text{ mA}$	
$U_{OUT}(\text{V})$	$I_{OUT}(\text{mA})$
5,00	
5,25	
5,50	
5,75	
6,00	
6,25	
6,50	
6,75	
7,00	

Převodní charakteristiky měniče pro napájení LED, $U_{OUT} = U_{LED} \doteq 6 \text{ V}$.

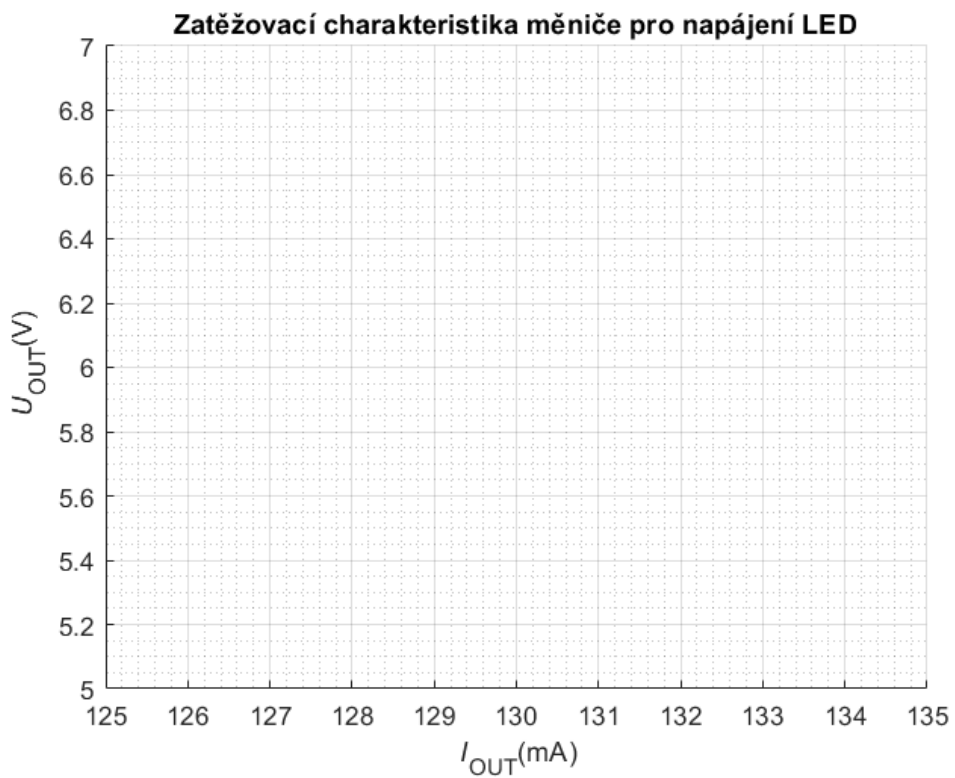
Převodní charakteristika			
$I_{nast} = 75 \text{ mA}$		$I_{nast} = 190 \text{ mA}$	
$U_{IN}(\text{V})$	$I_{OUT}(\text{mA})$	$U_{IN}(\text{V})$	$I_{OUT}(\text{mA})$
2,8		2,8	
2,4		2,4	
2,0		2,0	
1,6		1,6	
1,3		1,3	
1,0		1,0	
0,8		0,8	
0,6		0,6	
0,5		0,5	
0,4		0,4	
0,3		0,3	
0,2		0,2	
0,1		0,1	



