

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2019

Michal Bedlivý



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

## MĚNIČ PRO BLDC MOTOR

CONVERTER FOR BLDC MOTOR

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Michal Bedlivý

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Knobloch, Ph.D.

BRNO 2019

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

**Student:** Michal Bedlivý

**ID:** 186807

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2018/19

## NÁZEV TÉMATU:

### Měnič pro BLDC motor

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Navrhnete DPS měniče.
2. Zařízení sestavte a oživte.
3. Naprogramujte řídicí algoritmus BLDC motoru.
4. Diskutujte výsledky.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Klíma B., Stupka R.; Mikroprocesorová technika v elektrických pohonech; Elektronický text FEKT VUT v Brně
- [2] Patočka M.: Vybrané statě z výkonové elektroniky, sv.I.
- [3] SKALICKÝ, Jiří. Elektrické servopohony. Vyd. 2. Brno: Vysoké učení technické, 2001. ISBN 80-214-1978-4.

**Termín zadání:** 4.2.2019

**Termín odevzdání:** 22.5.2019

**Vedoucí práce:** Ing. Jan Knobloch, Ph.D.

**Konzultant:**

**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**  
*předseda oborové rady*

#### UPOZORNĚNÍ:

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

## **ABSTRAKT**

Tato práce se zabývá problematikou řízení BLDC motoru v senzorovém i bezsenzorovém režimu a návrhem, realizací a měření vlastností tranzistorového měniče pro motor o nominálním výkonu 2 kW na napětí 48 V.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

EC motor, BLDC, bezkartáčový, měnič, STM32, mikroprocesor, pohon, bezsenzorové, senzorové, řízení, HALL sonda

## **ABSTRACT**

This thesis deals with problematics of BLDC motor controll in sensorless and sensed mode. Then it deals with design, manufacturing and performance measuring of transistor motor inverter. Nominal motor power is 2 kW at 48 V.

## **KEYWORDS**

EC motor, BLDC, brushless, inverter, STM32, microprocessor, drive, sensorless, sensed, controll, HALL sensor

BEDLIVÝ, Michal. *Měnič pro BLDC motor*. Brno, Rok, 51 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce: Ing. Jan Knobloch, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Měnič pro BLDC motor“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno .....

.....

podpis autora

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Janu Knoblochovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno .....

.....

podpis autora

# Obsah

Úvod	10
<b>1 Seznámení s BLDC motory</b>	<b>11</b>
1.1 Konstrukce	11
1.1.1 Snímání polohy	11
1.2 Řízení	14
1.2.1 Six-step komutace	14
1.2.2 Sinusové řízení	14
1.2.3 Vektorové řízení	15
1.2.4 Způsoby spínání	16
<b>2 Návrh hardware měniče pro BLDC motor</b>	<b>17</b>
2.1 Výkonová část	17
2.1.1 Výkonový spínač	17
2.1.2 Budící obvody	19
2.1.3 Měření proudu	20
2.1.4 Rozložení na DPS	21
2.2 Řídící část	23
2.2.1 Mikroprocesor	23
2.2.2 PWM výstupy	23
2.2.3 Vstupy HALL snímačů	23
2.2.4 Měření proudů a napětí	24
2.2.5 Externí vstupy	24
2.2.6 Silové výstupy	24
2.2.7 Sběrnice CAN	25
2.2.8 Rozložení na DPS	25
2.3 Zdroje	25
2.3.1 Rozložení na DPS	26
<b>3 Návrh firmware měniče</b>	<b>28</b>
3.1 Testovací firmware	28
3.2 ST Motor Control Workbench	29
3.2.1 Nastavení parametrů motoru	29
<b>4 Praktická realizace a oživení</b>	<b>30</b>
<b>5 Testování a měření</b>	<b>31</b>

<b>6 Závěr</b>	<b>39</b>
<b>Literatura</b>	<b>40</b>
<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>42</b>
<b>Seznam příloh</b>	<b>43</b>
<b>A Schéma a plošný spoj</b>	<b>44</b>
<b>B Obsah přiloženého CD</b>	<b>51</b>



# Seznam obrázků

1.1	inrunner nalevo, napravo outrunner [1]	11
1.2	Průběh napětí na fázi motoru [2]	12
1.3	Výstup HALL senzorů v závislosti na úhlu natočení.[4]	13
1.4	Disk absolutního enkodéru s pěti bitovým rozlišením.[6]	14
1.5	Spínání fází six-step komutace. [7]	15
1.6	Spínání fází sinusové řízení. [8]	15
2.1	Pouzdro SOP Advance [11]	18
2.2	Katalogové zapojení budiče. [13]	20
2.3	Umístění chladiče. [15]	21
2.4	Jedna fáze tranzistorového mostu.	22
2.5	Mapování pinů v STM32CubeMX.	25
2.6	WEBENCH®Power designer	26
2.7	Rozložení zdrojové části na DPS.	27
5.1	Měřicí pracoviště.	32
5.2	Detailní pohled na připojení měřicích sond.	32
5.3	CH1: Proud první fáze; CH2,CH3,CH4: Výstupy HALL sond.	33
5.4	CH1: Proud první fáze; CH2: Napětí na první fázi; CH3,CH4: Výstupy HALL sond.	33
5.5	CH1: Napětí na první fázi (střída 5%).	34
5.6	Napětí na první fázi (střída 20%).	34
5.7	CH1: Proud první fáze; CH2: Napětí na první fázi.	35
5.8	CH1: Proud první fáze; CH2: Napětí na první fázi.	35
5.9	CH1: Proud první fáze; CH2: Napětí na první fázi.	36
5.10	CH1: Proud první fáze; CH2: Napětí na gate dolního tranzistoru první fáze.	36
5.11	CH1: Proud první fáze; CH2: Napětí na gate horního tranzistoru první fáze.	37
5.12	CH1: Proud jedné fáze, CH2,CH3,CH4: Napětí na jednotlivých fázích.	37
5.13	CH1: Proud jedné fáze, CH2,CH3,CH4: Napětí na jednotlivých fázích.	38
A.1	Náhled plošného spoje.	44
A.2	Vrstva TOP DPS.	45
A.3	Vrstva BOTTOM DPS.	45
A.4	Schéma zapojení - procesor	46
A.5	Schéma zapojení - výkonová část	47
A.6	Schéma zapojení - Vstupy, výstupy, CAN budič	48
A.7	Schéma zapojení - měření proudů a napětí	49
A.8	Schéma zapojení - zdroje 12V, 5V a 3,3V	50

# Seznam tabulek

1.1	Porovnání variant spínání . . . . .	16
-----	-------------------------------------	----

# Úvod

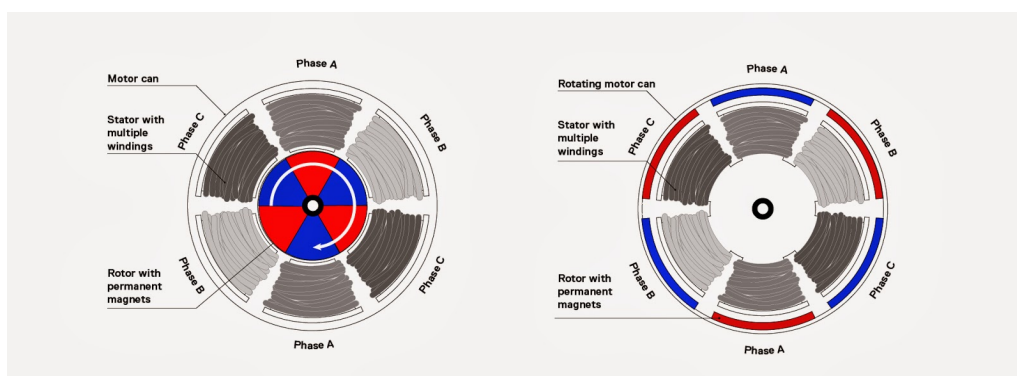
Stejnoseměrné motory jsou elektrické točivé stroje pracující se stejnosměrným napájením. Dříve byly výhradně používány motory s mechanickým komutátorem, který je jejich hlavní nevýhodou a k poškození nejnáchylnější komponentou. U mechanického komutátoru dochází k přenosu a komutaci proudu kluzným kontaktem, obsahujícím lamelový komutátor a uhlíky. Při provozu dochází k obrušování uhlíku, a tedy po určité době provozu je nutná jejich výměna, dále také dochází k jiskření, díky čemuž může docházet k rušení, a také například není možné použití ve výbušném prostředí.

U BLDC (Stejnoseměrný elektronicky komutovaný – Brushless direct current) motorů je mechanický komutátor nahrazen elektronickým měničem, výhodou je bezúdržbovost a větší robustnost stroje. Měnič má za úkol spínat proud do vinutí jednotlivých fází v závislosti na poloze rotoru a zároveň regulovat výkon potažmo otáčky motoru. Spínání proudu se provádí třífázovým tranzistorovým můstkem, nejčastěji tvořeným MOS-FET nebo pro vyšší napětí IGBT. Pro správné řízení motoru je nutné znát polohu rotoru, tu je možné snímat senzorem například HALL snímači nebo bezsenzorově, například vyhodnocováním průchodu zpětného elektromotorického napětí nulou. Logiku řízení může mít na starosti specializovaný obvod, častěji používaný v jednoduchých měničích, či mikroprocesor s příslušným softwarovým vybavením. Při použití dnešních mikroprocesorů, s dostatečným výkonem jako řídicího prvku, se naskýtá možnost použití pokročilých způsobů řízení motoru. Vektorové řízení motoru dosahuje lepších výsledků plynulosti momentu motoru i lepší účinnosti než jednoduché řízení metodou tzv. six step. BLDC motory jsou vhodné a používané v širokém rozmezí výkonů od několika málo wattů například v počítačových ventilátorech přes motory používané v RC modelářství, elektrokolech, až po velké výkony v elektromobilech a průmyslu. Tato bakalářská práce se zabývá popisem konstrukce BLDC motorů, způsobem jejich řízení a následným návrhem, výrobou a testováním měniče. Navrhovaný měnič je dimenzován pro motor o výkonu 2 kW s nominálním napětím 48 V obsahující HALL senzory. Návrh však počítá i s možností bezsenzorového řízení při použití s jiným motorem. Cílem návrhu jsou nízké ztráty, ať už kvůli předpokladu provozu na akumulátor, tak i z důvodu chlazení, které by mělo být pasivní a co nejméně náročné. Návrh výkonové části se zabývá výběrem tranzistorů a způsobu jejich buzení. Řídicí část počítá s použitím mikroprocesoru z rodiny STM32. Firmware pro mikroprocesor je navrhnut pomocí dostupných nástrojů a SDK od firmy STM.

# 1 Seznámení s BLDC motory

## 1.1 Konstrukce

Všechny točivé elektrické stroje obsahují dvě základní části, a to rotor, který je u BLDC motorů tvořen permanentními magnety, a stator, který je tvořen nejčastěji třífázovým vinutím zapojeným do hvězdy. Motory dělíme podle uspořádání na motory s vnitřním rotorem (inrunner), u kterého je rotor umístěn uvnitř statoru a s rotačním pláštěm (outrunner), u kterého rotor obíhá stator 1.1. Motory typu inrunner jsou vhodné pro vysokootáčkové aplikace a mívají malý počet pólů, oproti tomu motory typu outrunner jsou vyráběny s velkým počtem pólů a jsou používány v aplikacích, kde je třeba vyšší moment při nízkých otáčkách. Počet pólů definuje počet elektrických otáček na jednu mechanickou.



Obr. 1.1: inrunner nalevo, napravo outrunner [1]

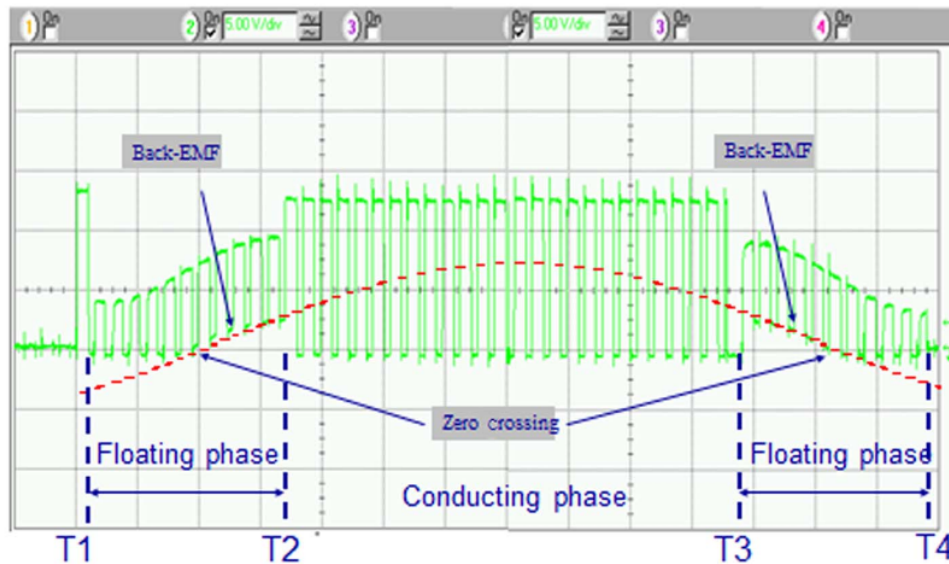
### 1.1.1 Snímání polohy

Pro řízení motoru je nutné znát polohu rotoru, dle které je řízena komutace. Snímání polohy se provádí několika způsoby v závislosti na požadované přesnosti a vlastnostech pohonu, a to buď bezsensorově, nebo některým typem snímače polohy.

#### Bezsensorové snímání

U běžícího motoru lze využít k určení polohy měření indukovaného napětí na neaktivní fázi. Mechanicky je to nejjednodušší řešení. Tato metoda je vhodná pro vysokootáčkové aplikace a nelze ji použít pro rozeběh motoru a pomalý chod s velkým momentem, protože indukované napětí je příliš malé. Typický průběh indukovaného

napětí je na Obr. 1.2, pro detekci pozice se využívá okamžik průchodu indukovaného napětí nulou.



Obr. 1.2: Průběh napětí na fázi motoru [2]

Další možností je tzv. BEMF Observer. Tato metoda určení polohy využívá měření proudu jednotlivých fází a následně ze znalosti parametrů motoru jako je indukčnost vinutí, odpor vinutí, konstrukční konstanta motoru apod. dle matematického modelu motoru dopočítává hodnotu indukovaného napětí, a tedy i polohu rotoru.[3] Pro rozeběh motoru na minimální otáčky od kterých bez-senzorové snímání funguje je motor provozován v otevřené regulační smyčce. Konkrétních postupů spouštění je více a záleží na konkrétní aplikaci pohonu. Často se využívá počátečního uvedení rotoru do známé polohy krátkým sepnutím jedné fáze a následný rozeběh podle komutační tabulky se zvyšující se frekvencí komutace. Nevýhodou je že rotor na začátku cukne nepředvídatelným směrem, což mnohdy nevádí (například u RC modelu), ale v jiných aplikacích je nepřijatelné a je nutné použít jinou metodu. Obecně motor řízený v otevřené smyčce má malý moment a pokud dojde k zastavení je nutné opakovat startovací sekvenci znovu.

