

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Konstrukce měniče pro BLDC motor**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2014/2015

**ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Stanislav BRTNA**  
Osobní číslo: **E12B0213P**  
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**  
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**  
Název tématu: **Konstrukce měniče pro BLDC motor**  
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Zásady pro vypracování:

1. Uveďte princip a vlastnosti BLDC motoru.
2. Specifikujte požadavky na konstrukci měniče.
3. Navrhněte obvodové schéma.
4. Navrhněte desku plošných spojů.
5. Po osazení experimentálně ověřte funkci měniče.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího  
Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran  
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická  
Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Luboš Streit, Ph.D.  
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: 15. října 2014  
Termín odevzdání bakalářské práce: 8. června 2015

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



  
Prof. Ing. Václav Kuis, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

## **Abstrakt**

Předkládaná bakalářská práce se zabývá návrhem měniče pro řízení bezkartáčového stejnosměrného motoru elektrické koloběžky. Nejprve budou popsány vlastnosti užitého motoru, dále prvky koloběžky a požadavky na výsledné zařízení. Návrhem schématu, tvorbou desky plošných spojů a osazením se zabývá druhá část této práce. Na závěr je popsáno oživení a měření výsledného zařízení.

## **Klíčová slova**

BLDC, bezkartáčový stejnosměrný motor, trojfázový budič, C2000 LaunchPad

## **Abstract**

This bachelor degree thesis is focused on designing control electronics for an electric scooter equipped with a brush-less DC motor. Firstly, the requirements for desired device are specified, then circuit schematic and circuit board layouts are made. In last chapters there are measurements and final conclusion about the performance of the designed device.

## **Keywords**

BLDC, brush-less DC motor, three-phase converter, C2000 LaunchPad

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 8.6. 2015

Stanislav Brtna

# Obsah

<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>9</b>
<b>1 ÚVOD.....</b>	<b>10</b>
<b>2 PRINCIP A VLASTNOSTI BLDC MOTORU.....</b>	<b>11</b>
2.1 Princip a konstrukce.....	11
2.1.1 Konstrukce rotoru.....	12
2.1.2 Konstrukce statoru.....	12
2.2 Řízení.....	12
2.2.1 Trojfázový H-můstek.....	12
2.2.2 Detekce polohy rotoru s využitím senzorů natočení.....	13
2.2.3 Řízení motoru na základě údajů ze senzorů natočení.....	13
2.2.4 Detekce polohy rotoru snímáním indukovaného napětí.....	14
<b>3 SPECIFIKACE POŽADAVKŮ NA KONSTRUKCI.....</b>	<b>15</b>
3.1 Popis koloběžky.....	15
3.1.1 Akumulátor.....	15
3.1.2 Rukojeť.....	16
3.1.3 Motor.....	16
3.2 Parametry měniče.....	17
3.2.1 Elektrické parametry motoru, požadavky na výkonové prvky.....	17
3.2.2 Vstupy pro rukojeť a Hallovy sondy.....	18
3.2.3 Napájení.....	18
3.2.4 Snímání proudů a napětí.....	18
3.2.5 Parametry mikrokontroléru.....	18
3.2.6 Další parametry měniče.....	18
<b>4 NÁVRH OBVODOVÉHO SCHÉMATU.....</b>	<b>19</b>
4.1 Výkonová část.....	19
4.2 Snímání proudů.....	21
4.3 Snímání napětí.....	22
4.4 Snímání výstupů Hallových sond.....	22
4.5 Připojení na desku s mikrokontrolérem.....	23
4.6 Napájení a jištění.....	24
<b>5 NÁVRH DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ.....</b>	<b>25</b>
5.1 Výkonová část.....	25

5.2 Napájení.....	25
5.3 Snímání napětí a proudů.....	25
5.4 Předpokládaná montáž.....	26
<b>6 OSAZENÍ A TESTOVÁNÍ.....</b>	<b>26</b>
6.1 Osazení.....	27
6.2 Testování.....	29
<b>7 ZÁVĚR.....</b>	<b>31</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....</b>	<b>32</b>
<b>PŘÍLOHY.....</b>	<b>33</b>



## Seznam symbolů a zkratek

BLDC .....Bezkartáčový stejnosměrný motor

PWM ..... Pulsně šířková modulace

BMS ..... Systém pro správu baterie

PC ..... Osobní počítač

L1, L2, L3 ... Fáze motoru

GND ..... Zemnění (Ground)

PGND ..... Výkonová zem

OZ ..... Operační zesilovač

DPS ..... Deska plošných spojů

# 1 Úvod

Pokroky ve výrobě výkonových polovodičů, lehkých akumulátorů vysokých kapacit a silných permanentních magnetů, přiblížily elektromobily v poměru cena-výkon o trochu blíže automobilům se spalovacím motorem. Konvenční automobily jsou však dobře zvládnutou technologií, na kterou je společnost už zvyklá. Přebrat jejich místo a nahradit spalovací motory elektrickými není vůbec snadné. Elektrický pohon se tedy u vozidel osobní dopravy prosazuje ve větší míře pouze v oblastech, kde by byl spalovací motor příliš komplikovaný, těžký, ohrožoval okolí hořlavým palivem a nebo kde je překážkou jeho častá potřeba údržby.

Častěji než na skutečný elektrický automobil proto v ulicích narazíme na přestavby jízdních kol, koloběžek, tříkolek a čtyřkolek, osazených pomocným elektromotorem. K takové přestavbě v nejjednodušším případě postačuje zakoupit elektromotor s měničem a baterii. Nejslabším prvkem je v tomto případě měnič, baterie i motory jsou technologicky dobře zvládnuté. V této práci je popsán návrh, výroba a osazení takového měniče, určeného pro elektrickou koloběžku s BLDC motorem na *obr. 1*. Oproti původnímu měniči bude navrhovaný měnič plně programovatelný a s možností snímání fázových proudů a napětí. To umožní na novém měniči testovat různé metody regulace a řízení motoru koloběžky.



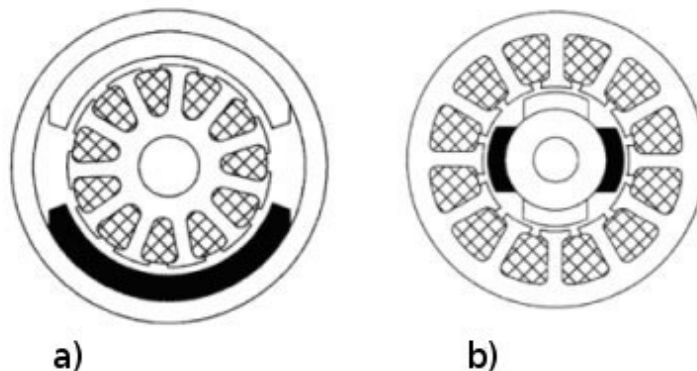
*Obr. 1 Fotografie elektrické koloběžky*

## 2 Princip a vlastnosti BLDC motoru

Brush-less Direct Current motor (bezkartáčový stejnosměrný motor), dále BLDC, principiálně vychází ze stejnosměrného motoru s permanentními magnety, ale mechanická komutace pomocí kartáčů je nahrazena komutací na principu výkonových polovodičových součástek. Absence mechanického komutátoru přináší výhody v bezúdržbovosti mechanických částí a lepších vlastností ve vysokých otáčkách, na druhou stranu komplikuje řídicí elektroniku.

### 2.1 Princip a konstrukce

BLDC motory jsou synchronním typem motorů, magnetické pole rotoru je u nich tvořeno permanentními magnety, magnetické pole statoru tvoří vinutí cívek motoru. Tyto motory se vyrábí v provedení s jednou, dvěma nebo třemi fázemi.



Obr. 2 Návrh BLDC motoru s vnějším (a) a vnitřním (b) rotorem. Převzato a upraveno z [1].

Co se týče konstrukce motoru, tak rozlišujeme dva hlavní typy provedení. S rotorem vnějším a nebo s rotorem vnitřním, viz obr. 2. Tato provedení mají hlavní rozdíl v odlišné hmotnosti rotoru vzhledem k velikosti motoru, což ovlivňuje jejich dynamické charakteristiky. Obě konstrukce mají své výhody v různých aplikacích. Například u elektromotoru koloběžky potřebujeme přenášet točivý moment motoru na zadní kolo, je tedy užito motoru s vnějším rotorem, kde rotor tvoří zadní kolo. Není proto potřeba žádného mechanismu k přenosu momentu. Na druhou stranu vnitřní rotor má nesporné výhody například u aplikací, kde moment potřebujeme na nějaké ose.

### 2.1.1 Konstrukce rotoru

Na rotoru jsou umístěny permanentní magnety, nejčastěji z moderních materiálů jako jsou neodym, samarium-kobalt a podobně. Důležitý je též způsob umístění magnetů, jež má vliv na výsledné charakteristiky motoru. Počet magnetů (a jejich orientace) v rotoru taktéž udává počet pólů motoru. Zvýšením počtu pólů motoru příznivě ovlivníme dynamické parametry, na úkor snížení jeho maximální rychlosti. S přibývajícím počtem pólů musíme pro stejnou rychlost otáčení zvyšovat rychlost spínání, která je díky indukčnosti vinutí statoru omezená.

### 2.1.2 Konstrukce statoru

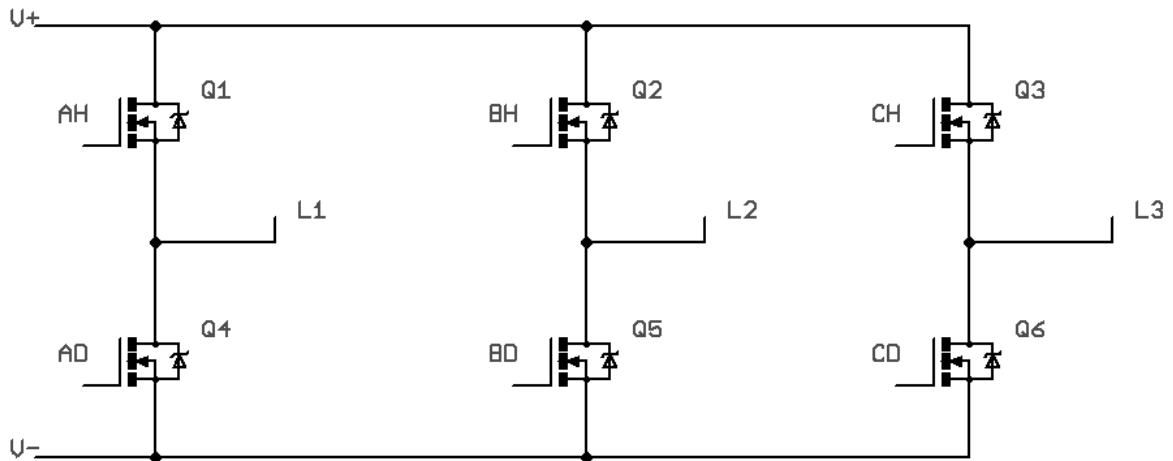
Na statoru je především umístěno jeho vinutí, podle počtu jeho vývodů určujeme počet fází motoru. Dále se zde většinou nachází Hallovy sondy nebo jiné prvky pro snímání polohy rotoru. Způsobem uspořádání vinutí je dán průběh zpětného elektromotorického napětí BLDC motoru, který je lichoběžníkový, na rozdíl od průběhu sinusového, který je u synchronních motorů s permanentními magnety. Většina trojfázových BLDC motorů má vinutí zapojeno do hvězdy.