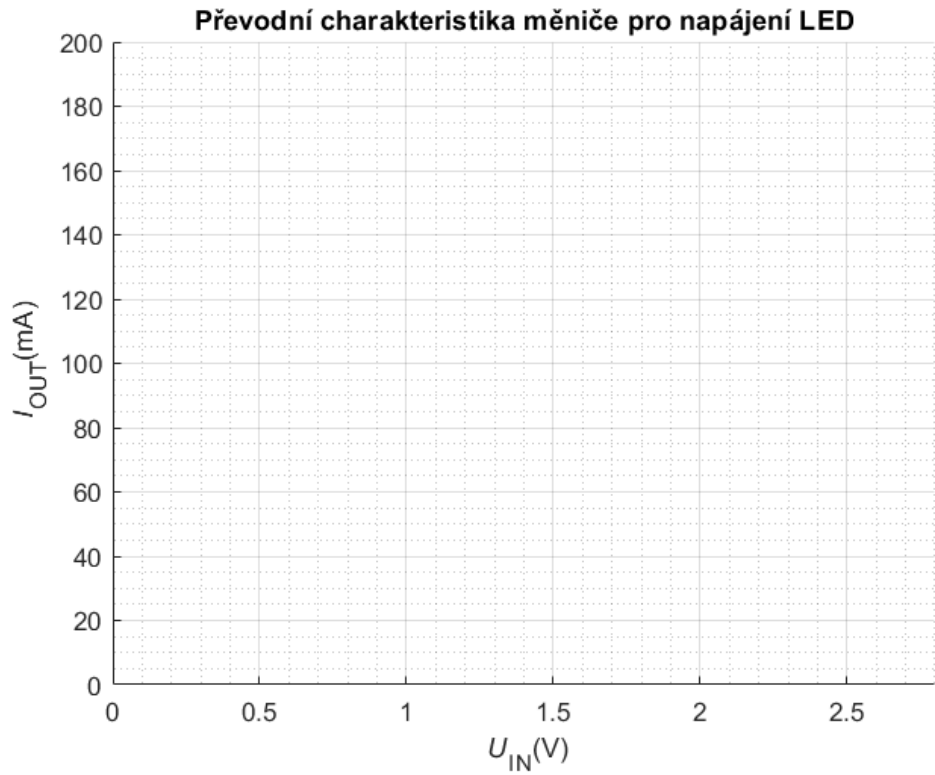
Zatěžovací charakteristiky startovacího měniče.



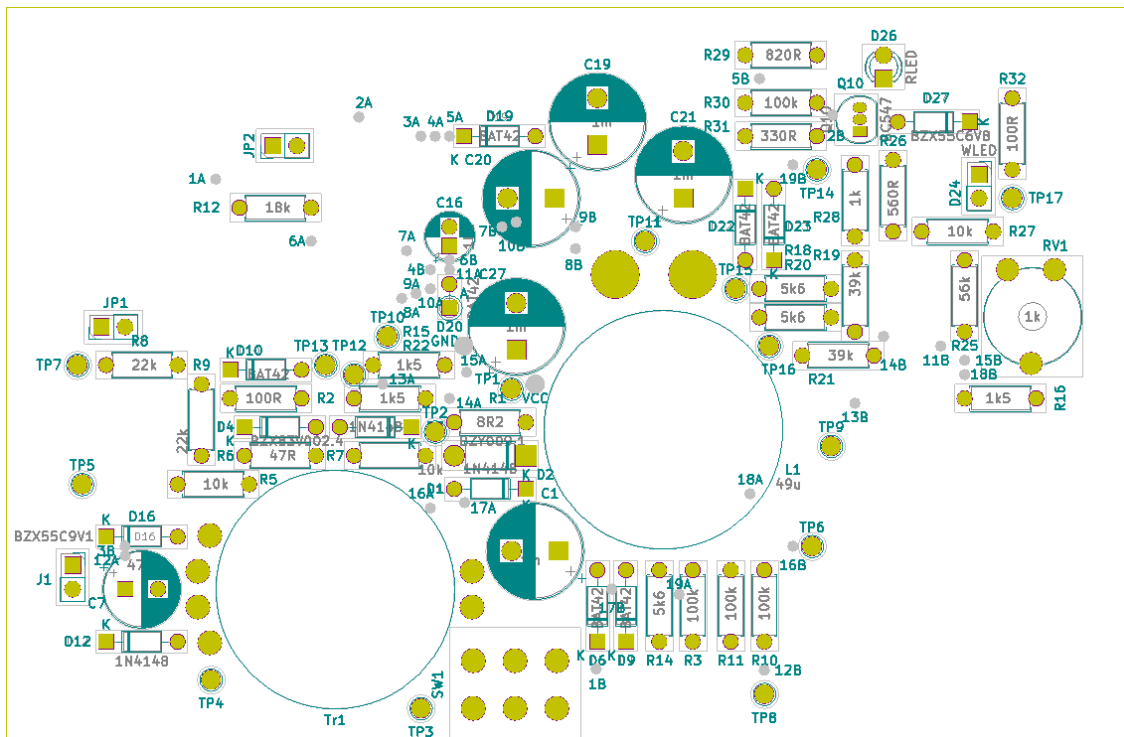
Převodní charakteristiky startovacího měniče.