## HALL sondy

Hall sonda je elektronická součástka snímající magnetickou indukci, čehož se využívá u snímání polohy rotoru motoru. Na motoru se nachází tři snímače posunutá o  $120^\circ$

Angle $\theta$ in electrical degree	Hall Sensors		
	H1	H2	H3
$0^\circ - 60^\circ$	1	0	1
$60^\circ - 120^\circ$	1	0	0
$120^\circ - 180^\circ$	1	1	0
$180^\circ - 240^\circ$	0	1	0
$240^\circ - 300^\circ$	0	1	1
$300^\circ - 360^\circ$	0	0	1

Obr. 1.3: Výstup HALL senzorů v závislosti na úhlu natočení.[4]

nebo  $60^\circ$  přímo snímající magnetické pole rotoru. Nejčastěji se využívá typů s výstupem typu otevřený kolektor. Při jejich použití známe polohu rotoru s rozlišením  $60^\circ$ , tedy 6 poloh na jednu otáčku (vždy vztaženo na jednu elektrickou otáčku) 1.3, což pro základní řízení motoru postačuje. Hall sondy vyžadují napájení nejčastěji 5V. [5]

## Enkodér

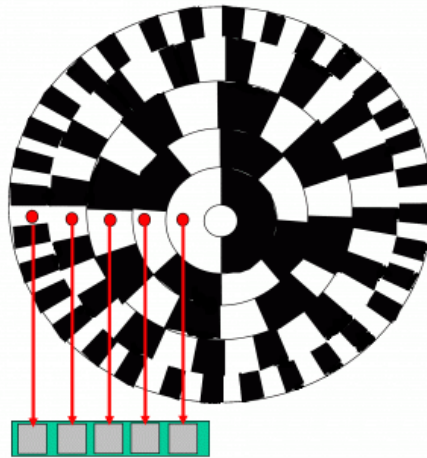
Rotační enkodér je zařízení pro měření pozice, úhlu, rychlosti nebo všechny veličiny na nich závislých. Běžně se dělí na dvě skupiny a to:

- Inkrementální - generují sled pulzů v závislosti na otáčení
- Absolutní - výstupem je kód udávající absolutní polohu

Nejčastěji pracují na optickém principu. Optický enkodér se skládá z disku připevněného k rotující hřídeli, zdroje světla, nejčastěji LED dioda a fotodetektor (fototranzistor nebo fotodioda). Na rotujícím disku je maska, která je buď tvořena průhlednými a neprůhlednými segmenty, kdy je zdroj světla na jedné straně a detektor na druhé, který detekuje průchod světla, nebo je tvořena světlými a tmavými segmenty, a zdroj i fotodetektor je na jedné straně, kde detekuje odraz světla.

U inkrementálního enkodéru detekujeme směr a počet kroků rotace, neznáme tedy přesnou polohu. Proto disk obsahuje nejčastěji ještě jednu tzv. nulovou značku, která udává referenční polohu, od které lze potom absolutní polohu dopočítat v nadřazeném systému. Absolutní poloha je tedy známa až po projití rotoru nulovou polohou, a je nutné ji kalibrovat pro případ ztráty impulzu. Oproti tomu u absolutního enkodéru je poloha známa v jakýkoliv moment, avšak nevýhodou je složitost systému, kdy je potřeba takový počet optických detektorů, jako je požadovaný počet bitů roz-

lišení 1.4. Pro osmi bitové rozlišení je tedy třeba kotouč s osmi značenými drahami a osm optických detektorů. [6]



Obr. 1.4: Disk absolutního enkodéru s pěti bitovým rozlišením. [6]

## 1.2 Řízení

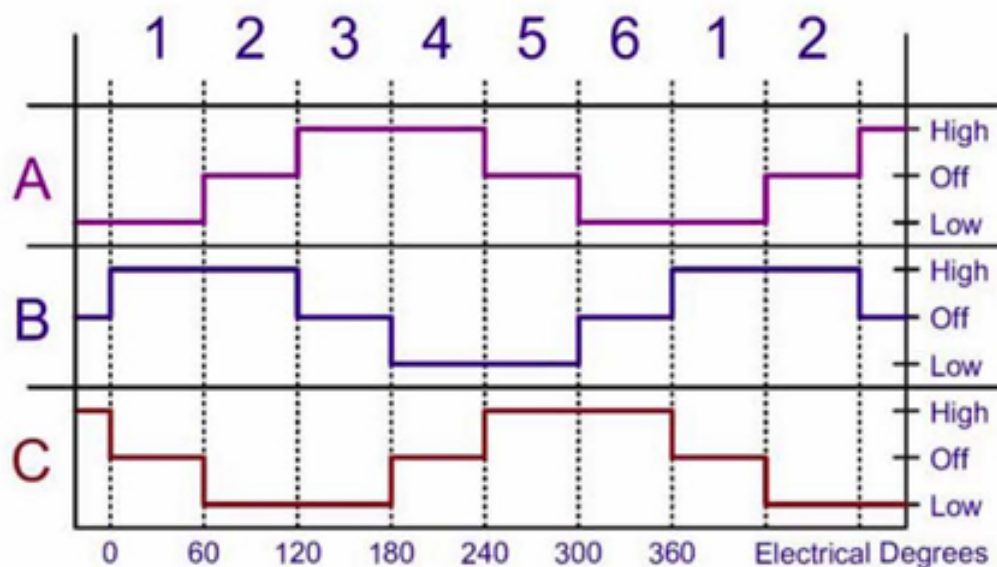
Pro správný chod motoru je nutné zajistit spínání proudu do jednotlivých cívek v závislosti na poloze rotoru. O to se stará řídicí elektronika která dostává informace ze snímačů v motoru nebo z měření indukovaného napětí na nepřipojené fázi motoru (sensorless) a podle toho spíná s PWM modulací jednotlivé tranzistory v třífázovém tranzistorovém můstku.

### 1.2.1 Six-step komutace

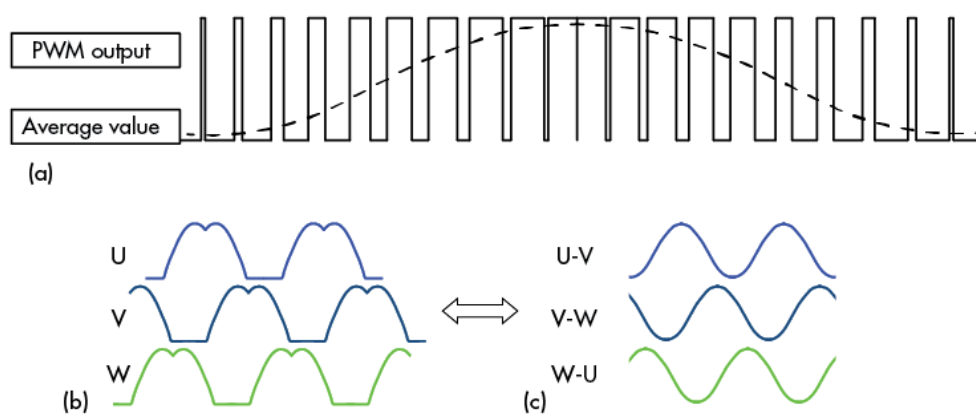
V případě six-step komutace jsou vždy k napájení připojeny dvě fáze a jedna je odpojena. Přepínání fází probíhá 6 krát za jednu elektrickou otáčku po 60 elektrických stupních. Výhodou je jednoduchost implementace. Za určitých podmínek velká strmost nárůstu proudu vyvolává mechanické kmitání cívek doprovázené nepříjemným zvukovým projevem. Spínání fází probíhá dle Obr. 1.5.

### 1.2.2 Sinusové řízení

Při sinusovém řízení je obdélníkový průběh spínání nahrazen pulzně modulovaným sinusovým průběhem. Výhodou je hladký průběh momentu, nevýhodou je větší náročnost na výpočetní výkon a zapojení měniče. Pro správné generování průběhu, je nutné znát pozici rotoru přesněji, než umožňuje snímání pomocí hallových snímačů a je nutný například resolver.



Obr. 1.5: Spínání fází six-step komutace. [7]



Obr. 1.6: Spínání fází sinusové řízení. [8]

### 1.2.3 Vektorové řízení

Při vektorovém řízení se kontrolér snaží udržovat vektor statorového magnetického pole kolmý na vektor magnetického pole rotoru, kdy je největší moment. Pro vektorové řízení je nutná znalost polohy rotoru, která udává vektor rotorového pole a kontinuální měření proudů fázemi. Vektor statorového toku pak odpovídá součtu těchto proudů. Kontrolér pak reguluje proudy všemi fázemi, tak aby byly tyto toky na sebe kolmé.



## 1.2.4 Způsoby spínání

### Unipolární/Bipolární

Týká se způsobu spínání napětí na fázi. Při bipolárním spínání je vždy k vinutí připojeno kladné nebo záporné napětí a na druhý konec je připojena opačná polarita, nulový proud vinutím tak teče při 50 % střídě. V případě unipolárního spínání je jeden konec vinutí připojen střídavě na kladné a záporné napětí a druhý konec je stále připojený na záporné.

### Komplementární/Nezávislé

Spínání tranzistorů v jedné větvi může probíhat buď komplementárně nebo nezávisle.

Při komplementárním spínání PWM je vždy zapnut horní nebo spodní tranzistor. Nevýhodou komplementárního spínání je nutnost počítat s dobou zavírání a otevírání tranzistoru, a tedy řešit mrtvé časy při spínání tranzistorů.

U nezávislého spínání PWM jedním tranzistorem je druhý po celou dobu vypnut, v tomto případě se vedení proudu účastní antiparalelní diody tranzistorů. Díky poměrně velkému úbytku napětí na těchto diodách dochází k velkým ztrátám a zahřívání.

Tab. 1.1: Porovnání variant spínání [9]

Způsob spínání	Výhody	Nevýhody
Závislé bipolární	minimálně 3 PWM výstupy nepotřebuje mrtvé časy jednoduchá implementace nižší spínací ztráty	přerušované proudy vyšší zvlnění proudu nevhodné pro měření BEMF
Závislé unipolární	minimálně 3 PWM výstupy nepotřebuje mrtvé časy jednoduchá implementace nižší spínací ztráty	nevhodné pro měření BEMF nerovnoměrné rozložení spínacích ztrát
Komplementární unipolární	dobrá dynamika motoru vhodné pro měření indukovaného napětí	nutné mrtvé časy minimálně 6 PWM výstupů vyšší spínací ztráty vyšší zvlnění proudu
Komplementární unipolární	dobrá dynamika motoru malé zvlnění proudu a momentu menší zvlnění napětí zátěže	nutné mrtvé časy minimálně 6 PWM výstupů vyšší spínací ztráty

## 2 Návrh hardware měniče pro BLDC motor

Návrh zapojení a desky plošných spojů byl proveden v návrhovém systému Eagle, v současnosti vyvíjeném společností Autodesk. Deska je členěna do tří bloků. Prvním je výkonová část s třífázovým můstkem a budiči, druhou logická část s procesorem a periferními obvody a poslední zdrojová část.

### 2.1 Výkonová část

Výkonová část je tvořena třífázovým tranzistorovým můstkem, budiči tranzistorů a snímáním proudu.

#### 2.1.1 Výkonový spínač

Pro volbu výkonového spínače je nutné určit maximální provozní parametry. Štítkové parametry použitého motoru jsou 48 V a 2 kW, což odpovídá proudu 42 A. Při dimenzování proudu spínače musíme však uvažovat přetížitelnost motoru, proto jako minimální kontinuální proud tranzistoru bylo zvoleno 80 A. Pro maximální napětí tranzistoru je důležité naopak maximální napětí zdroje. Aby bylo možné měnič provozovat z akumulátorů musí být spínače dimenzovány na jeho maximální napětí.

Akumulátory vhodné pro použití s motorem o nominálním napětí 48 V jsou buď čtyři olověné 12 V trakční akumulátory zapojené v sérii, nebo akupack založený na lithiových akumulátorech s počtem článků v sérii 13-14. Z předchozího plyne, že při použití olověných akumulátorů bude maximální napětí 56 V a lithiových 58,8 V. Dále je nutné při spínání induktivní zátěže, kterou motor je, počítat s překmitem napětí, jako minimální napětí tranzistoru tak bylo zvoleno 100 V.

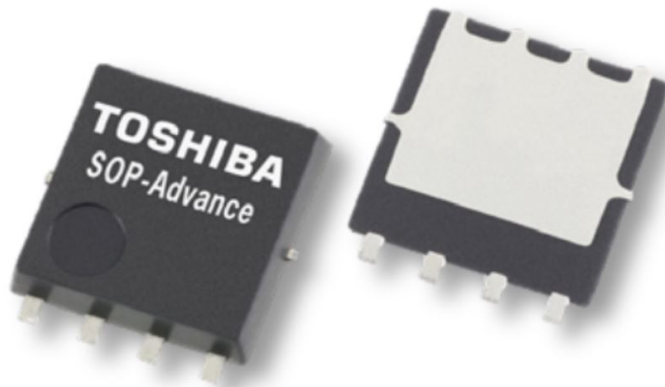
Pro tyto parametry je tedy nutné volit spínač, v současné době se jeví jako nejvhodnější použít MOS-FET. Pro užší výběr tranzistoru je stěžejním parametrem odpor v sepnutém stavu, ten se u tranzistorů na toto napětí a proud pohybuje v řádu jednotek  $m\Omega$ . Odpor v sepnutém stavu má největší vliv na výkonovou ztrátu na tranzistoru, a tedy na požadavky chlazení. Vzhledem k předpokladu provozu na akumulátor a požadavku na pasivní chlazení, je třeba minimalizovat ztráty a vybrat tranzistor s nízkým odporem v sepnutém stavu. Oproti unipolárním tranzistorům je díky kladné závislosti odporu na teplotě u unipolárních tranzistorů možné jejich paralelní řazení. Lze tedy proud rozdělit mezi více spínacích prvků a tím snížit ztráty. Další výhodou použití více paralelních tranzistorů je rozdělení výkonových

ztrát mezi více prvků, což zjednodušuje návrh chlazení. Nevýhodou je složitější návrh DPS a větší požadavky na budící obvod.

Pro tento návrh bylo po prozkoumání nabídky dodavatelů elektronických součástek zvoleno použití tří paralelních tranzistorů pro každou větev. Výhodou je možnost v budoucnu osadit nižší počet tranzistorů, například při použití s jiným motorem o nižším výkonu. Jako výkonový tranzistor byl zvolen typ TPH4R10ANL od výrobce TOSHIBA.