## 2.2 Řízení

Z důvodů elektronické komutace je řízení BLDC motorů náročnější než u motorů kartáčových, jelikož musíme snímat polohu rotoru abychom věděli, na která vinutí přivést napětí, k tomu můžeme použít buď přímo senzorů motoru, popřípadě snímat zpětné elektromotorické napětí. U elektrické koloběžky musíme vzhledem k napájení trojfázového BLDC motoru stejnosměrným proudem z akumulátoru k napájení motoru využít střídače, nejlépe trojfázového H-můstku. Tohoto zapojení se využívá i u aplikací napájených ze střídavého zdroje, před H-můstkem je však napětí usměrněno.

### 2.2.1 Trojfázový H-můstek

H-můstkem (*obr. 3*), se rozumí zapojení spínacích prvků umožňující připojování kladného či záporného napětí na jednotlivé konce vinutí motoru. Vzhledem k podstatě trojfázového BLDC motoru musíme generovat tři střídavá napětí, pro každou fázi jedno. Požadovaný proud fázemi (moment motoru) regulujeme pulsně šířkově modulovaným (PWM) signálem pro spínací tranzistory.



Obr. 3 Trojfázový H-můstek

### 2.2.2 Detekce polohy rotoru s využitím senzorů natočení

Nejjednodušší způsob snímání polohy rotoru je užit senzory určené přímo tuto úlohu, nejlépe integrované v motoru. Nejčastěji se užívá tří Hallových snímačů, polovodičových součástek reagujících na magnetické pole, které vytváří rotor. Tento způsob je realizačně jednoduchý ze strany řídicího software, zejména co se týče rozběhu motoru. Nevýhody jsou nutnost snímačů v motoru a cena kabeláže od snímačů. Pro určité aplikace je problém nízká rozlišovací schopnost Hallových senzorů a užívá se enkodéru podobně jako u servomotorů.

### 2.2.3 Řízení motoru na základě údajů ze senzorů natočení

Při užití snímačů polohy je možno použít šestikrokové spínání, realizované jednoduchou komutační tabulkou, viz Tab. 1. Výhodou tohoto řízení je jednoduchost softwarové implementace. Nevýhody tkví ve skokových změnách točivého momentu, tím pádem větším vibracím a hlučností motoru.

Tab. 1 Tabulka spínání tranzistorů střídače v závislosti na údajích Hallových sond [2] (upraveno)

Úhel natočení	Hallové sondy			Spínání tranzistorů				
	A	B	C	AH	AD	BH	BD	CA
0-60	1	1	0	OFF	ON	OFF	OFF	ON
60-120	1	0	0	OFF	ON	ON	OFF	OFF
120-180	1	0	1	OFF	OFF	ON	OFF	OFF
180-240	0	0	1	ON	OFF	OFF	OFF	OFF
240-300	0	1	1	ON	OFF	OFF	ON	OFF
300-360	0	1	0	OFF	OFF	OFF	ON	ON

#### 2.2.4 Detekce polohy rotoru snímáním indukovaného napětí

Další možností pro určení polohy rotoru BLDC motoru je snímat zpětné elektromotorické napětí na vinutí motoru s plovoucím potenciálem a z něj usuzovat polohu rotoru. Nejsložitějším způsobem snímání, je držet spodní tranzistory můstku stále sepnuté a PWM regulaci provádět jen pomocí horních tranzistorů. K měření napětí na vývodu vinutí s plovoucím potenciálem dochází v době kdy je horní tranzistor vypnut (měření je synchronizováno s PWM). Tento způsob je realizačně náročný, ale měl by dosahovat největšího odstupů signál-šum. U zpětného elektromotorického napětí nás zajímá především okamžik jeho průchodu nulou, protože v tom čase je potřeba komutovat.

Obecně je však u bez-senzorového řízení problém s regulací v nízkých otáčkách a se špatně předvídatelným proměnlivým momentem zátěže. Tam, kde pracujeme především ve vysokých otáčkách a moment zátěže má předvídatelné průběhy, je toto řešení vhodné z důvodů nižší ceny a jednoduchosti hardwarové realizace.

## 3 Specifikace požadavků na konstrukci

Vzhledem k nasazení měniče jsou jeho požadavky určeny ostatními prvky elektrické koloběžky. Pohonná jednotka a zdroj elektrické energie určují návrh výkonové části. Další analogové a digitální vstupy musí odpovídat výstupům ovládacích prvků a senzorů polohy rotoru motoru.

### 3.1 Popis koloběžky

Nejprve je třeba se zabývat elektrickou výbavou koloběžky, aby s ní konstruovaný měnič dokázal dobře spolupracovat a aby nedošlo k chybě v důsledku opomenutí nějakého prvku.

#### 3.1.1 Akumulátor



Obr. 4 Akumulátor koloběžky

Na koloběžce je umístěn akumulátor technologie LiFePO<sub>4</sub>, který se skládá pravděpodobně z deseti článků po 3,6 V (v nabitém stavu 4,8 V). Udávaná kapacita je 10 Ah. Maximální nabíjecí proud 5 A, maximální krátkodobý vybíjecí proud 40 A, maximální pracovní proud 25 A. Akumulátor je chráněn zabudovanou tavnou pojistkou 25 A. Dále je v akumulátoru zabudována spínací skříňka, což je ve výchozím stavu jediné zabezpečení koloběžky. V uzamčeném stavu je akumulátor odpojen. Akumulátor dle výrobce obsahuje BMS (Battery Management System), o jehož fungování se nepodařilo dohledat žádné informace a mohl by být překážkou pro rekuperaci.

Užitá technologie LiFePO<sub>4</sub> je pro užití v elektrické trakci zvláště výhodná, zejména pro malý paměťový efekt, nízkou hmotnost vzhledem ke kapacitě nízkou latencí přechodů z režimu nabíjení do režimu vybíjení. Měla by mít též větší životnost oproti jiným technologiím typu lithium-ion.

### 3.1.2 Rukojeť



Obr. 5 Rukojeť

Hlavním ovládacím prvkem elektrického pohonu koloběžky je otočná rukojeť proudu (na rozdíl od spalovacích motorů regulujeme proud, nikoli plyn). Pohyb rukojeti snímá Hallova sonda, napájená z měniče. Na výstupu sondy se objevuje analogová hodnota napětí, závislá na úhlu natočení rukojeti. Rukojeť je vyobrazena na Obr. 5, kde si můžeme povšimnout integrované indikace napětí

akumulátoru. Vzhledem k nelineární závislosti zbývající kapacity na napětí článku je tato indikace nepřesná a nebude využita.

### 3.1.3 Motor

Užitý motor je typu BLDC, umístěný v zadním kole, na rotoru s permanentními magnety je integrován ráfek na kterém je přímo nazuta pneumatika. Střed tvoří stator, z osy středu jsou vyvedeny vodiče. Snímání polohy je realizováno třemi Hallovými snímači, v zapojení s otevřeným kolektorem. Na Obr. 6 je vidět řez motorem shodného typu a způsob provedení jeho statorového vinutí. Elektrické parametry motoru jsou popsány v další kapitole.



Obr. 6 Řez motorem podobné konstrukce [3]



## 3.2 Parametry měniče

Jak je z předchozího textu jasné, výsledný měnič musí být schopen připojovat napětí z baterie na konkrétní cívky motoru, v závislosti na natočení rukojeti proudu a natočení rotoru vzhledem ke statoru. Výkonové části musejí být dostatečně dimenzovány a vhodně realizovány, aby pracovaly spolehlivě a s dostatečnými rezervami. Regulace spínání by měla být levná, rychlá, dostatečně a lehce konfigurovatelná, což splňují moderní mikrokontroléry. Vstupy mikrokontroléru by měly být chráněny proti možným stavům přepětí nebo podpětí. Dále je potřeba vhodným způsobem realizovat napájení.

### 3.2.1 Elektrické parametry motoru, požadavky na výkonové prvky

Tab. 2 Tabulka elektrických parametrů motoru:

Nominální napětí [V]	48
Nominální výkon [W]	890
Točivý moment [N·m]	40
Maximální účinnost [%]	85
Nominální otáčky [ot·min <sup>-1</sup> ]	280

Vzhledem k velikosti proudů (až 18 A) a napětí (viz Tab. 2), je třeba klást důraz na vhodný návrh výkonové části měniče, indukčnost vodičů na DPS a jejich dimenzování. Výkonové spínací prvky je třeba umístit tak, aby se k nim dal rozumně připojit chladič. Motor koloběžky je vyobrazen na Obr. 7.



Obr. 7 Motor elektrické koloběžky

### 3.2.2 Vstupy pro rukojeť a Hallovy sondy

Rukojeť proudu má na výstupu analogovou hodnotu, kterou je třeba upravit do rozsahu, který dokáže na vstupu zpracovat mikrokontrolér. Hallovy sondy udávající polohu rotoru mají výstup digitální.

### 3.2.3 Napájení

Napájecí soustava měniče musí být schopna regulovat napětí z akumulátoru, které se pohybuje od 50 V při nabíjení do přibližně 32 V při úplném vybití, na hodnoty které budou vyžadovat různé funkční bloky měniče. To vše za rozumné spotřeby a přijatelných tepelných ztrát.

### 3.2.4 Snímání proudů a napětí

Pro přirozený pocit z ovládání pohonu koloběžky je nutné, aby rukojeť proudu regulovala proud a tím moment motoru. Z toho důvodu je třeba v měniči realizovat měření proudu. Vzhledem k maximálním proudům pohybujícím se okolo hodnoty 18 A, je nutné vhodné dimenzování tohoto obvodu.

Pro možnost případné realizace bezsenzorového řízení, je třeba mít na svorkách vinutí obvody pro snímání napětí. Dále je vhodná možnost snímat napětí akumulátoru.

### 3.2.5 Parametry mikrokontroléru

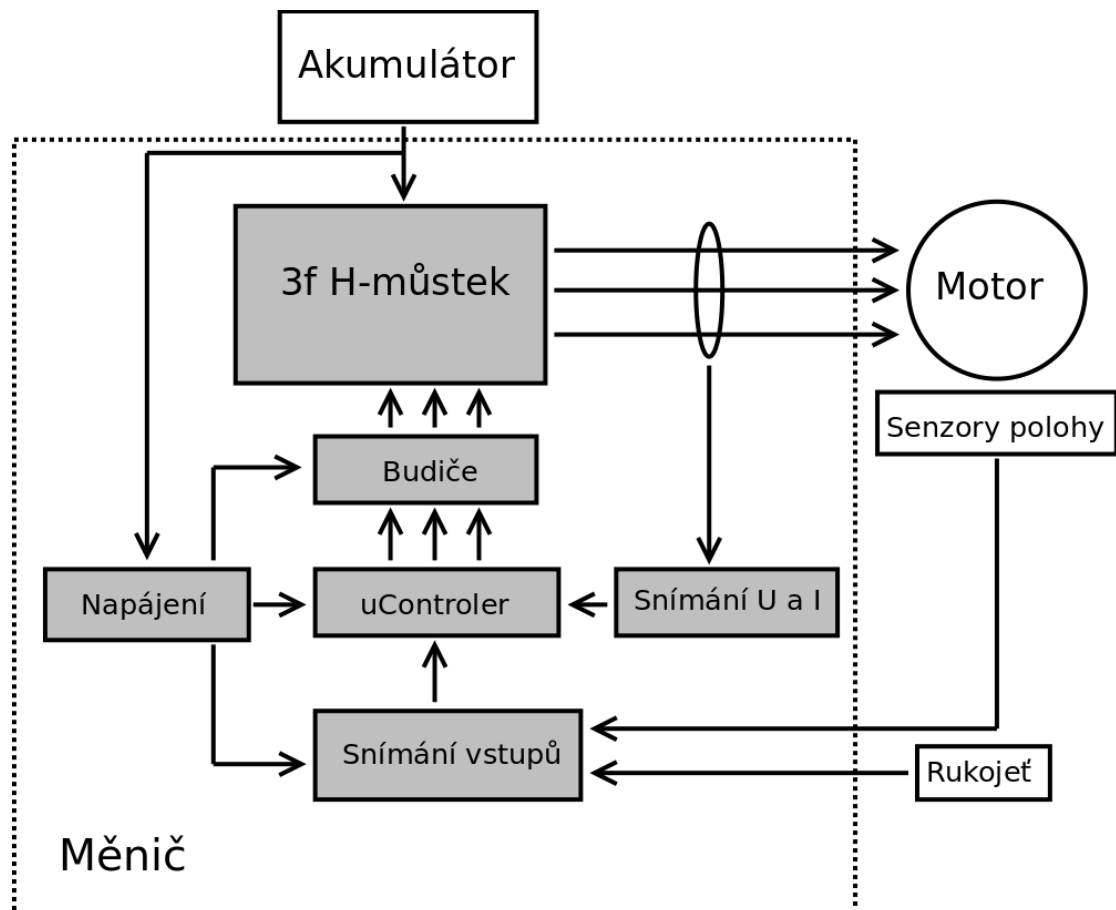
Užitý mikrokontrolér by měl mít dostatek analogových vstupů pro snímání všech měřených veličin, dostatek výkonu pro jejich zpracování, dostatek integrovaných PWM modulů pro řízení spínání a jednoduchou možnost připojení k PC pro možnost ladění měniče.