Zatěžovací charakteristika měniče pro napájení LED, $U_{IN} = \text{___} \text{ V}$.



Převodní charakteristika měniče pro napájení LED, $U_{OUT} \approx 6 \text{ V}$.



Rozmístění propojek (JP), konektorů pro připojení zátěže (J1, D24), testovacích kontaktů (TP).

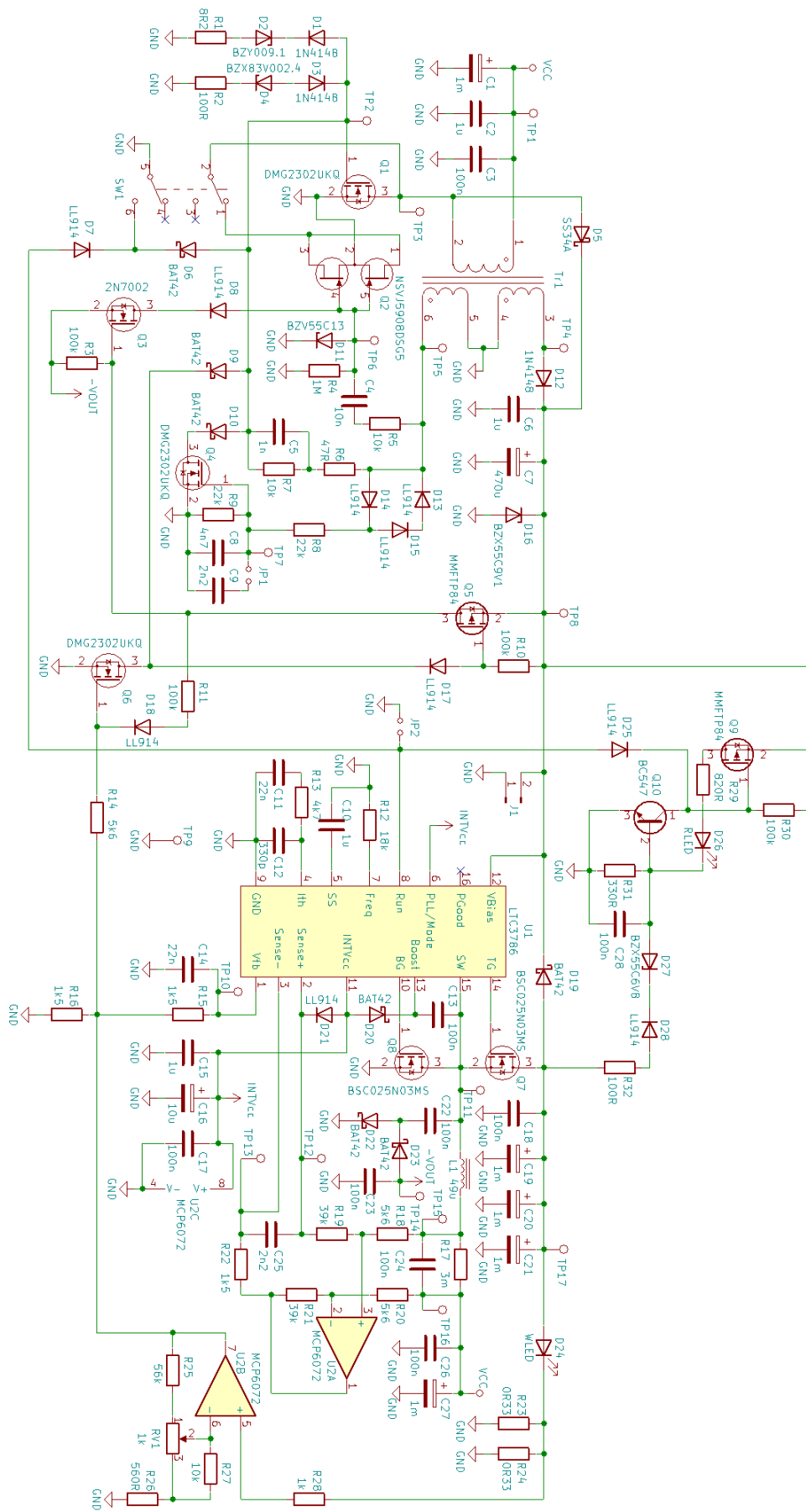


Schéma zapojení přípravku.