Parametry: [10]

- Pouzdro SOP Advance
- $U_{DS} = 100 \text{ V}$ .
- $I_D = 70 \text{ A}$ .
- $R_{DS(ON)} = 3,3 \text{ m}\Omega$ .
- $t_r = 8 \text{ mS}$ .
- $t_f = 15 \text{ mS}$ .



Obr. 2.1: Pouzdro SOP Advance [11]

Ztráty v tranzistoru jsou dvojího druhu, a to ztráty vedením a spínací ztráty. Ztráty vedením závisí na  $R_{DS(ON)}$  a protékajícím proudem.

$$P_{ON} = I^2 \cdot R_{DS(ON)} = (42/3)^2 \cdot 3.3 \cdot 10^{-3} = 0,646 \text{ W} \quad (2.1)$$

Spínací ztráty jsou způsobené přechodem tranzistoru mezi sepnutým stavem a rozepnutým, jejich hodnota závisí na spínací frekvenci  $f_{sw}$  (která je pro výpočet zvolena 20 kHz, může se však lišit dle naprogramování), na době tohoto přechodného stavu a na průběhu proudu a napětí na tranzistoru. Jejich přesný výpočet je velice složitý, lze je však alespoň odhadnout z katalogových hodnot pro dobu sepnutí  $t_r$  a rozepnutí

$t_f$ .

$$P_{SW} = U \cdot I \cdot (t_r + t_f) / 2 \cdot f_{sw} = 48 \cdot 42 \cdot (8 \cdot 10^{-9} + 15^{-9}) / 2 \cdot 20^3 = 0,155 \text{ W} \quad (2.2)$$

Celkové ztráty jsou součtem obou, tedy přibližně 0,8 W. Ve výpočtu se zanedbává to, že jeden tranzistor při provozu vede proud maximálně 2/3 času, teoretické ztráty by tedy měly být menší. Dle katalogového listu tranzistoru [10] stačí pro uchlazení 2,5 W ztrátového tepla jednovrstvá DPS o rozměru 25,4 x 25,4 mm s rozlitou mědí, pro chlazení 0,8 W by měla postačovat deska stejné velikosti i bez rozlité mědi. Ve výsledku by tedy nemělo být potřeba dalšího chlazení.

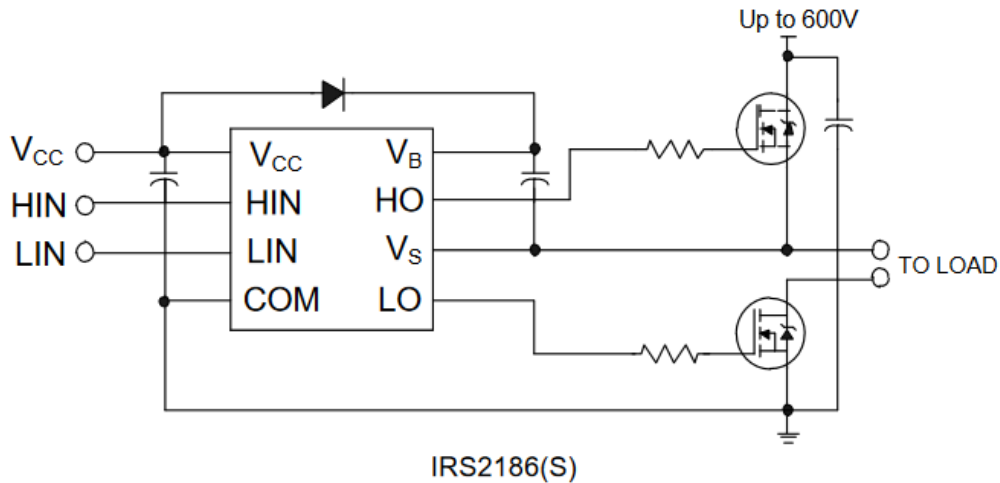
### 2.1.2 Budící obvody

Budící obvod musí dle logických vstupů sepnout a vypnout tranzistory, tj. přivést dostatečný náboj na gate tranzistoru pro jeho sepnutí, a následně odvést pro jeho vypnutí. Standardní mosfet potřebuje pro plné sepnutí dosáhnout napětí na gate vůči source mezi 10 - 20 V. Protože source dolních tranzistorů je spojen se záporným pólem, je napětí na gate vztaženo proti zápornému pólu, avšak source horních tranzistorů je plovoucí, a je tedy třeba pro spínání zajistit plovoucí zdroj napětí.

Budící obvody se dělí právě způsobem získávání tohoto napětí. Jedním způsobem je mít oddělený zdroj napětí pro každý z horních tranzistorů, tedy tři oddělené zdroje a jeden se společným záporným pólem, toto řešení má výhodu při konstrukci z diskretních součástek a možností trvalého sepnutí horního tranzistoru. Vzhledem k dostupnosti integrovaných budičů a také tomu, že v této aplikaci není nutné trvalé sepnutí horních tranzistorů, byla zvolena druhá možnost, a to použití integrovaných budičů s bootstrap kondenzátory, u tohoto typu budiče dochází k nabíjení bootstrap kondenzátoru přes diodu v době sepnutí spodního tranzistoru, a následně je pro sepnutí horního tranzistoru převeden náboj z tohoto kondenzátoru na gate horního tranzistoru. Bootstrap kondenzátor musí mít pro správnou funkci řádově vyšší kapacitu než je kapacita gate tranzistoru.

Nevýhodou je tedy nemožnost stálého sepnutí horního tranzistoru, také to že napětí na bootstrap kondenzátoru je nižší o úbytek na diodě a také o úbytek na dolním tranzistoru, to může znamenat problém při přetížení, kdy je vysoký úbytek na spodním tranzistoru a díky tomu je navíc horní tranzistor nedostatečně buzen. V tomto případě však cenová výhoda a jednoduchost řešení převažuje nad nevýhodami.

Vybrán byl obvod IRS2186 v puždře SOIC-8 od výrobce International Rectifier. Obvod pracuje s napájecím napětím 10 - 20 V a je schopen dodat pulzní proud 4 A. Logické vstupy jsou kompatibilní s 5 V i 3,3 V logikou. Na obr. 2.2 je katalogové zapojení obvodu, obvod potřebuje minimum okolních součástek.



Obr. 2.2: Katalogové zapojení budiče. [13]

Výpočet minimální kapacity bootstrap kondenzátoru pro jeden tranzistor[14]:

$$C_{boot,min} = \frac{Q_G}{V_{cc} - V_d - V_{GSmin}} = \frac{75 \cdot 10^{-9}}{12 - 0,7 - 10} = 42 \text{ nF} \quad (2.3)$$

kde

$Q_G$  - celkový náboj gate tranzistoru

$V_{cc}$  - napájecí napětí budiče

$V_d$  - úbytek napětí na diodě

$V_{GSmin}$  - minimální napětí na gate

Minimální kapacita při použití tří tranzistorů je trojnásobná tedy 126 nF. Zvolen byl keramický kondenzátor s kapacitou 470 nF. Odpor v buzení gate tranzistoru byl zvolen 10  $\Omega$ . Na napájení budiče je připojen blokovací kondenzátor 470 nF.

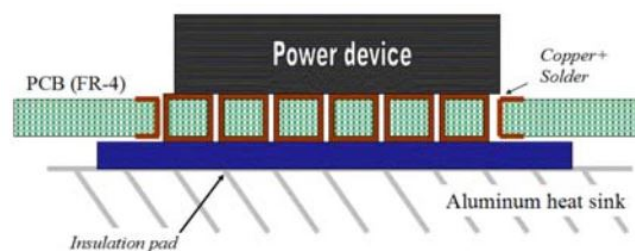
### 2.1.3 Měření proudu

Měření proudu je realizováno pomocí měření úbytku napětí na bočníku v každé větvi můstku. K zesílení napětí je použit obvod INA4181A, což je čtyřnásobný diferenciální zesilovač pro měření proudu. Vyrábí se ve čtyřech provedeních s fixním zesílením 20, 50, 100 a 200 V/V. Zde byla zvolena verze se zesílením 50. Obvod

může pracovat v zapojení pro měření proudu v jedné polaritě, kdy jeho referenční vstupy jsou uzemněny, nebo měření obou polarit proudu, kdy na jeho referenční vstup je přivedeno napětí. Velikost tohoto napětí udává posun výstupního napětí při nulovém proudu. Pro stejný rozsah měření obou polarit je toto napětí polovinou napájecího.

Pro toto použití je vhodný větší rozsah měření pro kladnou polaritu proudu než zápornou, proto bylo zvoleno referenční napětí 1,2 V. Jako zdroj tohoto napětí slouží obvod LM4041. S ohledem na požadovaný měřitelný proud 100 A, požadovaný rozsah vstupního napětí ADC převodníku a maximální výkonovou ztrátu na bočníku byl odpor bočníku zvolen 0,3 m $\Omega$ . Měřitelný rozsah je od -80 do 140 A. Výstupy zesilovače jsou přivedeny na vstupy A/D převodníku procesoru.

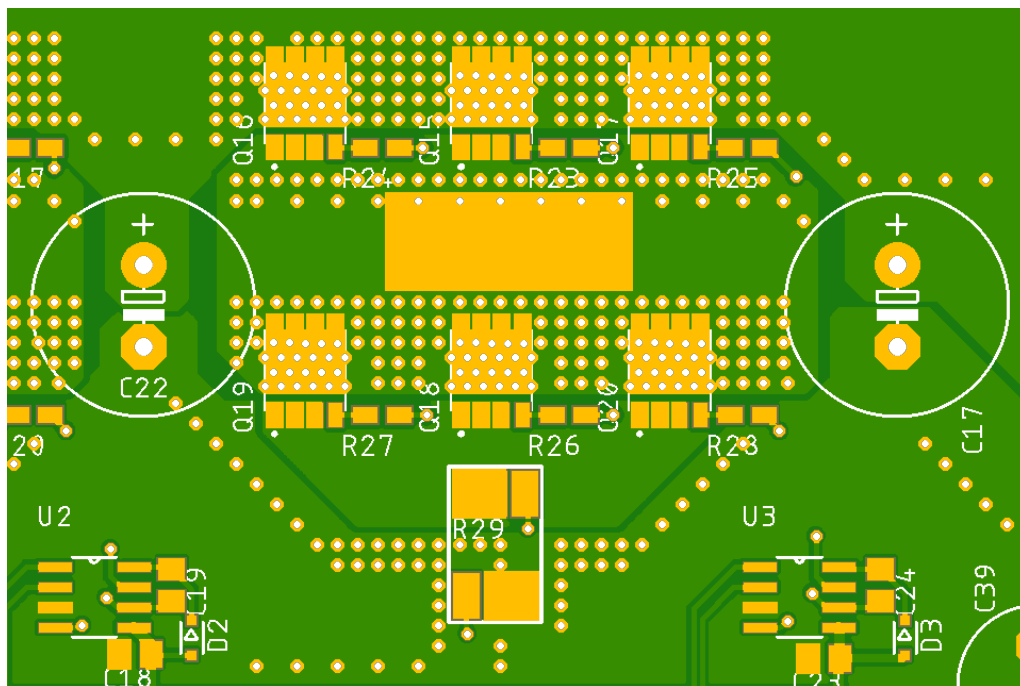
### 2.1.4 Rozložení na DPS



Obr. 2.3: Umístění chladiče. [15]

Výkonová část zabírá horní část desky. Návrh rozložení výkonové části je nejzákladnějším na celé desce i díky použití tranzistorů v pouzdře SOP Advance, u kterého odvod ztrátového tepla probíhá skrze spodní stranu tranzistoru připájenou plošně k desce plošných spojů. Tranzistory jsou umístěny do bloků vedle sebe 2.4, ke každému polomostu jedné fáze je umístěn blokový elektrolytický kondenzátor s nízkým ESR. Další blokové kondenzátory jsou umístěny u vstupních svorek akumulátoru.

Pro odvod ztrátového tepla jsou tranzistory umístěny na rozlitou plochu mědi. Teplo je zároveň prokovy umístěnými pod a v okolí tranzistorů odváděno na opačnou stranu desky, kde se nachází další plocha mědi. Pro zlepšení chlazení je možné celou desku umístit přes elektricky izolační podložku na chladič nebo například na dno hliníkové krabičky viz. obr. 2.3.



Obr. 2.4: Jedna fáze tranzistorového mostu.

U každého polomostu je bočník pro měření proudu, u kterého je použito čtyřvodičové připojení k zesilovači pro minimalizaci chyby měření přechodovými a parazitními odpory cest a pájeného spoje. Každý polomost je buzen jedním hradlovým budičem k němuž je přivedeno 12 V napájení a v jeho blízkosti se nachází blokovací kondenzátor, bootstrap kondenzátor a dioda pro jeho nabíjení.

Připojení napájecích vodičů a výstupů pro motor je řešeno pájecí plochou. Při správném připojení výstupních vodičů s velkým průřezem tak částečně napomáhají k odvodu tepla z tranzistorů.

## 2.2 Řídící část

Řídící část se skládá z procesoru a periferních obvodů.

### 2.2.1 Mikroprocesor

Mikroprocesor byl zvolen STM32F302R8 od výrobce STMicroelectronics v pouzdře LQFP-64. Je založen na 32 bitovém jádře ARM®Cortex®-M4 pracujícím na frekvenci 72 MHz. Obsahuje 64 kilobytů paměti flash a 16 kilobytů SRAM. Obsahuje rychlý dvanáctibitový A/D převodník, tři obecné 16 bitové časovače a pokročilý časovač pro generování třífázové PWM. Z komunikačních periférií obsahuje  $I^2C$ , SPI, USART, USB, CAN. Napájecí napětí je od 2 do 3,6 V. [16]

### Základní obvod MCU

Procesor má oddělené napájení pro digitální a analogovou část. Procesor vyžaduje kvalitní blokování napájení. Digitální napájení je vyvedeno na každé straně pouzdra a je nutné ke všem vývodům co nejbližše zapojit keramické blokovací kondenzátory 100 nF a dále pro všechny jeden elektrolytický kondenzátor 100  $\mu$ F. Napájení analogové části je blokováno také kombinací 100 nF a 100 $\mu$ F a od digitální je oddělena indukčností. Procesor má vstup pro zálohovací baterii, která nutně nemusí být v této aplikaci použita, ale pro případ například potřeby uchování času, ji bude možné osadit.