### 3.2.6 Další parametry měniče

Měnič by měl být rozumných rozměrů, jež umožňují montáž do vhodné krabičky. Rozmístění jeho výstupních vodičů by mělo umožňovat snadné připojení k ostatním prvkům koloběžky a konektor pro propojení mikrokontroléru a PC by měl být snadno přístupný.

## 4 Návrh obvodového schématu

Díličí prvky schématu udávají požadavky definované v předchozí kapitole, jejich vzájemné propojení a návaznosti na vnější prvky naznačuje blokový diagram měniče (Obr. 8). Jednotlivé bloky budou rozebrány v dalších odstavcích. Jelikož se ve schématu mnoho funkčních celků opakuje, je každý funkční celek popsán jen jednou, kompletní schéma zapojení je v příloze č. 2.



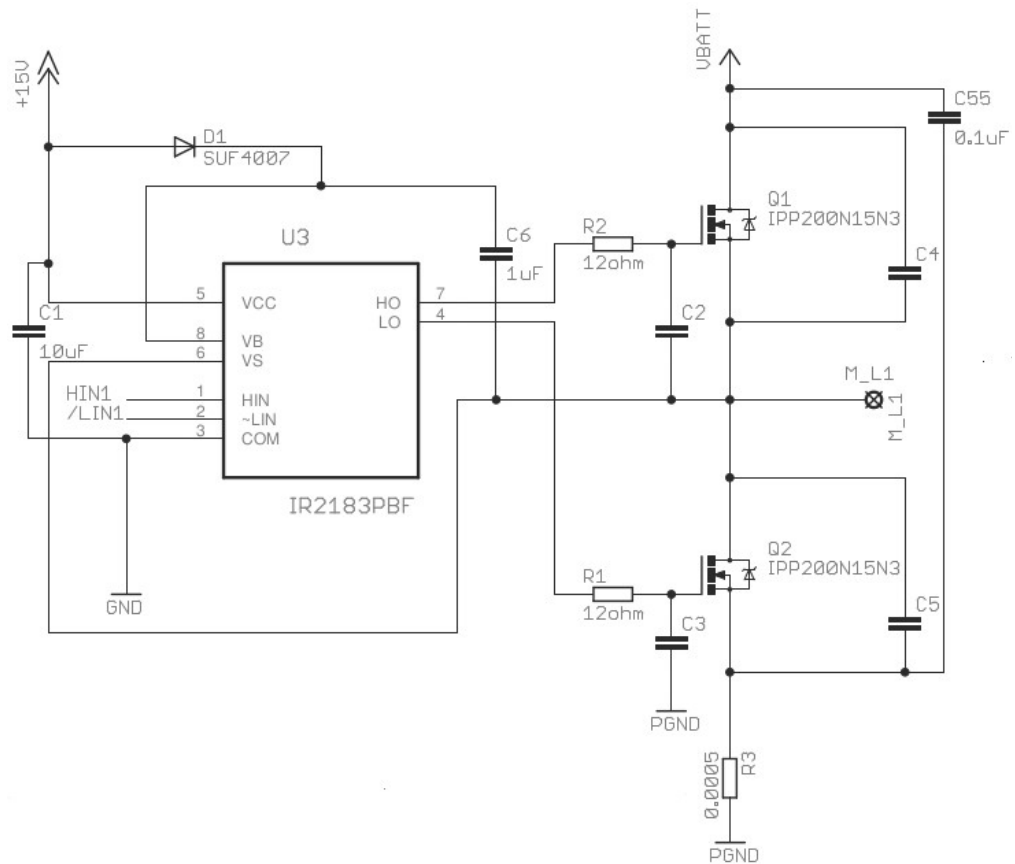
Obr. 8 Blokové schéma pohonu koloběžky

### 4.1 Výkonová část

Výkonovou část měniče tvoří trojfázový H-můstek tvořený šesti tranzistory IPP200N15N3 (150 V, 50 A), jež jsou dostatečně dimenzované pro užitý motor. Zapojení půl-můstku pro fázi L1 je uvedeno na Obr. 9.

Tranzistory půl-můstku jsou buzeny z obvodu IR2183PBF. Ten je napájen z 15 V a obsahuje integrovanou ochranu bránící sepnutí obou tranzistorů najednou (deadtime).

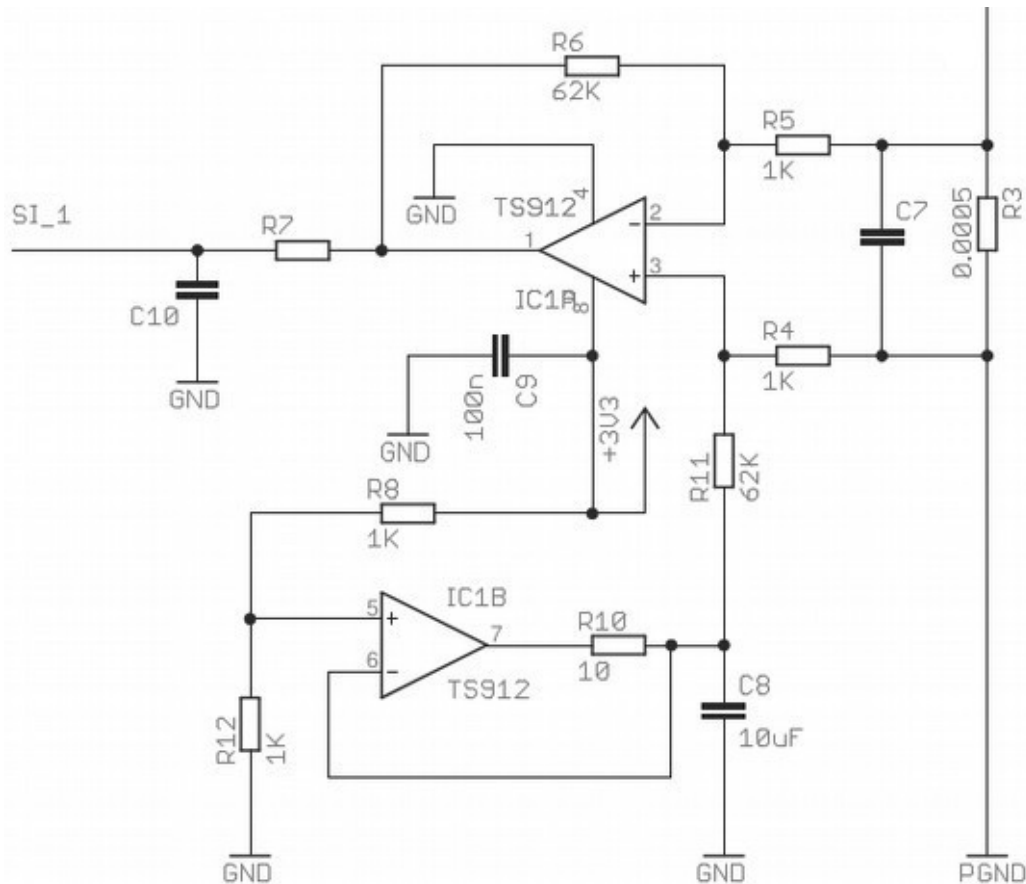
Svorka M\_L1 vede na vinutí motoru. Zapojení vychází z toho uvedeného v katalogu užitého budiče. Kondenzátory C2 až C5 nebudou v prvotní verzi osazeny, jsou zde pro možnost pozdější úpravy parametrů měniče. Kondenzátor C55 slouží k úpravě průběhu spínacího děje.



Obr. 9 Schéma půl-můstku fáze L1

R3 je odpor obvodu snímání proudu, tuto problematiku řeší následující kapitola. Ve schématu výkonové části je oddělena logická zem GND a výkonová zem PGND, obě země jsou spojeny u záporné svorky baterie. Shodné zapojení je ve všech třech fázích, viz kompletní schéma v příloze.

## 4.2 Snímání proudů



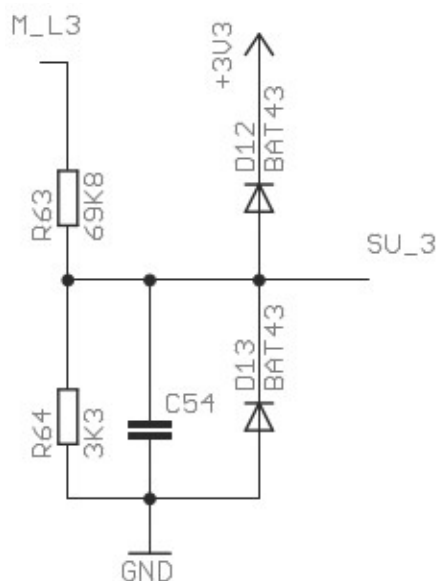
Obr. 10 Zapojení obvodu pro snímání proudu mezi svorkami M\_L1 a PGND

Snímání proudů ve fázích (Obr. 10) je realizováno obvodem operačního zesilovače (OZ), který snímá a zesiluje úbytek napětí na speciálním měřicím SMD rezistoru (R3). Tento diferenční zesilovač má kladné napájení připojeno na 3,3 V a záporné na GND, druhý operační zesilovač mu tvoří virtuální zem o napětí 1,6 V vůči GND. Pro kladné proudy 0 až 20 A by mělo být výstupní napětí v hodnotách mezi 1,65 V a 1 V. Pro záporné proudy napětí výstupu naopak roste až na hodnotu 2,2 V. Zapojení dokáže měřit proudy -50 až 50 A pro tento způsob užití má tedy dostatečnou rezervu. Toto zapojení bylo ověřeno na testovací desce, kde se prokázala dobrá linearita převodu proudu na napětí.

Shodné zapojení je ve všech větvích H-můstku, pro snímání proudů ve fázích a také před svorkou na připojení baterie, pro snímání proudu celkového. Snímání celkového proudu je zde z důvodů zjednodušení softwarové implementace řízení.

Užité integrované obvody mají dva OZ v jednom pouzdře, vždy jeden je měřicí a druhý vytváří napětí 1,65 V. Alternativní možností by bylo vytvářet 1,65 V jen jednou a rozvádět ho k ostatním OZ. Od této varianty bylo upuštěno z důvodu, že při nutnosti měření čtyř proudů bychom oproti užitému zapojení ušetřili pouze jeden integrovaný obvod, na úkor komplikací s rozvodem napětí 1,65 V po desce.