Procesor může běžet na interní oscilátor, který však není dostatečně přesný pro toto použití, proto je použit externí vysokofrekvenční 8 MHz oscilátor. K procesoru je též možné připojit nízkofrekvenční oscilátor 32,768 kHz, který je využíván například pro měření času. Stejně jako zálohovací baterie není nutné jeho osazení. Pro reset a nastavení zaváděcí paměti jsou vyvedeny piny boot0 a nrst na tlačítko. [17]

### 2.2.2 PWM výstupy

Procesor obsahuje pokročilý časovač TIM1 vhodný pro generování PWM. Je zde podpora komplementárních výstupů a programovatelného deadtime a další. Výstupy pro řízení tranzistorů jsou tedy řízeny tímto časovačem a budicí obvody jsou napojeny přímo na tyto piny.

### 2.2.3 Vstupy HALL snímačů

Procesor umožňuje nastavení resetu časovače TIM1 v návaznosti na vstupu jiného časovače, toho může být s výhodou využito v případě řízení dle HALL snímačů. HALL snímače jsou připojeny k časovači TIM3, při změně stavu kteréhokoliv vstupu



je resetován čítač TIM1 a jsou přenastaveny výstupy dle komutační tabulky. Vstupy pro čítač TIM1 mohou být namapovány na více pinů, z porovnání ostatních periférií využívající tyto piny, byly zvoleny piny 37, 38, 39. HALL sondy mají standardně výstup typu otevřený kolektor, proto je nutné použít pull-up rezistory. Je však také možné narazit na jiný typ snímačů, proto je obvod připraven i na logický vstup 3,3 i 5 V, záleží jen na kombinaci osazených odporů. Na vstup je také připojen filtrační kondenzátor a ochranné diody. Pro napájení snímačů je vyvedeno napětí 5 V.

#### **2.2.4 Měření proudů a napětí**

Na analogové vstupy procesoru jsou přivedeny výstupy zesilovačů pro měření proudu každou větví můstku. Dále také vstupní napětí přes odporový dělič, a nakonec pro měření napětí na jednotlivých fázích je použito zapojení, kde pomocí jednoho výstupního pinu lze přepínat mezi odporovým děličem, což je vhodné pro měření BEMF při sepnuté PWM, nebo pro potřeby měření při velmi malé periodě PWM, kdy by se nestihlo měření provést, lze přepnout do režimu, kdy je výstupní napětí připojeno přes odpor přímo k analogovému vstupu, a lze tak měřit velmi malé napětí a dle toho řídit komutaci.

#### **2.2.5 Externí vstupy**

Jsou zde tři analogové vstupy osazené děličem pro rozsah 0 - 5 V, což odpovídá standardnímu příslušenství pro elektrokola jako je plynová rukojeť, brzdové páčky apod. Dále jsou zde dva digitální vstupy například pro ovládací tlačítka. Všechny analogové vstupy lze nakonfigurovat i jako digitální, a také je lze použít pro řízení pomocí PWM signálu například z modelářského RC přijímače. Všechny vstupy jsou vyvedeny na jednotlivé konektory, na které je přivedeno také 5 V a zem. Pořadí vývodů odpovídá tomu používanému RC modelářským vybavením, výhodou je imunita vůči opačnému zapojení. Pořadí pinů je GND - 5 V - signál. V případě potřeby lze osadit pouze horní odpor děliče nižší hodnotou odporu a pin použít jako výstup pro řízení RC serva, které má vstup signálu TTL kompatibilní.

#### **2.2.6 Silové výstupy**

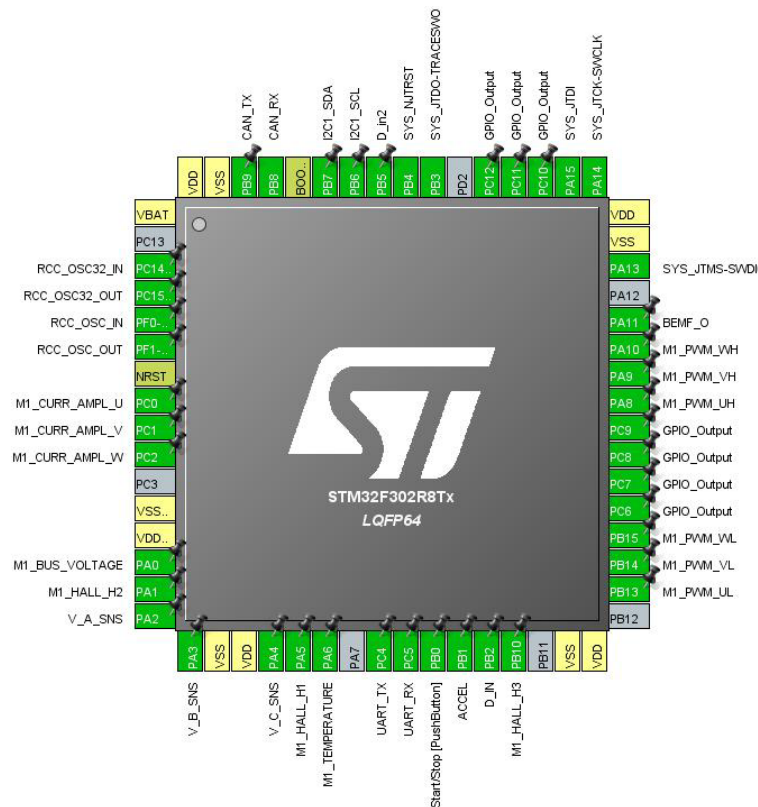
Pro spínání externích zařízení, například světel, spínacích relé apod. slouží obvod ULN2003AD v pouzdře SOIC-16, což je sedminásobné tranzistorové pole schopné spínat proud až 500 mA. Dva výstupy jsou použity pro spínání LED diod a zbylých pět je vyvedeno na konektor.

## 2.2.7 Sběrnice CAN

Pro komunikaci s jinými moduly je přítomna sběrnice CAN - Controller area network. V budoucnu je předpokládáno použití oddělené jednotky pro řízení a zobrazování informací, s touto jednotkou bude probíhat komunikace právě po sběrnici CAN. Procesor obsahuje sběrnici CAN v logických úrovních a pro její použití je nutný externí řadič. Zvolen byl obvod PCA82C250.

## 2.2.8 Rozložení na DPS

Mapování pinů procesoru bylo provedeno pomocí nástroje STM32CubeMX, ve kterém se provede nastavení všech periférií. Pomocí tohoto nástroje se též vygeneruje základní kód pro inicializaci procesoru. Mapování pinů je na obrázku 2.5.



Obr. 2.5: Mapování pinů v STM32CubeMX.

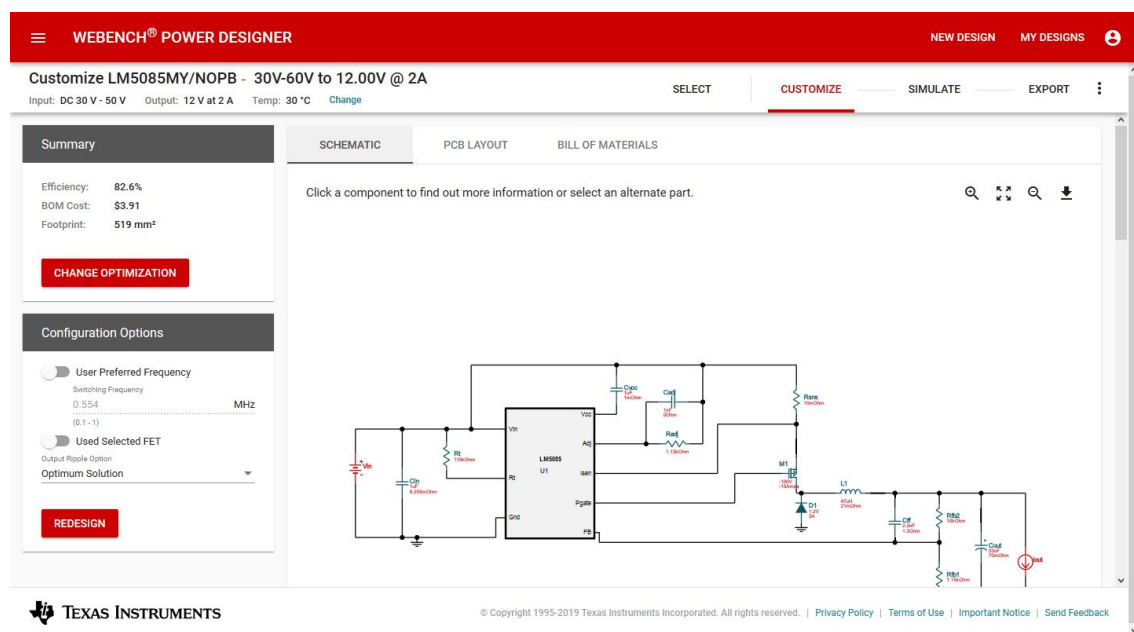
## 2.3 Zdroje

V obvodu je třeba několik napěťových hladin, pro hradlové budiče je třeba 10 - 20 V, pro napájení CAN řadiče, stejně jako pro HALL sondy atd. je třeba 5 V, pro sa-

motný procesor a zesilovač pro měření proudu je třeba 3,3 V. Byla zvoleno sériové řazení zdrojů.

Jako první stupeň je spínaný snižující měnič z 30-60 V na 12 V. Je použit integrovaný obvod snižujícího měniče LM5085MY s externím mosfetem. Tento obvod byl zvolen s ohledem na jeho maximální vstupní napětí až 75 V. Měnič je schopný dodat až 1,5 A. Výstup tohoto zdroje lze použít pro napájení externího příslušenství, proto je dimenzován s dostatečnou rezervou. Dalším stupněm je spínaný snižující měnič z 12 V na 5V. Pro tento zdroj byl zvolen obvod TPS561208, jež má integrovaný mosfet a je schopen dodat výstupní proud až 1 A. Jako poslední stupeň snižující napětí z 5 V na 3,3 V slouží lineární stabilizátor napětí UA78M33 s výstupním proudem maximálně 500 mA.

Oba spínané zdroje byly zvoleny a navrhnuty v prostředí WEBENCH®Power designer od Texas Instruments 2.6. Jedná se o on-line nástroj pro návrh spínaných zdrojů s řídicími obvody od firmy Texas Instruments. Dle zadaných parametrů požadovaného zdroje, jako je vstupní napětí, výstupní napětí a proud, vyhledá dostupné alternativy z nabídky a navrhne zapojení. Toto zapojení lze dále upravovat a měnit jeho parametry. Nástroj nabídne i doporučený layout desky vhodný jako inspirace.

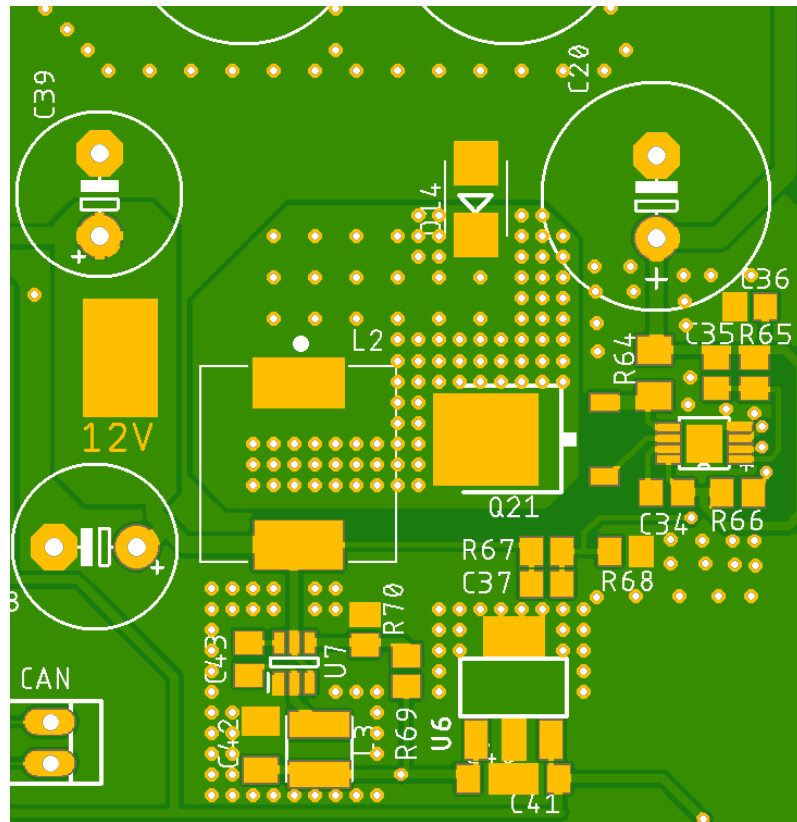


Obr. 2.6: WEBENCH®Power designer

### 2.3.1 Rozložení na DPS

Zdroje jsou umístěny v pravé části desky blízko terminálům akumulátoru. Součástky vyžadující chlazení jsou umístěny na měděných polygonech s prokovey na opačnou

stranu desky. Výstup 12V zdroje je vyveden na pájitelné plochy pro případné připojení příslušenství.



Obr. 2.7: Rozložení zdrojové části na DPS.

## 3 Návrh firmware měniče

Pro návrh firmware bylo využito dostupných nástrojů od STMicroelectronics. Konkrétně STM32CubeMX, což je grafický nástroj pro konfiguraci a generování inicializačního kódu microprocesorů STM32. Dále STM32 Motor Control Software Development Kit (MCSDK) ve verzi 5.3.3 což je soubor nástrojů a knihoven pro vektorové řízení motorů. Jako vývojové prostředí (IDE) posloužilo Atollic TrueSTUDIO. Pro nahrání firmware do procesoru a debugování bylo použito STMstudio.

### 3.1 Testovací firmware

Pro otestování funkce měniče byl naprogramován firmware pro six-step komutaci řízenou HALL snímači. Prvním krokem při návrhu firmware bylo mapování pinů a konfigurace periférií v programu STM32CubeMX. Zde se nastavuje použitý zdroj hodinového signálu, v tomto případě externí krystal. Dále nastavení časovačů TIM1 a TIM2. TIM1 je použit pro generování PWM na šesti výstupních pinech, pro každou fázi dva řízené komplementárně. Zde se také nastavuje polarita výstupů, frekvence PWM a deadtime. Pro časovač TIM2, na jehož vstupy je přiveden signál z HALL sond, se zde nastavuje vyvolání přerušení při každé změně stavu vstupů, kterým se poté řídí komutace výstupů TIM1. S veškerými potřebnými nastaveními byl vygenerován základní kód programu.

Samotný program byl psán ve vývojovém prostředí Atollic TrueSTUDIO. Základem je nastavování časovače TIM1. Ve stínových registrech časovače je nastavena konfigurace PWM výstupů pro následující komutační krok a při každém vyvolání přerušení časovačem TIM2 dojde k použití této konfigurace. Následuje čtení stavu HALL sond a přenastavení těchto registru dle komutační tabulky pro příští krok. Střída PWM je nastavována v hlavním programu. V testovacím firmware nebylo řešeno uživatelské rozhraní a nastavování proměnné udávající střídu bylo prováděno pomocí debuggeru.

Pro finální použití měniče je třeba firmware doplnit měření proudu, čtení vstupů a ovládání ostatních možností, které hardware umožňuje. Nastavit nadproudovou a teplotní ochranu. Podle způsobu použití pak vyřešit regulátor střídy buď pro momentovou či otáčkovou regulaci.

## 3.2 ST Motor Control Workbench

V případě požadavku na vektorové řízení lze využít nástroj ST Motor Control Workbench, terý podporuje vývojové kity NUCLEO prodávané firmou STMicroelectronics a měniče navrhnuté s použitím mikroprocesorů STM32. Program je nutné nastavit dle použitého hardware a to typ procesoru, mapování pinů a dále se nastavují parametry spínacího můstku, měření proudu a další.

### 3.2.1 Nastavení parametrů motoru

Pro správnou funkci vektorového řízení je třeba nastavit parametry motoru a to jmenovitě:

- Vnější / vnitřní rotor
- Počet pólů
- Maximální otáčky
- Nominální napětí
- Nominální proud
- Odpor vinutí
- Indukčnost vinutí
- Poměr indukčnosti vinutí (Tento parametr se nastavuje pouze u motorů s vnitřním rotorem u kterých závisí indukčnost na poloze rotoru.)
- Konstrukční konstantu motoru

Tyto parametry lze zjistit z katalogu, měřením či použitím programu Motor Profiler obsaženém v balíčku. Motor Profiler funguje na principu otestování motoru samotným měničem. Tento program však funguje pouze s danými konfiguracemi HW tzn. pouze s prodávanými kity a tedy nelze ho v tomto případě použít. Zbývají tedy pouze první dvě možnosti. Dalším nastavením je způsob snímání polohy, program podporuje jak bez-senzorové, na základě měření proudu, tak senzorové snímání polohy a to Hall sondami nebo enkodérem.

## 4 Praktická realizace a oživení

Vzhledem k pouzdru použitých tranzistorů probíhalo osazování horkovzdušnou pájecí stanicí za pomoci předeřevu desky. Osazení ostatních komponent již probíhalo standardně.

Nejdříve byla osazena a oživena zdrojová část. Do zpětné vazby spínaných zdrojů byly nejprve osazeny odpory z řady s nejbližší hodnotou odporu a následně přidáním dalších rezistorů paralelně k nim doladěno výstupní napětí. U zdroje 12 V bylo nastaveno mírně vyšší napětí pro napájení budičů a také v případě použití externích zařízení je nejpravděpodobnější že se bude jednat o automobilové spotřebiče a příslušenství a tedy dimenzované spíše na provoz při napětí kolem 14 V.

Po zkontrolování funkčnosti zdrojů byl osazen zbytek součástek. A otestována funkčnost spojení mikroprocesoru s programátorem ST-LINK. Pro další testování byl nahrán testovací firmware. Pomocí manuálního nastavení spínání jednotlivých fází byla vytvořena komutační tabulka. Nastavením malé střídy nebo připojením na zem daných kombinací výstupů se rotor motoru nastaví do polohy při které je odečten stav HALL sond. Postupně se provede test pro všech 6 kombinací a přiřadí se jím požadovaný výstup. Takto vytvořená komutační tabulka byla nastavena v programu. Po spuštění programu a nastavení střídy se již motor točil.

Měřením byl zjištěn problém s rušením vstupu HALL sond kdy docházelo k chybným čtením stavu. Problém byl vyřešen změnou hodnoty pull-up rezistoru za nižší a zvětšením filtračního kondenzátoru. Rušení bylo pravděpodobně způsobeno dlouhými vodiči od snímačů a příliš malou vstupní impedancí.

Testován byl i firmware pro vektorové řízení vytvořený pomocí STM MotorControl Workbench, se kterým se však zatím nepodařilo motor řídit. Při testech docházelo k příliš velkým proudovým špičkám, při kterých docházelo k poklesu napětí použitého laboratorního zdroje a k vybavení podpěťové ochrany. Vznik těchto špiček lze přičíst nesprávné konfiguraci firmware a parametrů motoru. Vzhledem ke složitosti debugování takto složitého firmware nebylo nakonec toto řešení použito. Počítá se však s možností jeho použití v budoucnu.

## 5 Testování a měření

Jako zdroj napětí sloužil při měření laboratorní zdroj, měření probíhalo při sníženém napětí 20-30 V. Maximální proud zdroje 5 A. Měření proudu fází probíhalo indukční sondou. Snímek pracoviště 5.2. Na obrázku 5.3 jsou zaznamenány stavy HALL sond a korespondující proud první fáze. Při měření měl motor mírně nepravidelný chod. Z průběhu proudu je vidět nesymetričnost, která nepravidelný chod pravděpodobně způsobovala, ovšem z průběhu výstupů snímačů je patrné, že měnič spíná fáze přesně dle jejich stavu. Problém tedy je nejspíše v použitém motoru, kdy výstup sond není správně zarovnan s úhlem natočení rotoru. Na průběhu proudu je to patrné též na zvýšeném proudu těsně před komutací.

Na obrázku 5.4 je průběh napětí (na 5.5 je detailní pohled na toto napětí) a proudu první fáze. Střída zde je přibližně 5 %. Na 5.6 je průběh napětí při střídě 20%. Zajímavý je průběh indukovaného napětí v momentě, kdy je fáze neaktivní, takto zvlněný průběh by pravděpodobně byl problém při bezsenzorovém řízení z důvodu nepřesné (vícenásobné) detekce průchodu nulou. Detail na obrázku 5.8 To mohlo být důvodem problémů při testování s firmwarem pro vektorové řízení.

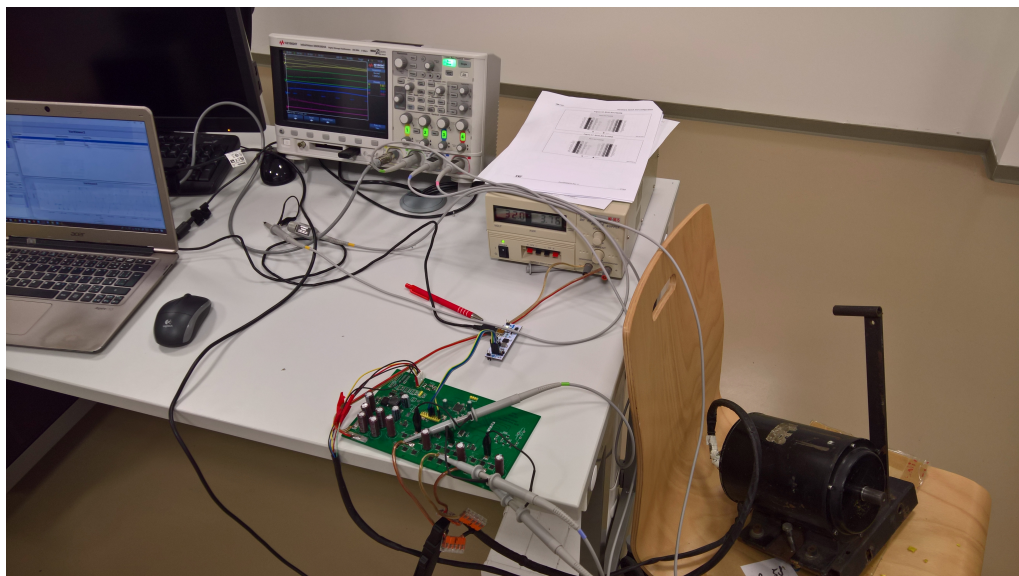
Na dalším obrázku lze vidět magnetizační proud, který po komutaci teče přes rekuperační diodu horního tranzistoru zpět do stejnosměrného obvodu.

Na obrázku 5.10 a 5.11 jsou změřené průběhy na gate dolního a horního tranzistoru. Buzení tranzistorů je v pořádku, pouze na gate horního tranzistoru jsou vidět zázněje, na funkci by však neměli mít vliv.

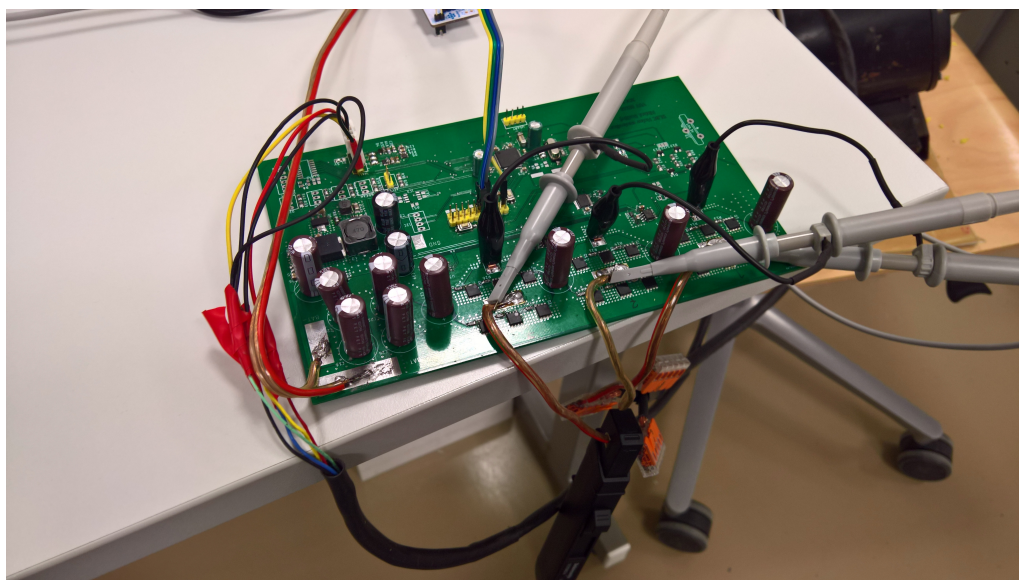
Na obrázku 5.12 a 5.12 jsou naměřené průběhy napětí všech fází. Na prvním obrázku při střídě 10 % a napětí 20 V. Na druhém obrázku při zvýšeném napětí 30 V a střídě 90 %. Zde je znovu patrná nesymetričnost spínání, kdy jednotlivé kroky trvají rozdílný čas, opět způsobené špatnými senzory na motoru. Při tomto stavu běžel motor delší dobu, přibližně půl hodiny. Za tuto dobu nedošlo k citelnému oteplení žádné části měniče.

V průběhu měření byl motor průběžně mírně zatěžován a sledovány reakce. Většího zatížení motoru nebylo možno dosáhnout, protože na hřídel motoru nebyla možnost připojení brzdného dynamometru ani jiné zátěže. Další omezení představoval použitý zdroj, v případě většího zatížení by byl třeba větší výkon zdroje.

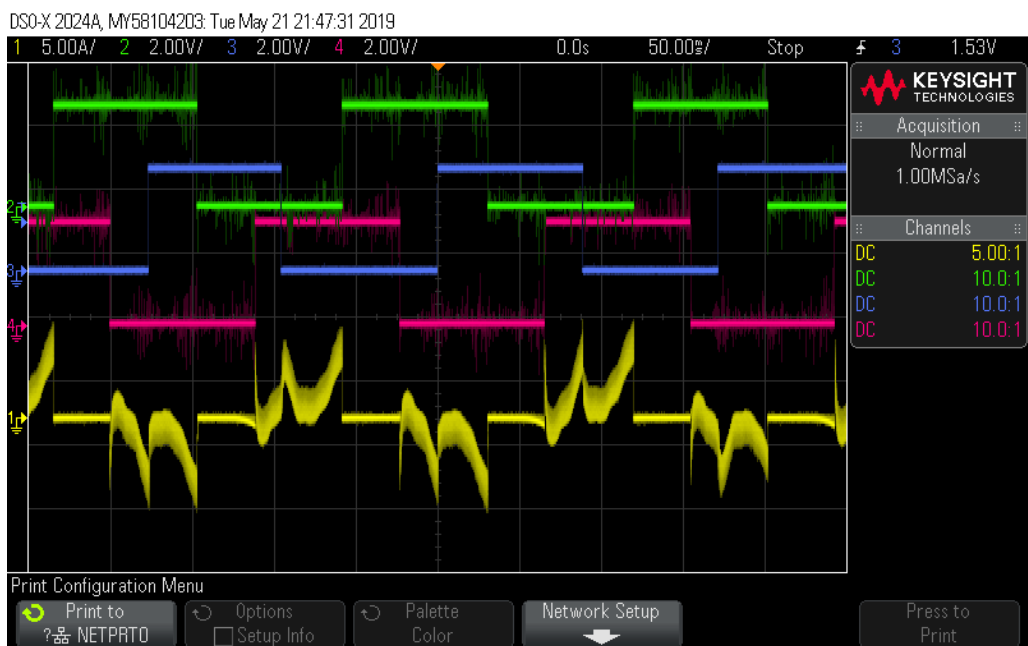




Obr. 5.1: Měřicí pracoviště.



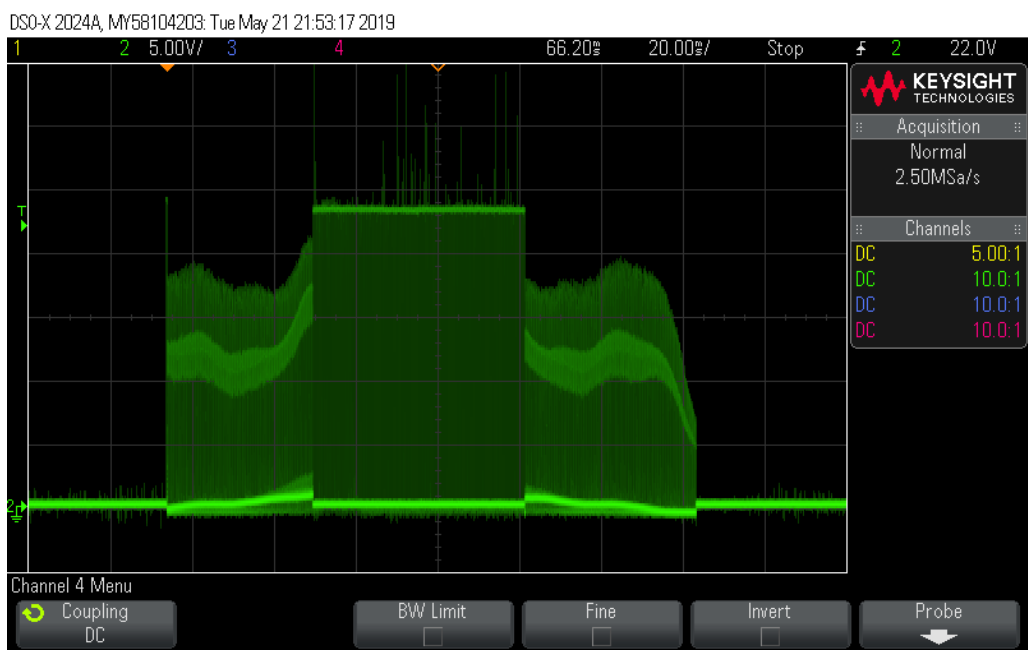
Obr. 5.2: Detailní pohled na připojení měřících sond.