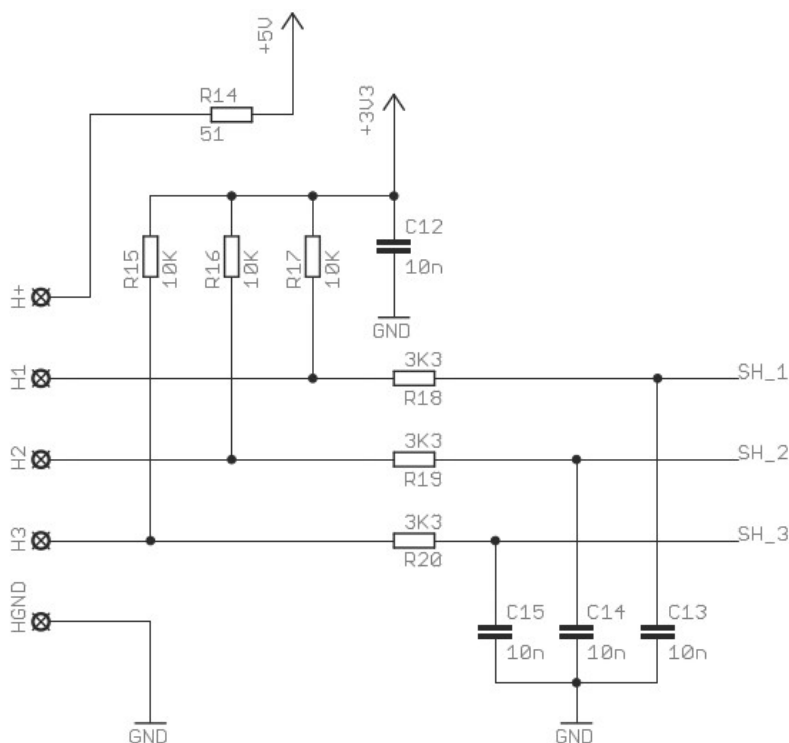
### 4.3 Snímání napětí



Obr. 11 Obvod snímání napětí

Pro snímání fázových napětí je užito jednoduchých děličů, na jejichž výstupu jsou ochranné diody, viz Obr. 11. Hodnoty děliče jsou zvoleny tak, aby vstupnímu napětí 0 až 72 V odpovídaly hodnoty 0 až 3,3 V. Shodného obvodu je použito i pro snímání napětí na baterii.

### 4.4 Snímání výstupů Hallových sond



Obr. 12 Zapojení obvodu pro snímání údajů o poloze rotoru

Hallové sondy motoru fungují na principu tranzistoru s otevřeným kolektorem, proto je výstupní signál držen pull-up rezistorem na hodnotě 3,3 V, při určitém natočení motoru

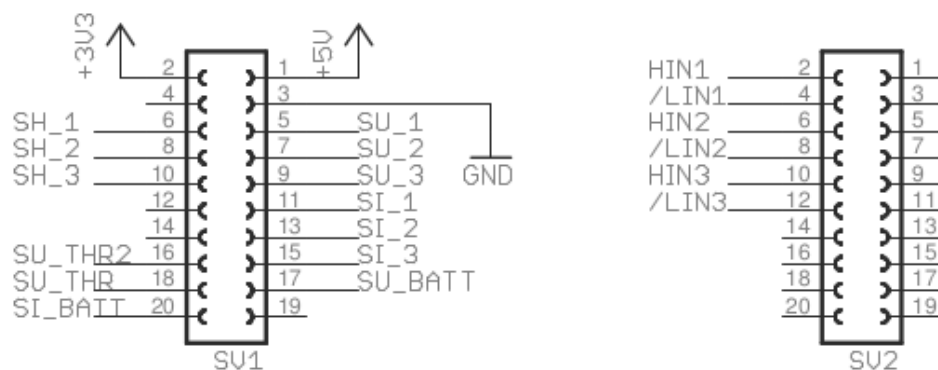
Hallová sonda toto napětí připojí k úrovni GND, tím pádem se na výstupu objeví hodnota napětí odpovídající úbytku na Hallově sondě. Rezistor v napájení a výstupní filtr je převzat z původního měniče dodávaného k motoru.

Rukojeť proudu by měla na výstupu dávat analogovou hodnotu v rozmezí GND až napájecího napětí, proto je na výstupu rukojeti napěťový dělič, který hodnotu upraví na rozsah 0 až 3,3 V pro mikrokontrolér. Dioda v napájení je převzata z původního měniče.

Obvod pro snímání analogové hodnoty z Hallové sondy je na desce realizován dvakrát, pro možnost snadného přidání dalšího ovládacího prvku pracujícího na shodném principu. (Uvažuje se o páčce motorové brzdy.)

## 4.5 Připojení na desku s mikrokontrolérem

Měnič nemá mikrokontrolér realizován přímo na desce, namísto toho je na desce měniče umístěna patice pro vývojový kit TI LaunchPad s mikrokontrolérem C2000, zaměřeným speciálně na aplikace pro řízení elektromotorů. Výhody tohoto řešení spočívají především v galvanicky odděleném integrovaném programátoru a ladicím rozhraní přímo na desce mikrokontroléru, což usnadní ladění software. Dále nevyužité vývody kitu nejsou uzemněny nebo jinak připojeny, tudíž je možno v budoucnu využít. Cenově toto řešení vychází velmi podobně jako při umístění mikrokontroléru přímo na desku.



Obr. 13 Zapojení patice konstruovaného měniče

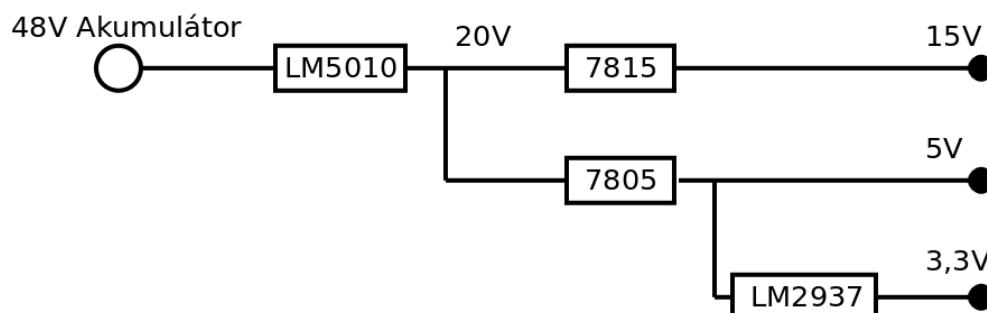
Mechanicky drží deska s procesorem pouze za svou patici, časem se ukáže, zda je toto řešení dostatečné.

Co se elektrického propojení týče, vstupy budičů (značeny HIN1 až HIN3 a /LIN1 až /LIN3) jsou připojeny na piny periferního obvodu EPWM. Výstupy snímání proudu (SI\_1 až SI\_3 a SI\_BATT), napětí (SU\_1 až SU\_3 a SI\_BATT) a polohy rukojeti (SU\_THR a SU\_THR2) jsou přivedeny na piny AD převodníků. Digitální výstupy Hallových sond (SH\_1 až SH\_3) jsou přivedeny na GPIO porty, viz Obr. 13 a Obr. 14.

Mux Value						Mux Value			
3	2	1	0	J1 Pin	J5 Pin	0	1	2	3
			+3.3V	1	1	+5V			
			ADCINA6	2	2	GND			
TZ2	SDAA	SCIRXDA	GPIO28	3	3	ADCINA7			
TZ3	SCLA	SCITXDA	GPIO29	4	4	ADCINA3			
Rsvd	Rsvd	COMP2OUT	GPIO34	5	5	ADCINA1			
			ADCINA4	6	6	ADCINA0			
	SCITXDA	SPICLK	GPIO18	7	7	ADCINB1			
			ADCINA2	8	8	ADCINB3			
			ADCINB2	9	9	ADCINB7			
			ADCINB4	10	10	NC			
3	2	1	0	J6 Pin	J2 Pin	0	1	2	3
Rsvd	Rsvd	EPWM1A	GPIO0	1	1	GND			
COMP1OUT	Rsvd	EPWM1B	GPIO1	2	2	GPIO19	SPISTEA	SCIRXDA	ECAP1
Rsvd	Rsvd	EPWM2A	GPIO2	3	3	GPIO12	TZ1	SCITXDA	Rsvd
COMP2OUT	Rsvd	EPWM2B	GPIO3	4	4	NC			
Rsvd	Rsvd	EPWM3A	GPIO4	5	5	RESET#			
ECAP1	Rsvd	EPWM3B	GPIO5	6	6	GPIO16/32	SPISIMOA/ SDAA	Rsvd/ EPWMSYNCl	TZ2/ ADCSOCA
TZ2/ ADCSOCA	Rsvd/ EPWMSYNCl	SPISIMOA/ SDAA	GPIO16/32	7	7	GPIO17/33	SPISOMIA/ SCLA	Rsvd/ EPWMSYNCO	TZ3/ ADCSOCB
TZ3/ ADCSOCB	Rsvd/ EPWMSYNCO	SPISOMIA/ SCLA	GPIO17/33	8	8	GPIO6	EPWM4A	EPWMSYNCl	EPWMSYNCO
			NC	9	9	GPIO7	EPWM4B	SCIRXDA	Rsvd
			NC	10	10	ADCINB6			

Obr. 14 Zapojení vývodů mikrokontroléru na desku vývojového kitu

## 4.6 Napájení a jištění



Obr. 15 Blokové schéma napájecí soustavy

Napájecí soustava stabilizuje a rozvádí napětí 15 V pro budiče, 5 V pro Hallovy sondy a 3,3 V pro operační zesilovače a mikrokontrolér. Vstupní napětí z akumulátoru se pohybuje v rozsahu od 36 V do 50 V. Pro snížení ztrát při regulaci je prvním stupněm spínaný stejnosměrný měnič pro snižování napětí, realizovaný obvodem s LM5010.

Tento obvod je schopen dodat 1 A a jeho maximální vstupní napětí je 75 V. Hodnoty užitých součástek pro daná napětí byly vypočteny programem, který k integrovanému obvodu dodal výrobce. Na výstupu měniče je napětí 20 V. To je pak lineárně stabilizováno na 15 V a 5 V pomocí obvodů 7815TV a 7805TV. Z větve 5 V je stabilizováno napětí 3,3 V obvodem LM2937IMP, viz blokové schéma napájení, Obr. 15. K lineárním stabilizátorům jsou připojeny blokovací kondenzátory katalogových hodnot. Jednotlivé stabilizátory jsou připojeny přes propojky, které zároveň umožňují snadné měření jejich výstupních napětí, z důvodů usnadnění oživení. Na vstupu spínaného měniče je umístěna pojistka 1 A, 63 V.



## 5 Návrh desky plošných spojů

V původních verzích návrhu DPS bylo počítáno s jednostrannou deskou, z důvodů jednoduchosti výroby. Pozdější modifikace schématu ukázaly malou flexibilitu tohoto řešení, proto byl návrh DPS zcela přepracován do aktuální podoby oboustranné desky. Výhody tohoto řešení spočívají v možnosti kvalitnějšího návrhu výkonové části, rovnoměrnější hustotě součástek, jednoduššímu propojení funkčních celků a zlepšením stínění rozlitém potenciálu GND po obou stranách. Co se rozměrů DPS týče, jsou u obou provedení shodné, z důvodů shodného umístění výkonové části a patice na desku procesoru.

### 5.1 Výkonová část

Stěžejním prvkem měniče je návrh výkonové části. Důležitými faktory jsou: co nejmenší indukčnost výkonových cest, dostatečné izolační mezery pro užitá napětí, malá vzdálenost kondenzátorů pro úpravu spínacího děje k tranzistorům můstku a vhodné umístění tranzistorů umožňující efektivní odvod ztrátového tepla.

Výkonové cesty jsou na DPS umístěny na opačných vrstvách a jsou realizovány rozlévanou mědí, to by mělo omezit indukčnost cest a snížit přepětíové špičky.

Výkonové tranzistory jsou umístěny v horní části DPS. Předpokládaný způsob chlazení je skrz hliníkový profil, ke kterému budou tranzistory přišroubovány z jedné strany, z druhé strany bude profil předávat odpadní teplo do hliníkové krabičky měniče. Tranzistory tak budou, spolu s lineárními regulátory, tvořit mechanické upevnění desky v krabičce.

### 5.2 Napájení

Prvním dílčím celkem napájecí soustavy měniče je spínaný stejnosměrný měnič pro snižování napětí, realizovaný obvodem LM5010. U jeho zapojení je délka některých cest stěžejní pro jeho dobrou funkci, proto bylo z velké části použito referenčního návrhu DPS z LM5010 Evaluation Board.

Od LM5010 je rozváděno 20 V do lineárních regulátorů, ty jsou umístěny ve spodní části desky a jejich blokovací kondenzátory jsou umístěny co nejbližší jejich vstupů a výstupů. Rozvod 5 V a 15 V je na vrstvě BOTTOM, na vrstvě TOP je rozvod 3,3 V. Po obou stranách je pro lepší stínění rozlita měď s nulovým potenciálem. Napájecí vodiče jsou oproti ostatním rozšířeny, pro lepší vodivost.

### 5.3 Snímání napětí a proudů

Operační zesilovače určené k snímání proudů jsou umístěny co nejbližší ke snímacím odporům. Děliče pro snímání napětí mají rezistor vyšší hodnoty umístěn co nejbližší ke konci

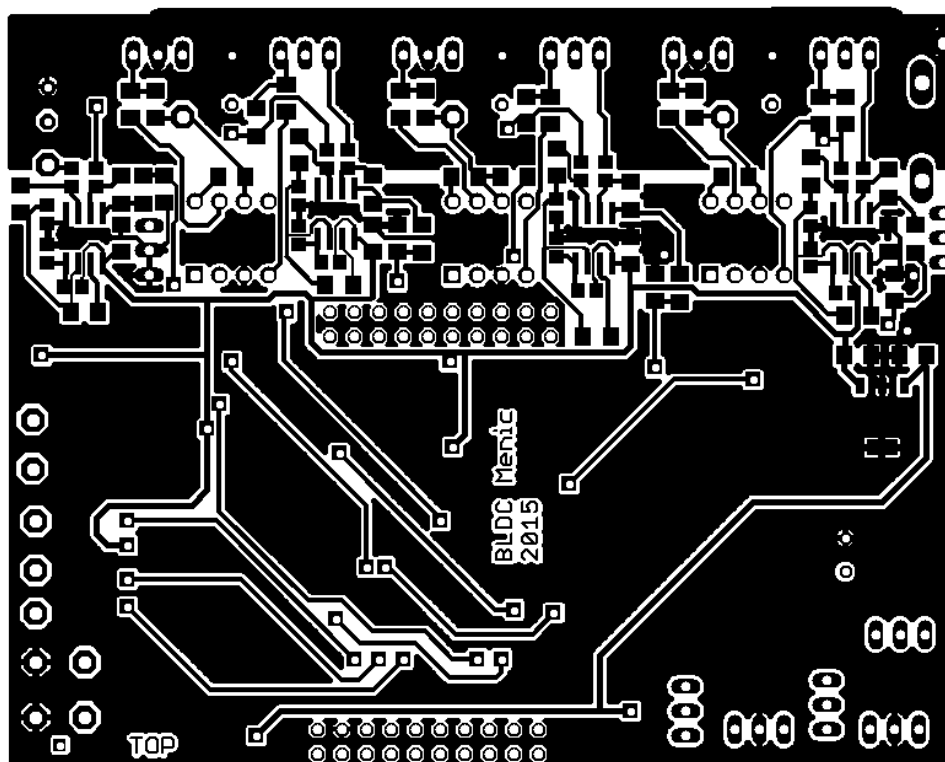
vinutí, druhý odpor a ochranné diody jsou umístěny blíže k patici. Obvody snímání senzorů polohy rotoru a rukojeti jsou umístěny blízko příslušných svorek a napájení je k nim vedeno z druhé strany desky skrz prokovy.

## 5.4 Předpokládaná montáž

Měnič je navržen pro umístění do krabičky, kde bude uchycen za výkonové tranzistory na jedné straně a za stabilizátory napětí na straně druhé. USB konektor desky procesoru je orientován ven, pro jednoduché připojení datového kabelu.

## 6 Osazení a testování

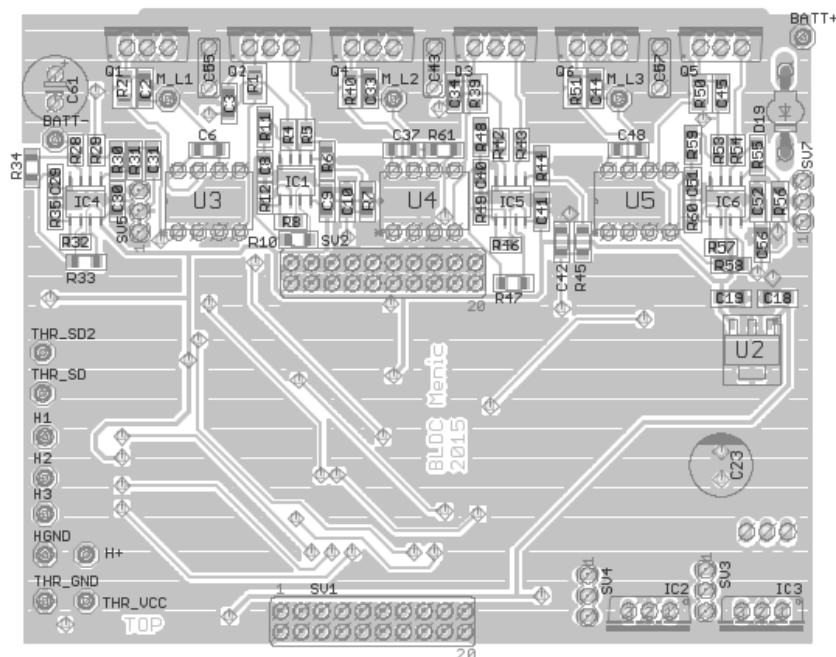
Oboustranná DPS byla vyrobena fotocestou z filmové předlohy. Z důvodů nedostatečné kvality předlohy bylo nutno DPS prověřit na zkratky a případné nedostatečné izolační mezery obnovit mechanickým odstraněním mědi. Prokovy byly realizovány ručně, zapájením měděného drátu do otvoru. Užití předlohy jsou součástí příloh na CD. Na *Obr. 16* je ukázka předlohy vrstvy TOP.



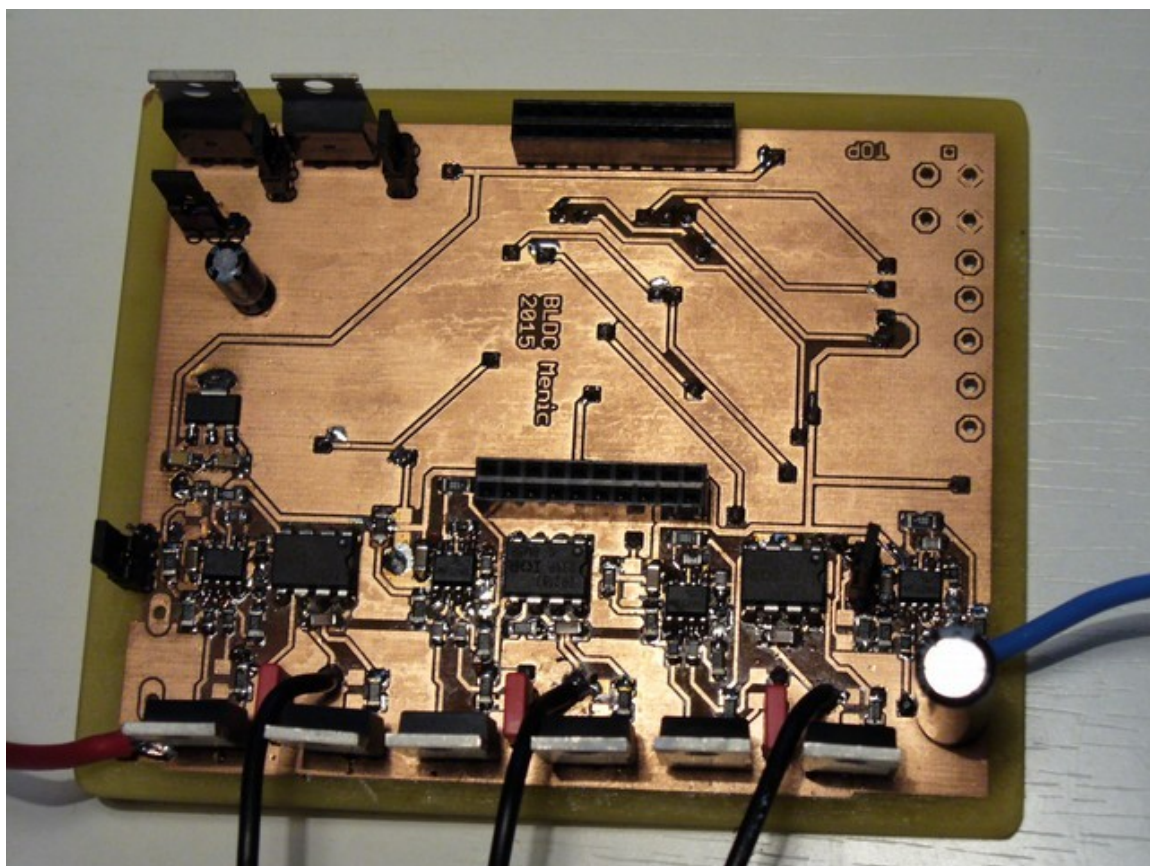
*Obr. 16 Předloha pro osvit vrstvy TOP (není v měřítku)*