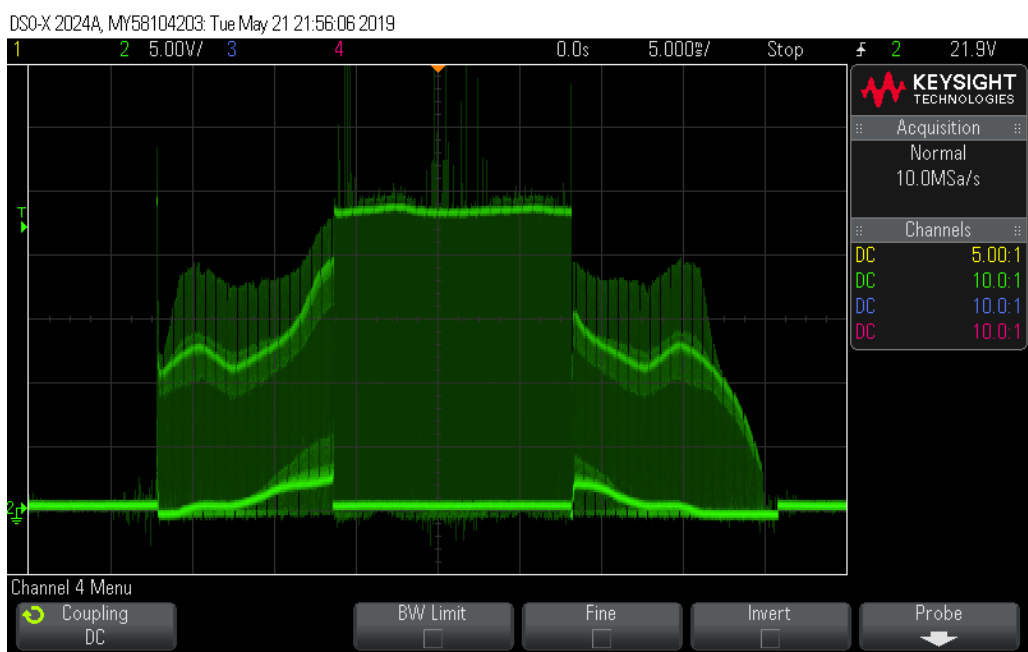
Obr. 5.3: CH1: Proud první fáze; CH2,CH3,CH4: Výstupy HALL sond.



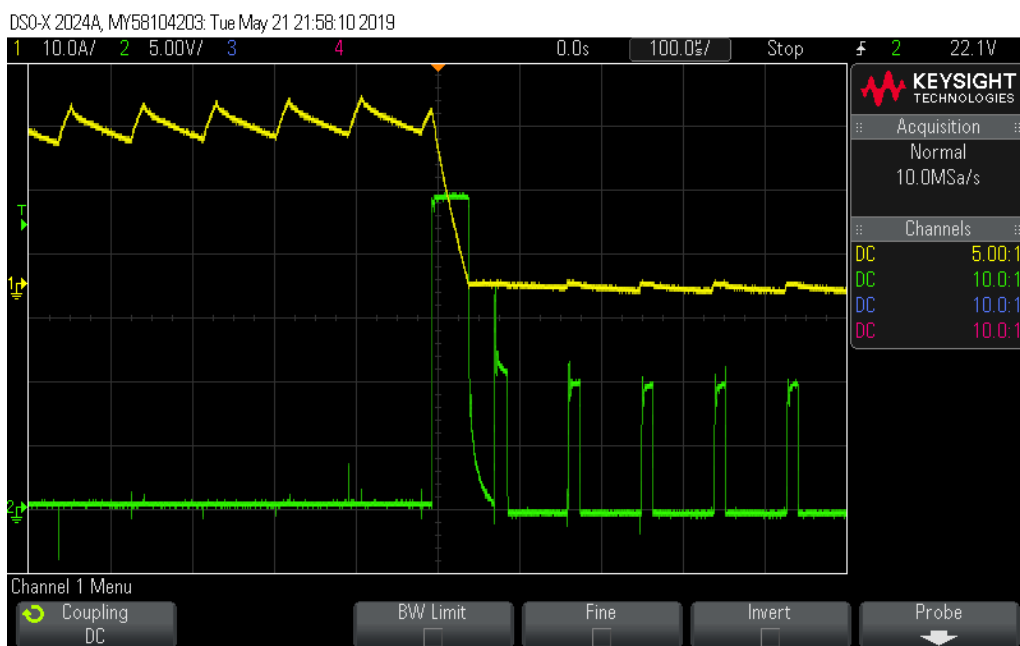
Obr. 5.4: CH1: Proud první fáze; CH2: Napětí na první fázi; CH3,CH4: Výstupy HALL sond.



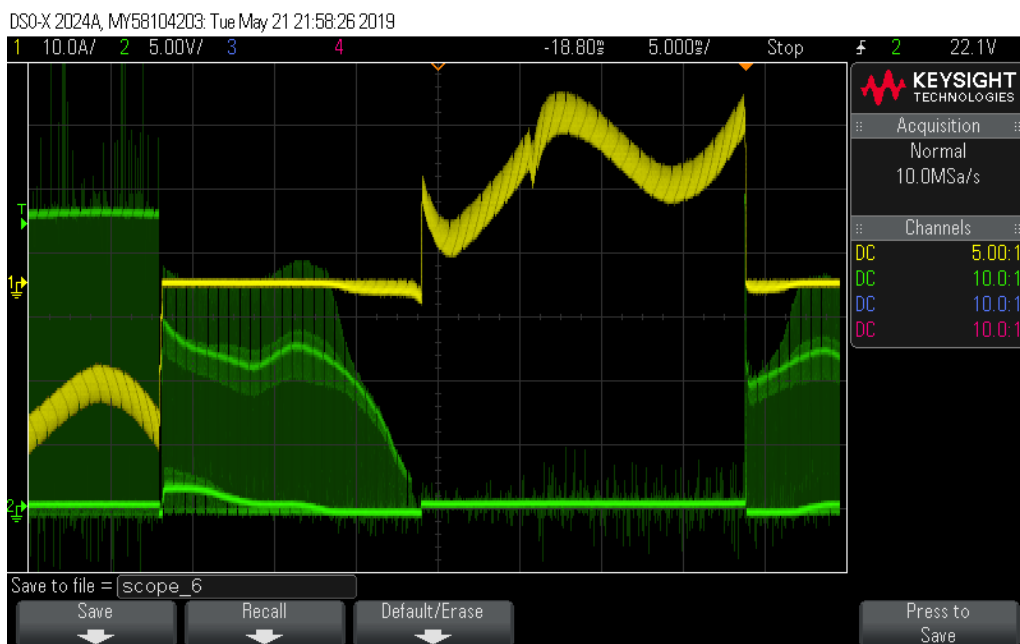
Obr. 5.5: CH1: Napětí na první fázi (střída 5%).



Obr. 5.6: Napětí na první fázi (střída 20%).



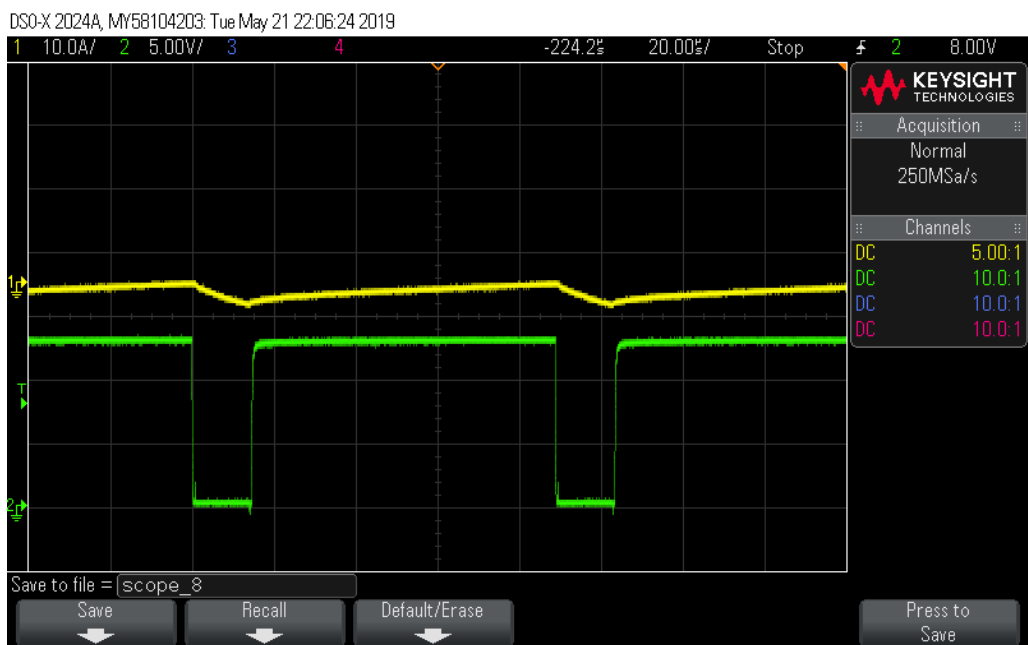
Obr. 5.7: CH1: Proud první fáze; CH2: Napětí na první fázi.



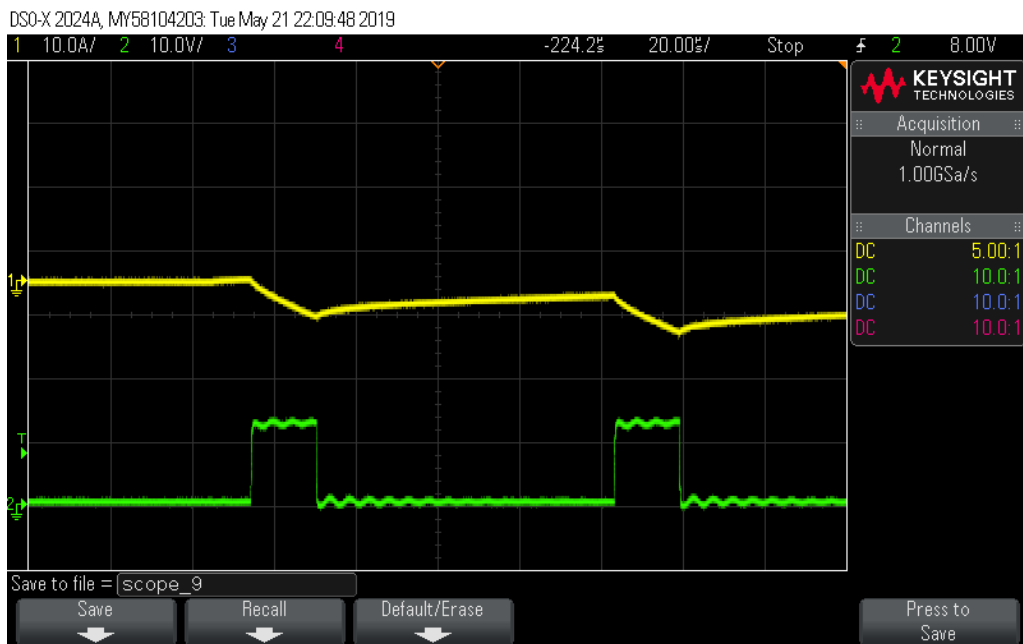
Obr. 5.8: CH1: Proud první fáze; CH2: Napětí na první fázi.



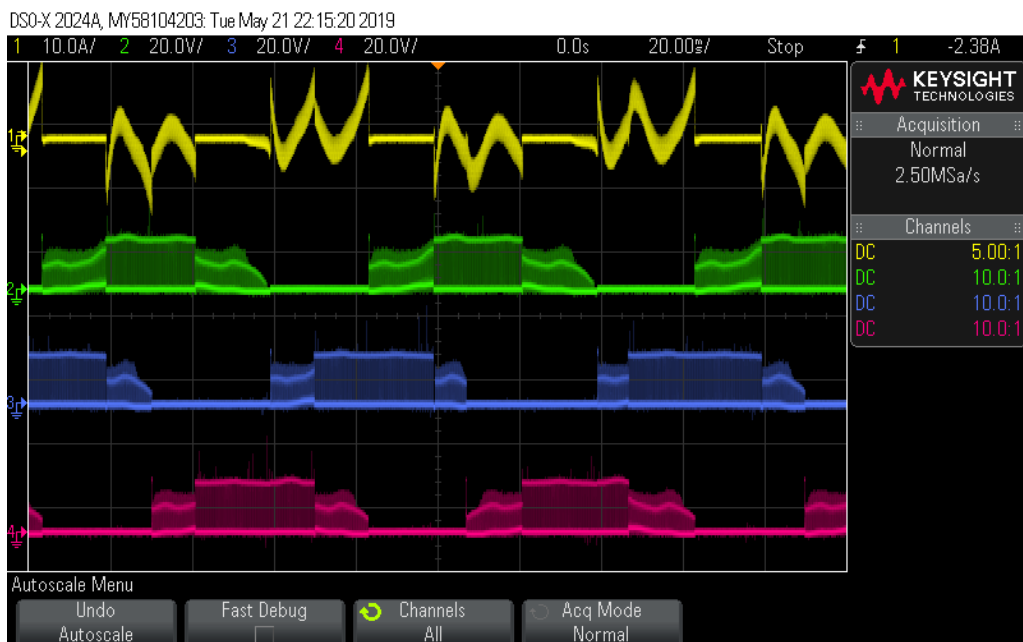
Obr. 5.9: CH1: Proud první fáze; CH2: Napětí na první fázi.