## 6.1 Osazení

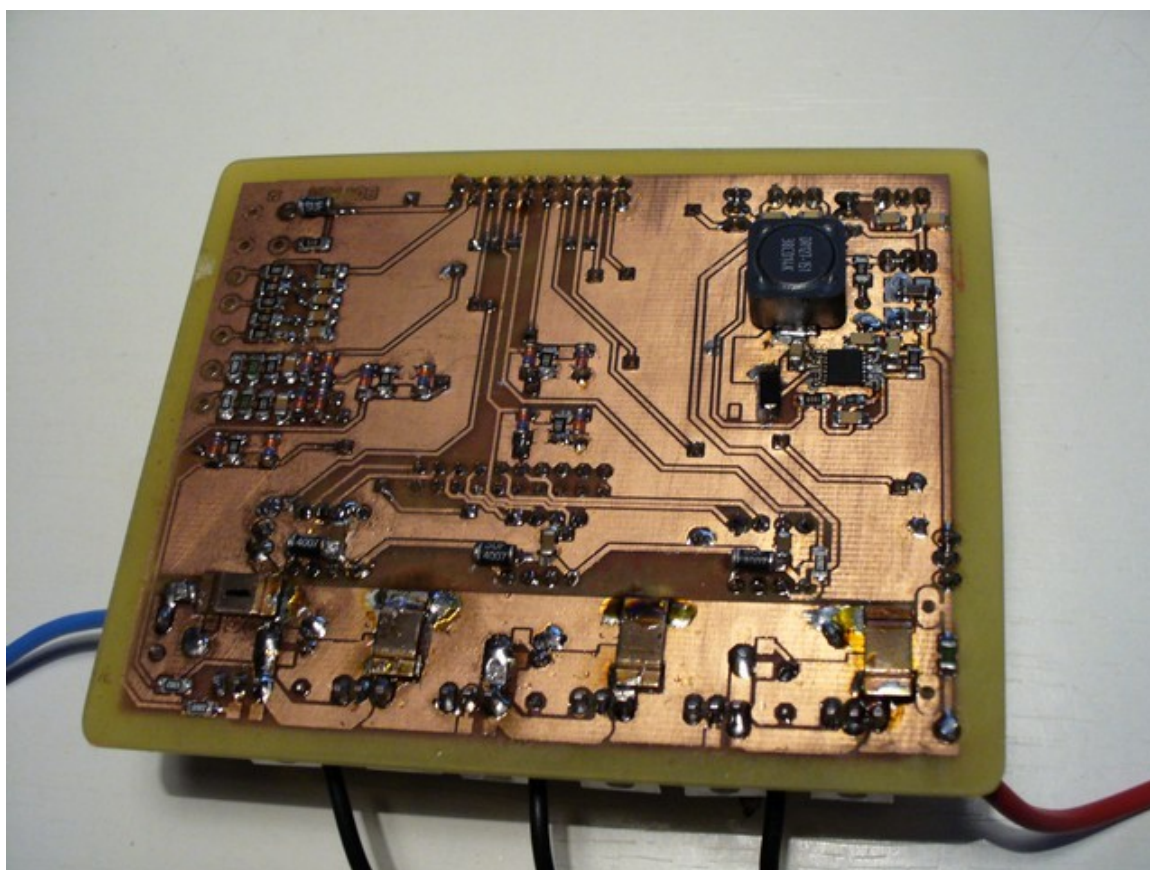
Osazena byla nejprve napájecí kaskáda, počínaje spínaným regulátorem LM5010. Zde nastal první problém s nevhodným pouzdrém objednané diody, problém byl vyřešen osazením jiné diody podobných parametrů. Po ověření funkce spínaného stabilizátoru měřením výstupní hodnoty napětí byly osazeny ostatní stabilizátory a ověřena správná polarita napětí na pájecích ploškách integrovaných obvodů. Poté byly osazeny operační zesilovače a ostatní součástky bloků pro měření proudů, ověření funkcionality těchto obvodů bylo provedeno měřením jejich výstupních napětí, které je v nezátíženém stavu 1,65V. Nakonec byly osazeny budiče a výkonové prvky. Osazovací plán a seznam osazených součástek je součástí příloh. Fotografie osazené desky jsou na obrázcích *Obr. 18* a *Obr. 19*. Na *Obr. 22* je měnič vyobrazen s připojenou deskou mikrokontroléru.



*Obr. 17 Ukázka osazovacího plánu vrstvy TOP*



Obr. 18 Svrchní strana osazeného měniče



Obr. 19 Spodní strana osazeného měniče

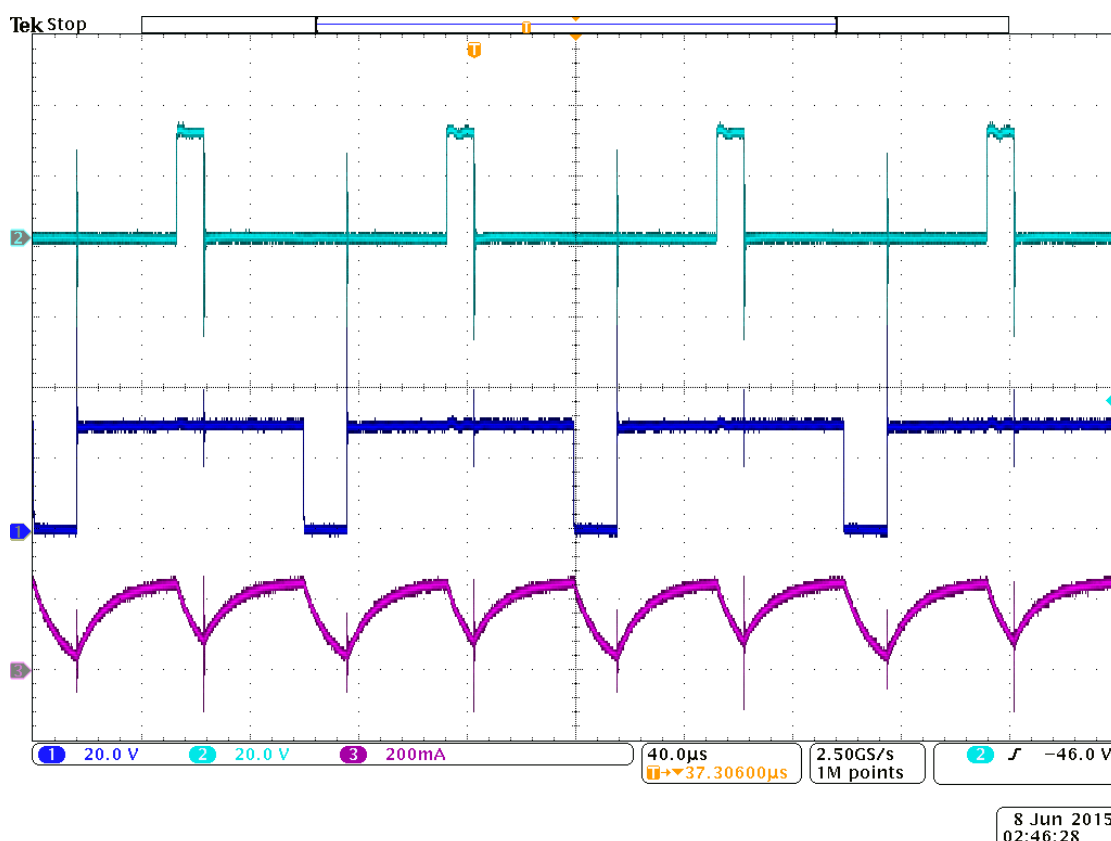
## 6.2 Testování

Ověření funkce zdrojů napětí bylo provedeno měřením výstupních napětí stabilizátoru, měnič byl připojen k laboratornímu zdroji 32V.

Tab. 3 Tabulka ověření hodnot napájecích napětí

Stabilizátor	Správná hodnota [V]	Měřená hodnota [V]
LM5010	20	19,9
7815	15	14,9
7805	5	4,9
LM2937IMP	3,3	3,3

Ověření funkce budičů a výkonové části probíhalo s logikou připojenou na zdroj 32V a výkonovou částí napájenou odlišným zdrojem o napětích 0 až 50V. Spínáno bylo do odporové zátěže.

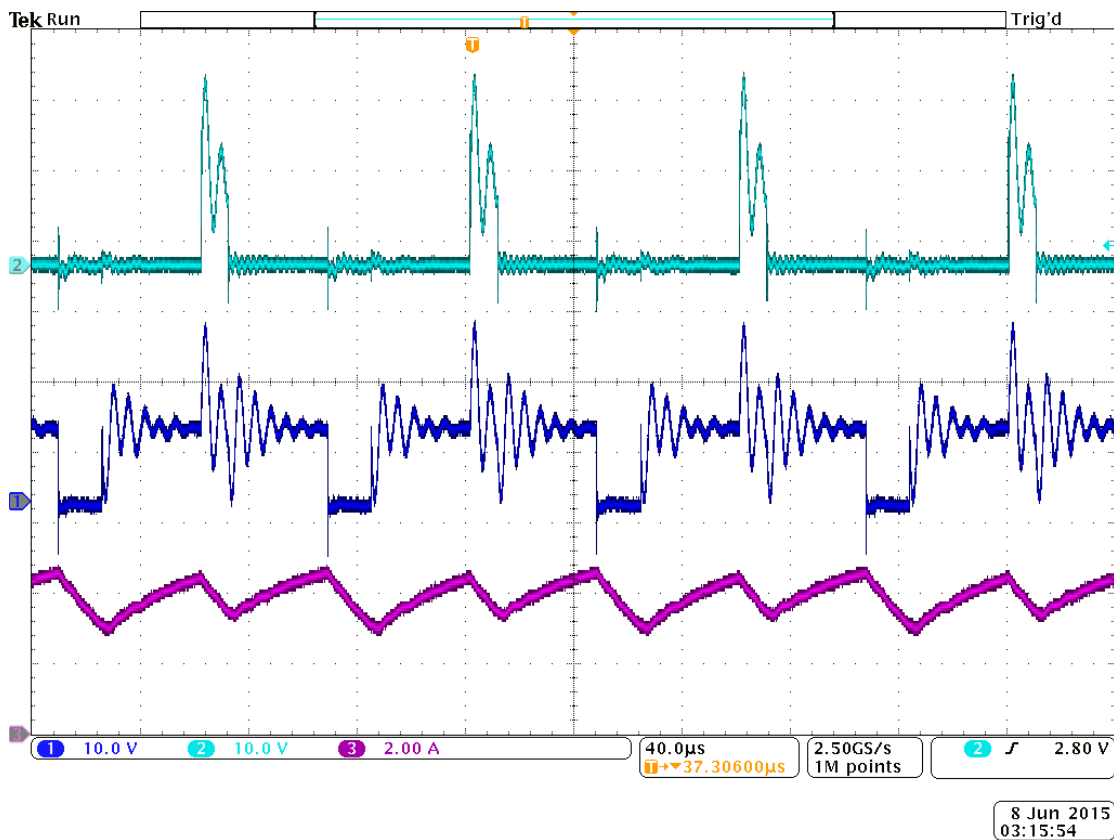


Obr. 20 Měření spínacích průběhů na napětí zátěže 48 V

Ověření funkce budičů a mikrokontroléru následoval test výkonových prvků. Měnič nebyl při tomto testování osazen SMD kondenzátory pro úpravu spínacího děje, aby byly jasně patrné parametry dané návrhem DPS.

Testování výkonové části probíhalo postupným navyšováním napětí až na hodnotu 48V při současném měření přepětových špiček. Špičky vzniklé spínáním dosáhly

dvojnásobku spínaného napětí, tudíž při spínání nominálního napětí 48V neohrožují použité spínací tranzistory. Snímek osciloskopu z tohoto měření je na obrázku *Obr. 20*.



*Obr. 21* Měření průběhů spínacího děje na napětí 12 V a proudu 3 A

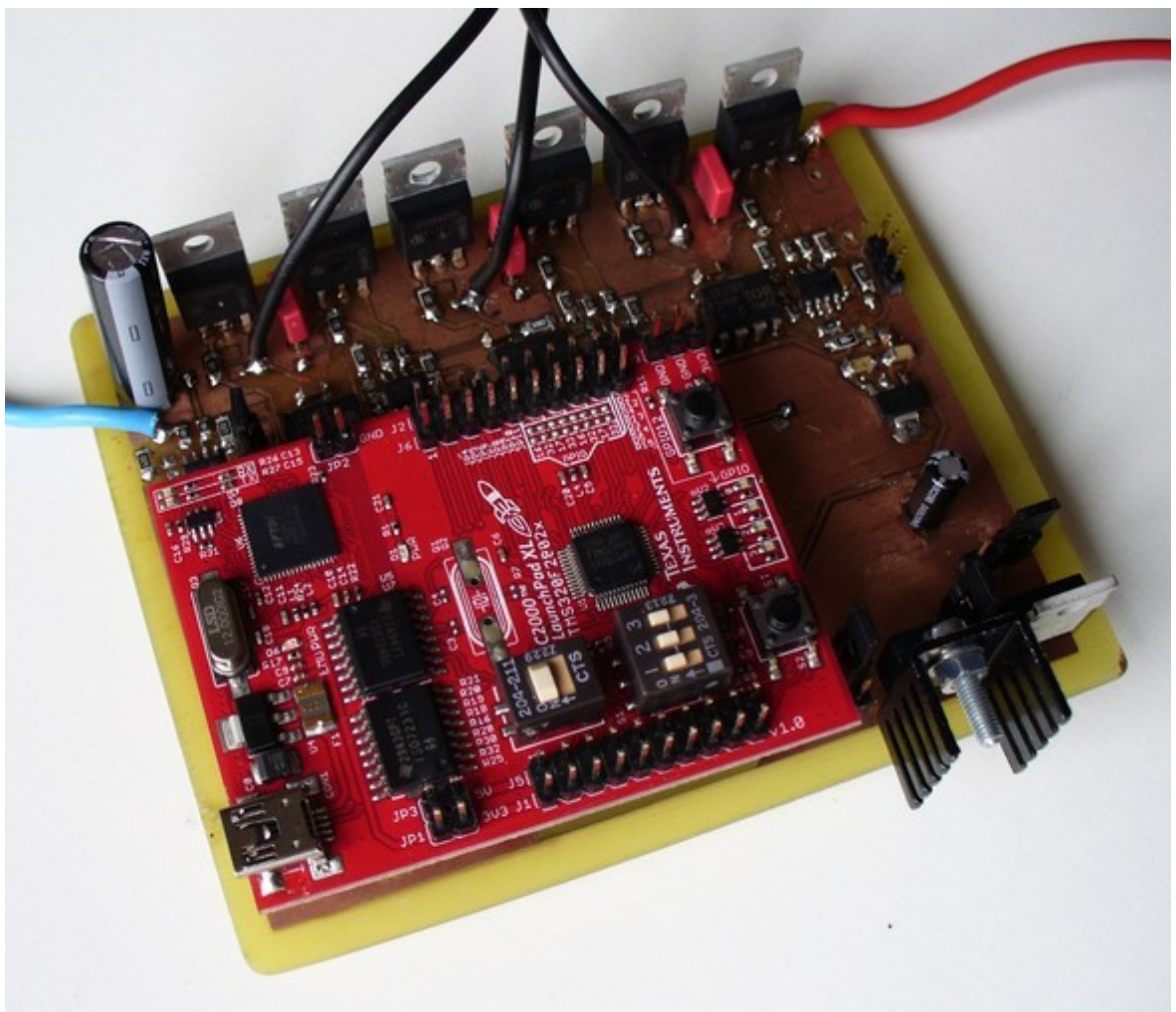
Ověření proudové zatížitelnosti měniče probíhalo postupným snižováním odporu zátěže, až k maximu danému maximálním proudem užitého zdroje (3 A). Tato měření odhalila vznik zákmitů napětí na výstupních svorkách patrných na obrázku *Obr. 21*. Tyto zákmity jsou řešitelné osazením vhodných kapacit, případně RC filtrů na připravené pájecí plošky. Tranzistory byly během měření chlazeny hliníkovým plechem o ploše cca 1 dm<sup>2</sup>. Teploty všech prvků měniče byly za provozu ověřeny termokamerou a krom dvou, dále zmíněných, případů se pohybovaly v přijatelných hodnotách. Vyšší teplota se objevila na stabilizátoru 5 V, po připevnění chladiče se ustálila na cca 75 °C, důvod ohřevu tohoto stabilizátoru je ve velkém úbytku napětí na stabilizátoru. Do příštích verzí měniče by bylo vhodné vyřešit napájení větve 5 V a 3,3 V efektivnějším způsobem. Dále dioda spínaného regulátoru se za běhu ohřívala na teploty okolo 90 °C, z výše popsaných důvodů osazení diody v menším pouzdře, než bylo plánováno. Dioda ve správném pouzdře by se chladila deskou plošného spoje.

Ověřena byla též funkce snímání proudů operačními zesilovači, měřením jejich výstupů. Při proudu zátěží 3 A kleslo napětí na jejich výstupech z 1,65 V na 1,5 V.

## 7 Závěr

Předmětem této bakalářské práce byl návrh a konstrukce měniče pro BLDC motor. Nejprve jsou popsány vlastnosti a principy BLDC motoru, které jsou potřebné pro návrh vhodného měniče pro tento typ motoru. Dále jsou specifikovány požadavky na jeho elektrické a parametry další parametry, vztahující se k cílové aplikaci měniče v pohonu elektrické koloběžky. Na základě navrženého blokového diagramu pohonu je nastíněna podoba schématu a dále detailně rozebrány jeho klíčové části. Následně je popsán návrh desky plošných spojů z příslušného schématu, její výroba, osazení, oživení a testování.

Navržený a vyrobený měnič je schopen provozu na požadovaném napětí. Při testování proudové zatížitelnosti se objevily oscilace jež by při plném výkonu způsobovaly nadměrné ztráty a tímto problémem je třeba se dále zabývat. Funkční celky napájení, snímání proudů, snímání napětí a obvody budičů výkonových tranzistorů fungují dle předpokladů.



Obr. 22 Měnič s připojenou deskou mikrokontroléru

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] BLDC Motor – Brushless DC Motor Introduction. *MNBTC*. [online]. 9.6.2015 [cit. 2015-06-09]. Dostupné z: [http://www.nmbtc.com/brushless-dc-motors/engineering/brushless\\_dc\\_motors\\_engineering/](http://www.nmbtc.com/brushless-dc-motors/engineering/brushless_dc_motors_engineering/)
- [2] VALENTINE, Richard. *Motor control electronics handbook*. Boston: McGraw-Hill, 1998. ISBN 0-07-066810-8.
- [3] Ride Electric!. *Magnet Magic*. [online]. 9.6.2015 [cit. 2015-06-09]. Dostupné z: <https://rideelectric.wordpress.com/tag/ev/#jp-carousel-264>
- [4] KŘIŽAN, Jakub. *Bezsenzorové řízení BLDC motoru*. Brno, 2012. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky.
- [5] KREJČÍ, Ondřej. *Řídící jednotka pro BLDC motor*. Brno, 2014. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky.



## **Přílohy**

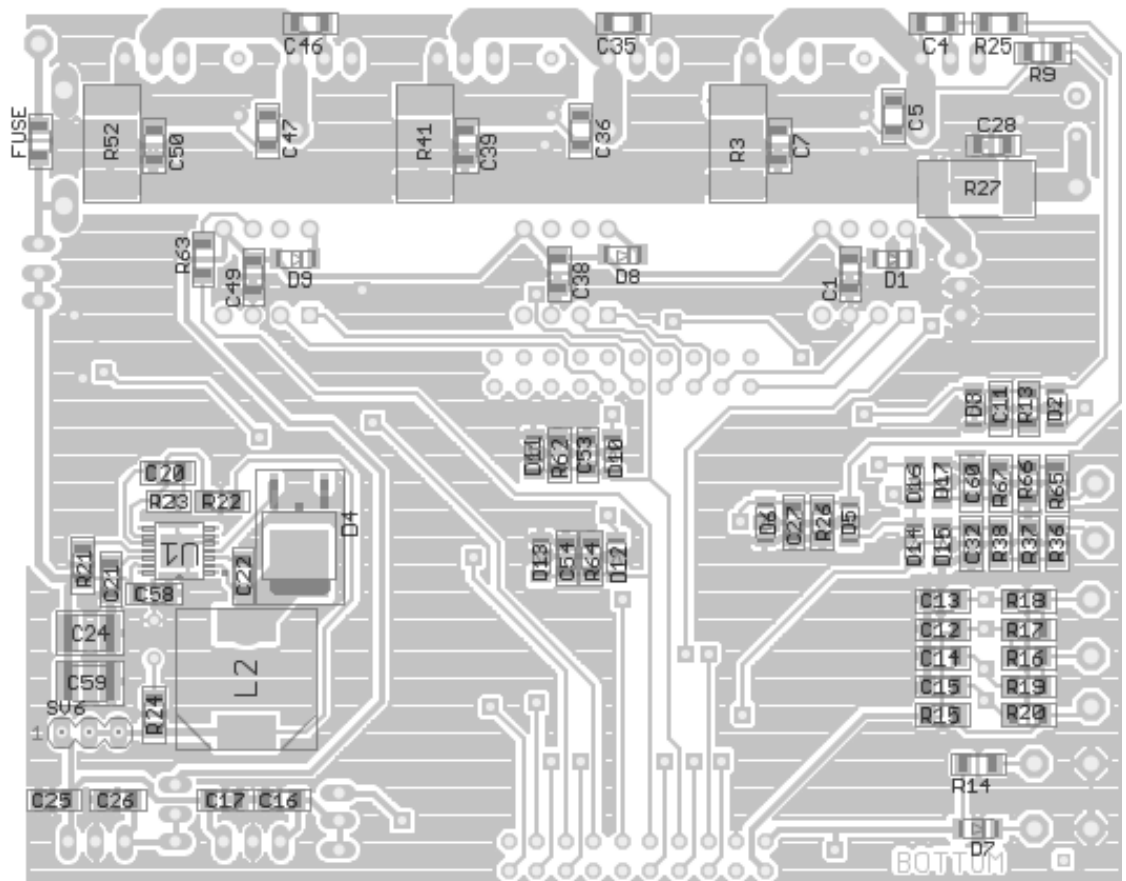
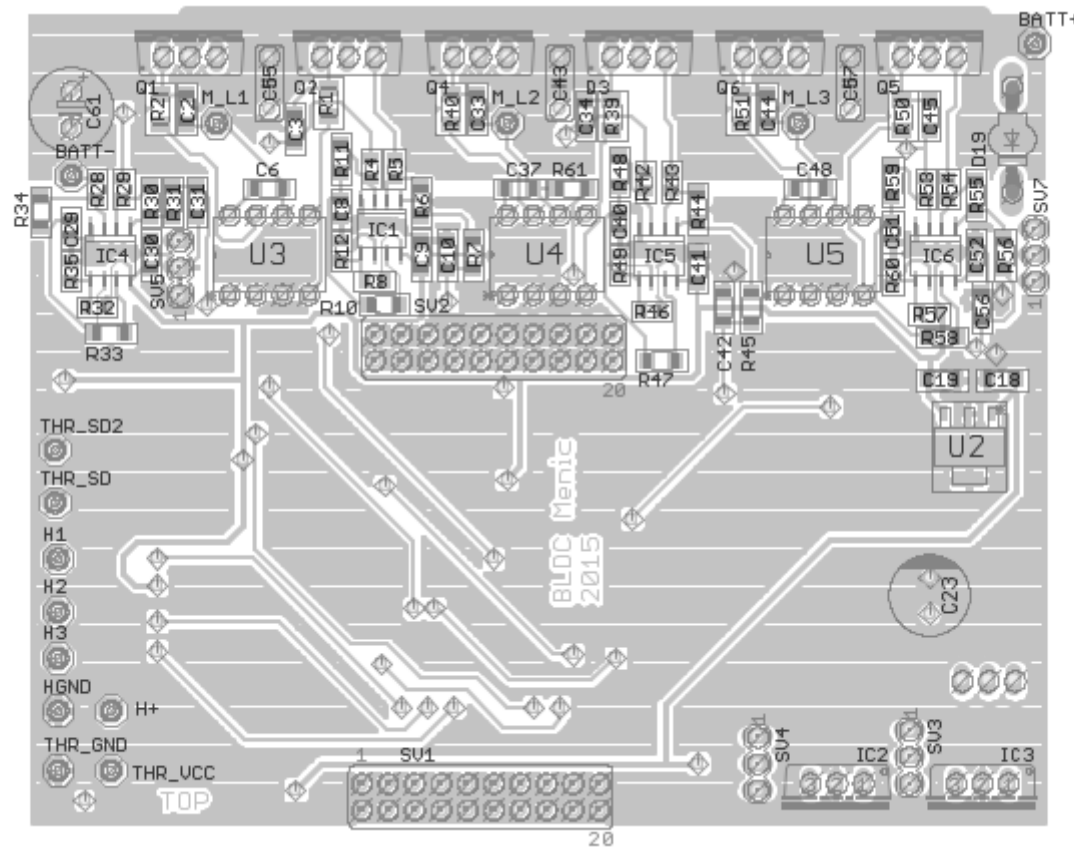
### **Obsah přiloženého CD:**