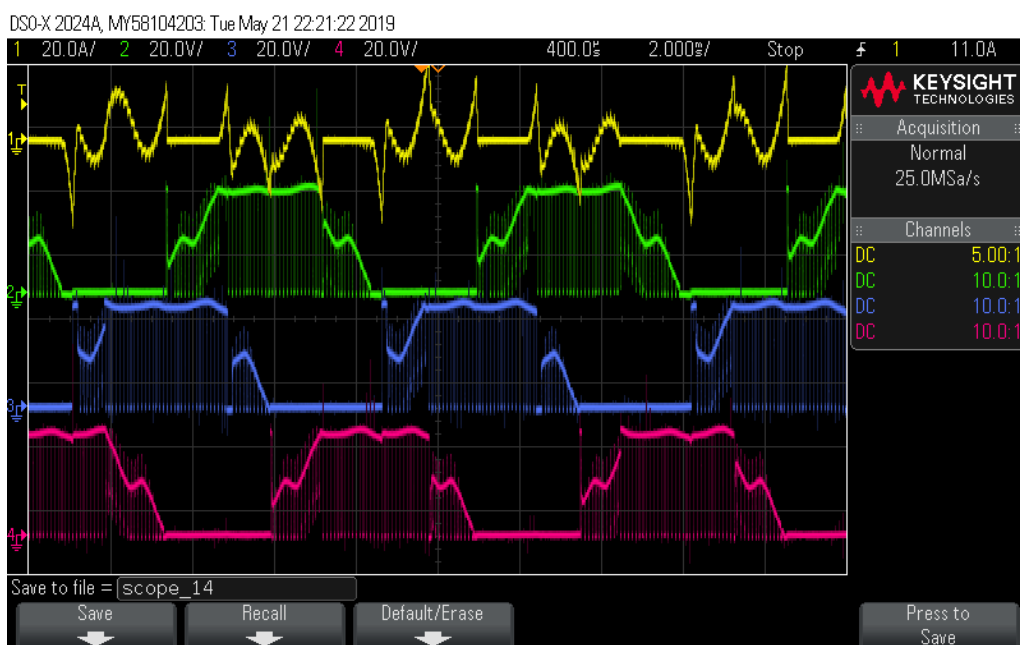
Obr. 5.10: CH1: Proud první fáze; CH2: Napětí na gate dolního tranzistoru první fáze.



Obr. 5.11: CH1: Proud první fáze; CH2: Napětí na gate horního tranzistoru první fáze.



Obr. 5.12: CH1: Proud jedné fáze, CH2,CH3,CH4: Napětí na jednotlivých fázích.



Obr. 5.13: CH1: Proud jedné fáze, CH2,CH3,CH4: Napětí na jednotlivých fázích.

## 6 Závěr

V rámci bakalářské práce bylo zpracováno krátké seznámení s konstrukcí a řízením BLDC motorů. Zmíněny byly způsoby snímání polohy, následné možnosti řízení motoru a způsoby spínání tranzistorů.

Dále je v práci diskutován výběr komponent silové a řídicí části měniče pro BLDC motor o výkonu 2 kW při nominálním napětí 48 V.

V silové části se jedná o výběr spínacího prvku - tranzistoru. Zvolen byl tranzistor typu MOS-FET. K němu byl vybrán vhodný budicí obvod. Zvolen byl způsob měření proudu bočnickem a k němu příslušný zesilovač.

V řídicí části měniče byl zvolen vhodný procesor od firmy STMicroelectronics a to STM32F302R8. Pro tento procesor byly navrženy periferní obvody, vhodně přiřazené vstupy a výstupy k pinům procesoru v návaznosti na vnitřní periferie. Byla navržena zdrojová část pro napájení veškerých částí ze vstupního napětí. Jsou zde dva spínané zdroje, první ze vstupního napájení na 12 V a druhý z 12 V na 5 V. Napětí 3,3 V je získáno lineárním stabilizátorem.

Z těchto prvků bylo navrženo schéma měniče podporující senzorové řízení pomocí HALL sond i bezsenzorové řízení. Měnič obsahuje možnost připojení dalších částí pomocí sběrnice CAN. Další rozšíření je možné pomocí rozhraní SPI a USART. K měniči lze připojit množství řídicích vstupů a silových výstupů.

Další částí práce byl návrh DPS měniče. Navržená deska je oboustraná o rozměru 200x120 mm. Návrh je řešen s SMD tranzistory a o odvod tepla se stará samotná DPS a měděné plochy s prokvy pod tranzistory. Díky použití paralelní kombinace tří tranzistoru s velmi malým odporem v sepnutém stavu, by zařízení mělo pracovat bez dalšího chazení.

Pro otestování byl naprogramován testovací firmware pro řízení motoru pomocí six-step komutace podle HALL snímačů. Funkce měniče byla ověřena a bylo provedeno základní měření. Při měření byl zjištěn problém se snímači v použitém motoru, kdy signál jednoho snímače byl úhlově posunutý oproti správnému umístění. Komutace tedy neprobíhala ve správný moment. Výsledkem byl neklidný chod motoru, funkce měniče však byla správná. U použitého motoru bylo zajímavostí i nestandardní průběh indukovaného napětí, díky kterému by byl pravděpodobně problém i při bezsenzorovém řízení.



## Literatura

- [1] *The basics of electric power: Brushless motors [online]. [cit. 2017-12-07]. Dostupné z: <<http://www.rclab.info/2014/01/the-basics-of-electric-power-brushless.html>>*
- [2] *AN4220 Application note [online]. In: , Dennis. 2013 [cit. 2018-11-28]. Dostupné z: <[https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application\\_note/26/42/24/a5/f4/7c/4b/90/DM00072008.pdf/files/DM00072008.pdf/jcr:content/translations/en.DM00072008.pdf](https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application_note/26/42/24/a5/f4/7c/4b/90/DM00072008.pdf/files/DM00072008.pdf/jcr:content/translations/en.DM00072008.pdf)>*
- [3] *RAJNE, Milan. Have you considered using back-emf observers for sensorless speed estimation? [cit. 2018-12-20]. Dostupné z: <[https://e2e.ti.com/blogs\\_/b/motordrivecontrol/archive/2014/03/14/have-you-considered-using-back-emf-observers-for-sensor-less-speed-estimat](https://e2e.ti.com/blogs_/b/motordrivecontrol/archive/2014/03/14/have-you-considered-using-back-emf-observers-for-sensor-less-speed-estimat)>*
- [4] *Maheboobmiya, Saiyad a Mehta, Hitesh. (2013). Bidirectional speed control of PMBLDC motor - A Hardware Implementation.*
- [5] *LEPKA, Jaroslav a Pavel GRASBLUM. Použití mikroprocesorů pro řízení pohonů s BLDC motory [online]. , 72 [cit. 2017-12-15]. Dostupné z: <[http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura\\_09\\_1111.pdf](http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_09_1111.pdf)>*
- [6] *VOJÁČEK, Antonín. Rotační enkodéry pro řízení pohonů a pohybu. [online]. [cit. 2017-12-15]. Dostupné z: <<https://automatizace.hw.cz/rotacni-ekodery-pro-rizeni-pohonu-a-pohybu.html>>*
- [7] *SWANSON, David a Kurt PERSKI. Designing a MCU-driven permanent magnet BLDC motor controller: Part 1 [online]. [cit. 2017-12-15]. Dostupné z: <<https://www.embedded.com/design/mcus-processors-and-socs/4007628/2/Designing-a-MCU-driven-permanent-magnet-BLDC-motor-controller-Part-1>>*
- [8] *Texas Instruments DRV10983-Q1 Automotive, Three-Phase, Sensorless BLDC Motor Driver [cit. 2018-12-20]. Dostupné z: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv10983-q1.pdf>>*
- [9] *OTRUBA, Jiří. Implementace řízení BLDC motoru. Plzeň, 2015. Diplomová práce. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI.*

- [10] *datasheet TPH4R10ANL [online]*, 2016 [cit. 2019-4-20]. Dostupné z: [https://www.glyn.de/data/media/doc/Toshiba\\_GLYN\\_FAB\\_LV\\_Mosfets\\_201604.pdf](https://www.glyn.de/data/media/doc/Toshiba_GLYN_FAB_LV_Mosfets_201604.pdf) >
- [11] *Toshiba GLYN LV Mosfets [online]*, 2016 [cit. 2019-4-20]. Dostupné z: [https://cz.mouser.com/datasheet/2/408/TPH4R10ANL\\_datasheet\\_en\\_20161212-1114606.pdf](https://cz.mouser.com/datasheet/2/408/TPH4R10ANL_datasheet_en_20161212-1114606.pdf) >
- [12] *Hints and Tips for Thermal Design for Discrete Semiconductor Devices [online]*. [cit. 2019-4-20]. Dostupné z: <https://toshiba.semicon-storage.com/info/docget.jsp?did=59467> >
- [13] *Datasheet IRS2186pbf [online]*. [cit. 2018-12-20]. Dostupné z: <https://www.infineon.com/dgdl/irs2186pbf.pdf?fileId=5546d462533600a40153567716c427ed> >
- [14] A. Merello, A. Rugginenti and M. Grasso, *International Rectifier. Using Monolithic High Voltage Gate Drivers [online]*. [cit. 2018-12-20]. Dostupné z: [https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-Using\\_Monolithic\\_Voltage\\_Gate\\_Drivers-UM-v01\\_00-EN.pdf?fileId=5546d462584d1d4a01585242c11947b1](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-Using_Monolithic_Voltage_Gate_Drivers-UM-v01_00-EN.pdf?fileId=5546d462584d1d4a01585242c11947b1) >
- [15] FRAIVILLING, Jim. *SURFACE-MOUNTING OF POWER DEVICES TO ALUMINUM HEAT SINKS [online]*. [cit. 2019-4-20]. Dostupné z: [http://www.fraivillig.com/files/smta.panpac.paper\\_\\_\\_powersite.technology.4\\_2.pdf](http://www.fraivillig.com/files/smta.panpac.paper___powersite.technology.4_2.pdf) >
- [16] *STM32F302x6 STM32F302x8 datasheet [online]*. [cit. 2019-4-20]. Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f302r8.pdf> >
- [17] *RM0365 Reference manual Rev 71/10801 [online]*. [cit. 2019-4-20]. Dostupné z: [https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/reference\\_manual/16/bf/04/cd/f6/25/44/a7/DM00094349.pdf/files/DM00094349.pdf/jcr:content/translations/en.DM00094349.pdf](https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/reference_manual/16/bf/04/cd/f6/25/44/a7/DM00094349.pdf/files/DM00094349.pdf/jcr:content/translations/en.DM00094349.pdf) >

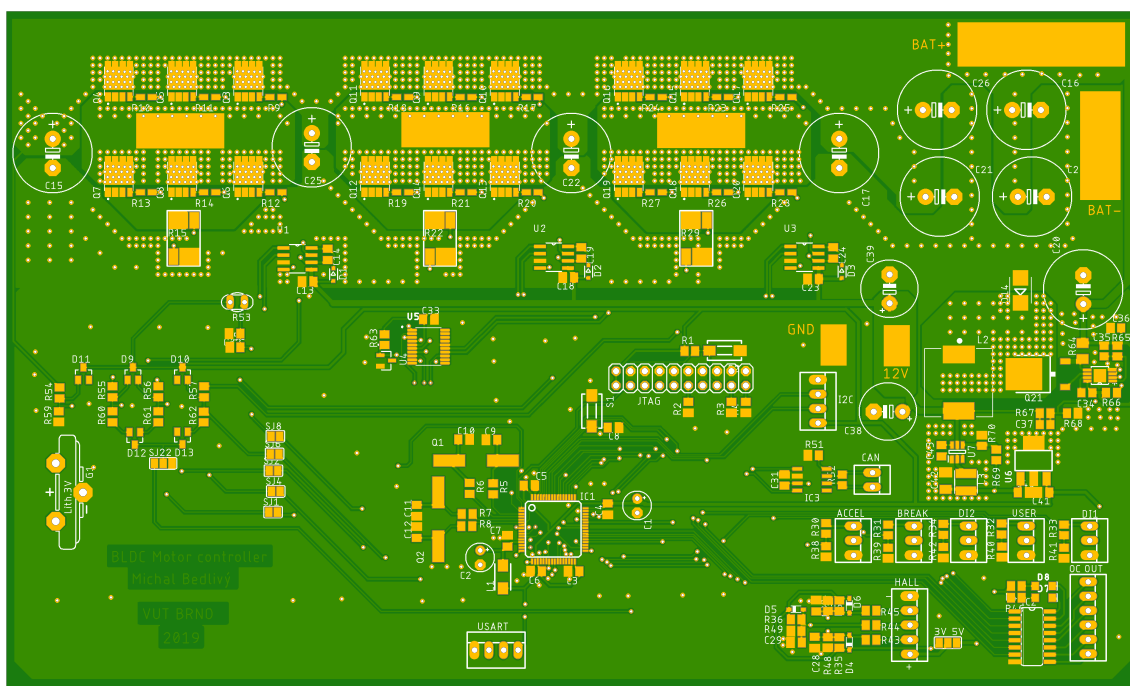
## Seznam symbolů, veličin a zkratk

<b>BLDC</b>	Stejnoseměrný elektronicky komutovaný – Brushless direct current
<b>PWM</b>	Pulzně šířková modulace – Puls width modulation
<b>BEMF</b>	Zpětné elektromotorické napětí – Back electromotoric force
<b>MOS-FET</b>	Unipolární tranzistor – Metal oxid semiconductor - field effect transistor
<b>DPS</b>	Deska plošných spojů
<b>ESR</b>	Ekvivalentní sériový odpor – Equivalent series resistance