- Nákres schématu a DPS ve formátech programu CadSoft Eagle
- Užité podklady k výrobě ve formátu gerber a PDF
- Fotografie z této práce v plném rozlišení
- Snímky z osciloskopu v plném rozlišení
- Dokumentace dodávaná k užitým integrovaným obvodům

**Příloha 1:****Seznam osazených součástek a osazovací plán vrstev TOP a BOTTOM:**

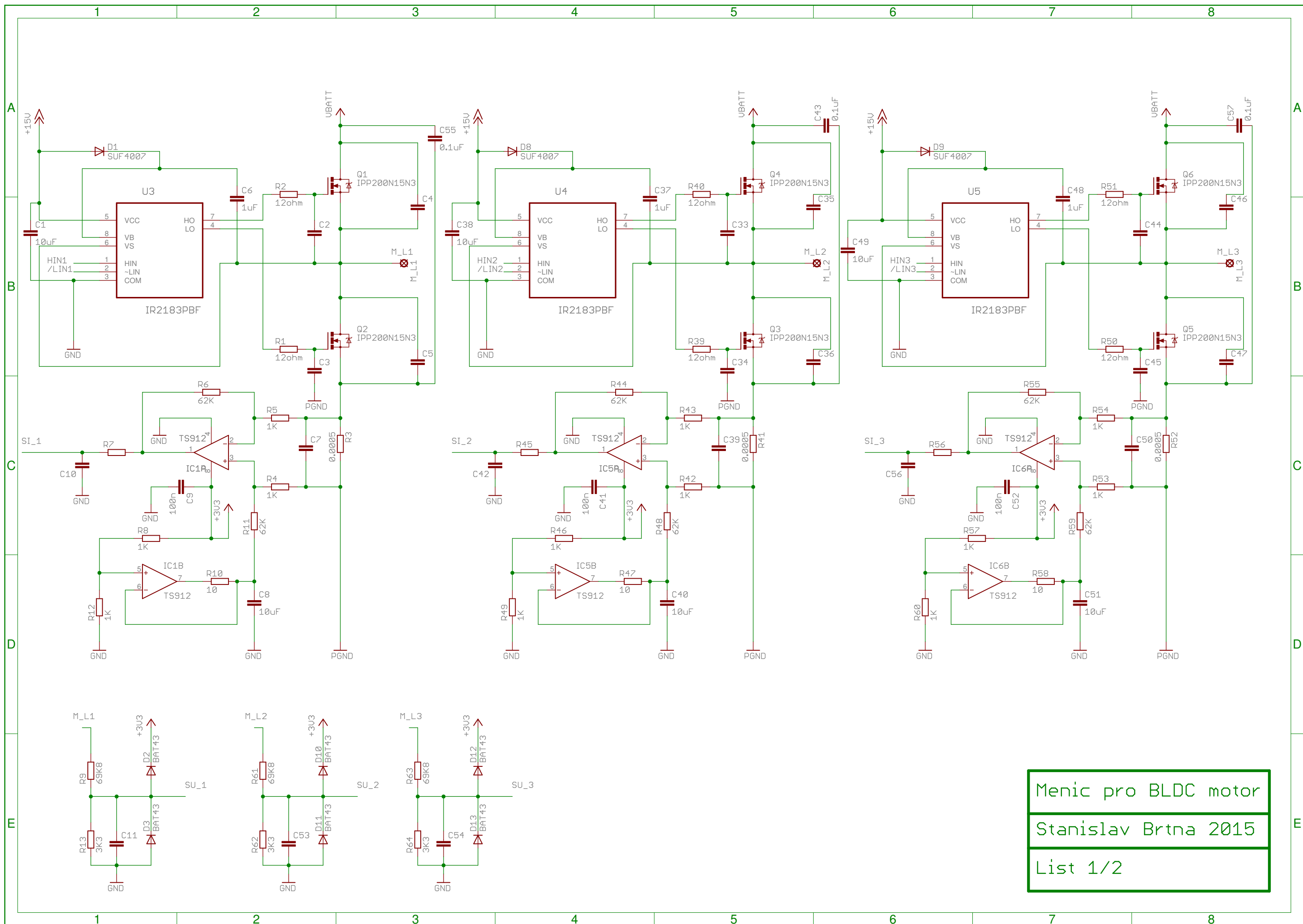
Qty	Value	Device	Package	Parts
4	0.0005	R-EU_R4527	R4527	R3, R27, R41, R52
1	0.022uF	C-EUC1206	C1206	C22
1	0.027uF	C-EUC1206	C1206	C20
3	0.1uF	C-EU050-025X075	C050-025X075	C43, C55, C57
5	0.1uF	C-EUC1206	C1206	C16, C19, C21, C26, C58
3	0.33uF	C-EUC1206	C1206	C17, C18, C25
1	1.4	R-EU_R1206	R1206	R24
4	10	R-EU_R1206	R1206	R10, R33, R47, R58
4	100n	C-EUC1206	C1206	C9, C30, C41, C52
5	10K	R-EU_R1206	R1206	R15, R16, R17, R38, R67
6	10n	C-EUC1206	C1206	C12, C13, C14, C15, C32, C60
4	10uF	C-EUC0805	C0805	C8, C29, C40, C51
3	10uF	C-EUC1206	C1206	C1, C38, C49
6	12	R-EU_M1206	M1206	R1, R2, R39, R40, R50, R51
2	13K	R-EU_R1206	R1206	R36, R65
1	1A	R-EU_R1206	R1206	FUSE
17	1K	R-EU_R0805	R0805	R4, R5, R8, R12, R23, R28, R29, R32, R35, R42, R43, R46, R49, R53, R54, R57, R60
1	1N4007	DIODE-MINIMELF	MINIMELF	D7
3	1uF	C-EUC1206	C1206	C6, C37, C48
2	2.2uF	C-EUC1812	C1812	C24, C59
1	220uF	CPOL-EUE3.5-8	E3,5-8	C61
1	22uF	CPOL-EUSANYO_E13	SANYO-OSCON_E13	C23
2	30K	R-EU_R1206	R1206	R37, R66
1	340K	R-EU_R1206	R1206	R21
7	3K3	R-EU_R1206	R1206	R13, R18, R19, R20, R26, R62, R64

1	51	R-EU_R1206	R1206	R14
1	6.98K	R-EU_R1206	R1206	R22
8	62K	R-EU_R1206	R1206	R6, R11, R30, R34, R44, R48, R55, R59
4	69K8	R-EU_R1206	R1206	R9, R25, R61, R63
1	7805TV	7805TV	TO220V	IC2
1	7815TV	7815TV	TO220V	IC3
12	BAT43	DIODE-MINIMELF	MINIMELF	D2, D3, D5, D6, D10, D11, D12, D13, D14, D15, D16, D17
1	DR127-151-R	DR127-151-R	INDM125125X800N	L2
6	IPP200N15N3	IRF540	TO220BV	Q1, Q2, Q3, Q4, Q5, Q6
3	IR2183PBF	IR2183PBF	DIP254P762X533-8	U3, U4, U5
1	LM2937IMP-3.3/NOPB	LM2937IMP-3.3/NOPB	SOT230P700X180-4N	U2
1	LM5010MH	LM5010MH	SOP65P640X110-15N	U1
3	SUF4007	DIODE-MINIMELF	MINIMELF	D1, D8, D9
4	TS912	AD826R	SO8	IC1, IC4, IC5, IC6
1	VS-8EWH02FN-M3	VS-8EWH02FN-M3	TO252	D4

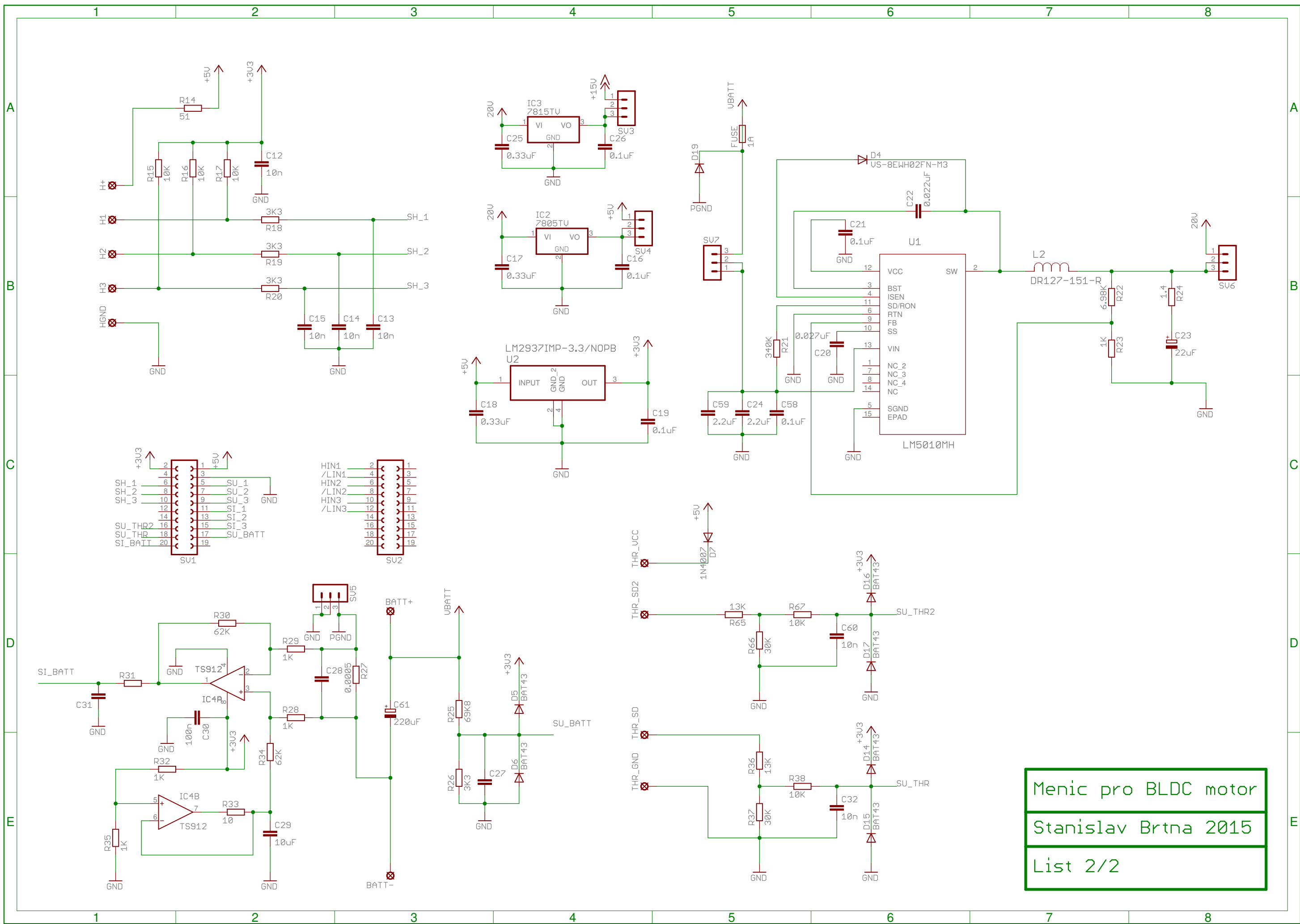


**Příloha 2:**

**Kompletní schéma zapojení**



Menic pro BLDC motor  
Stanislav Brtna 2015  
List 1/2



Menic pro BLDC motor  
Stanislav Brtna 2015  
List 2/2