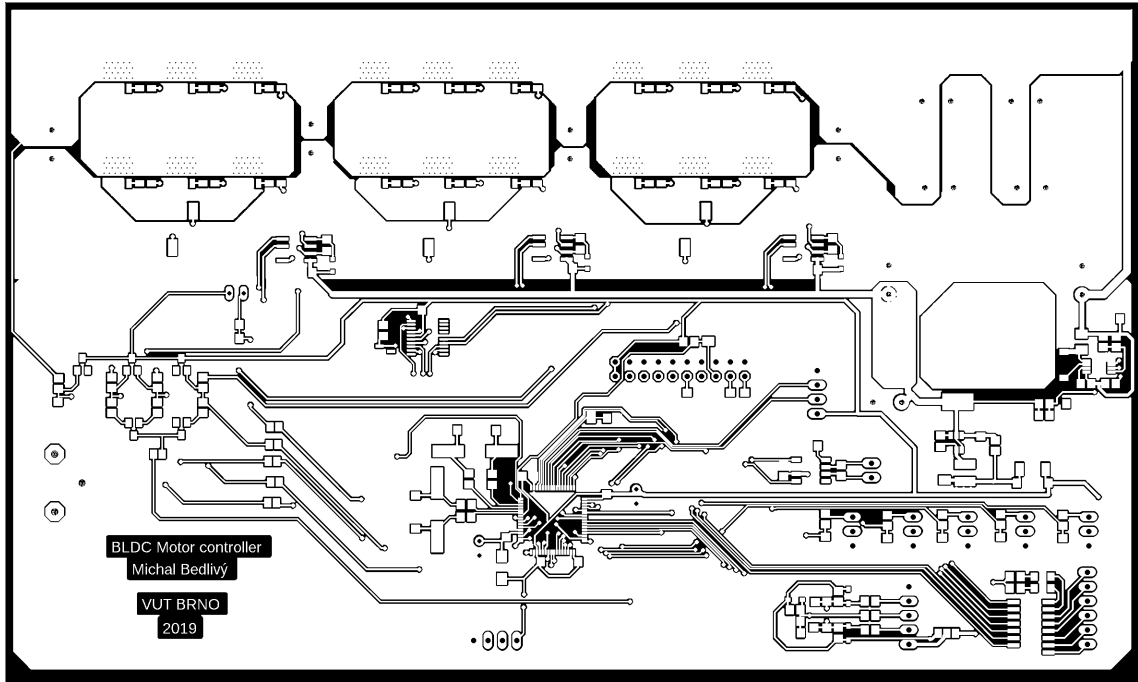
# Seznam příloh

A Schéma a plošný spoj	44
B Obsah přiloženého CD	51

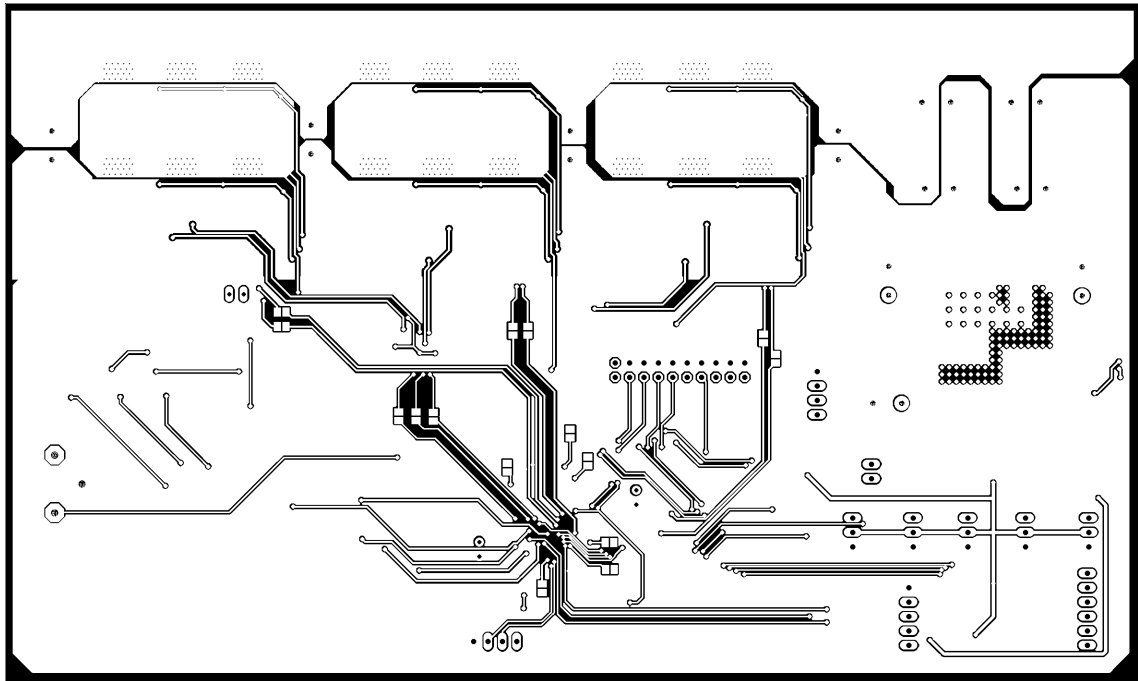
# A Schéma a plošný spoj



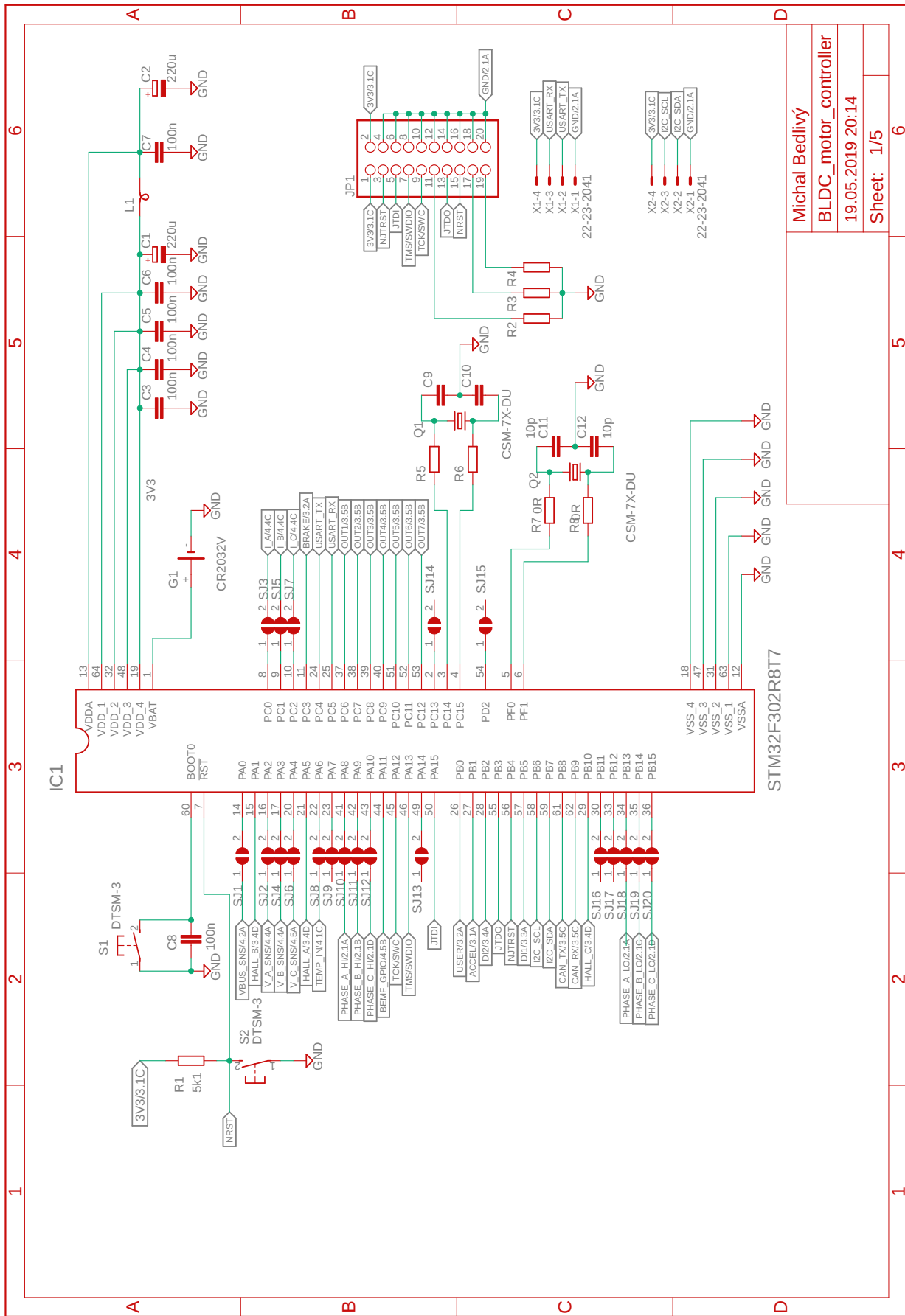
Obr. A.1: Náhled plošného spoje.



Obr. A.2: Vrstva TOP DPS.

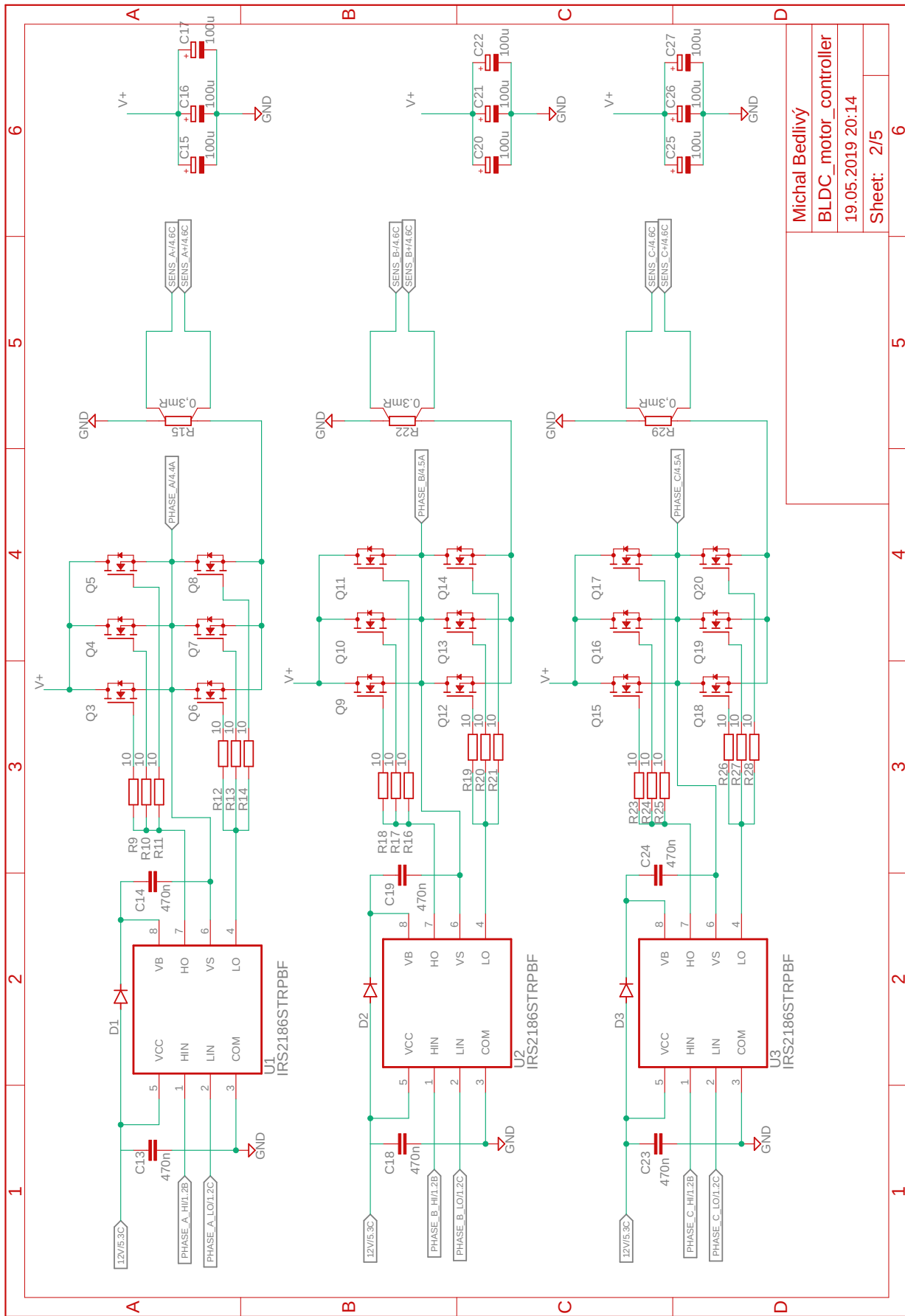


Obr. A.3: Vrstva BOTTOM DPS.



Michal Bedlivý  
 BLDC\_motor\_controller  
 19.05.2019 20:14  
 Sheet: 1/5

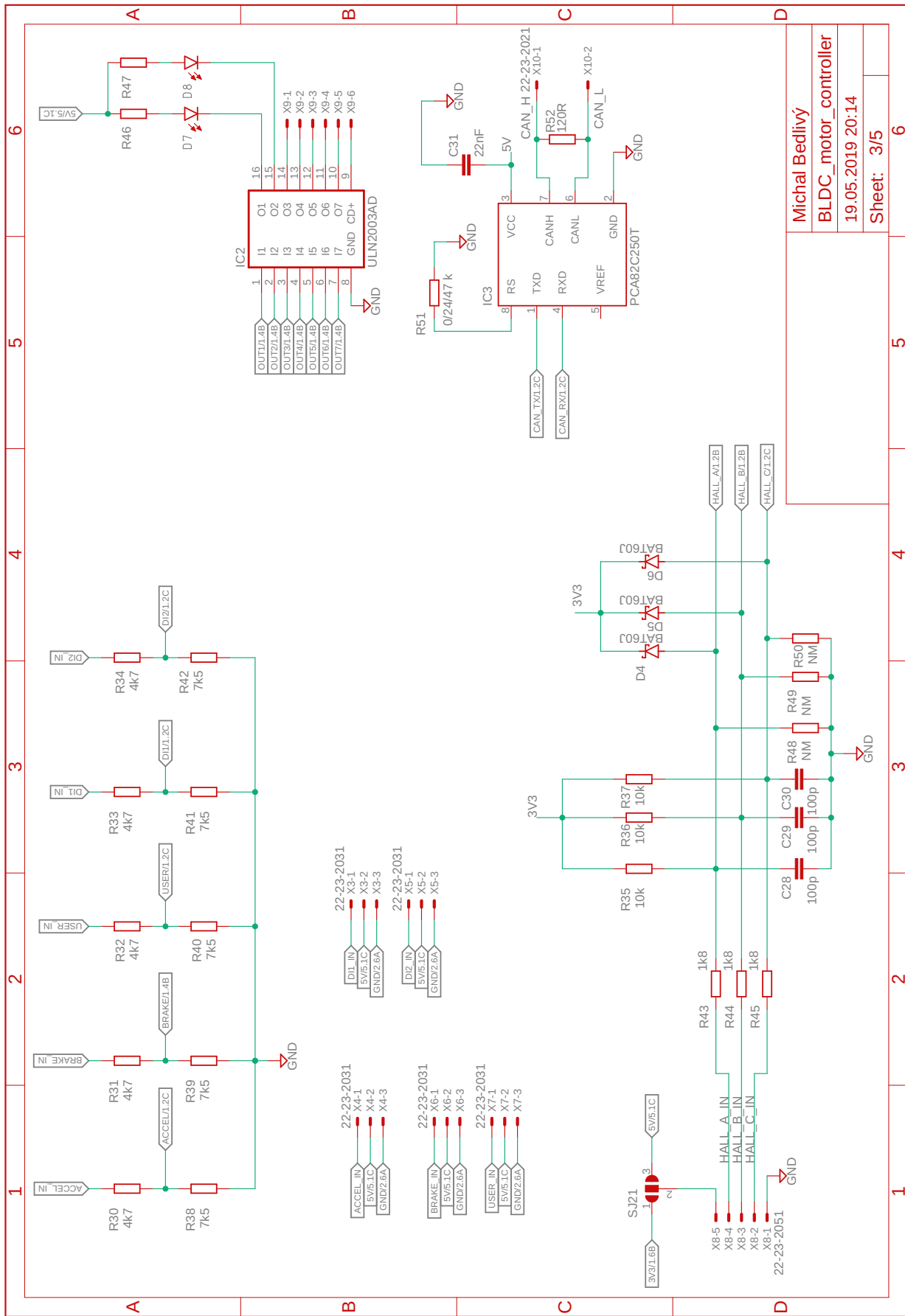
Obr. A.4: Schéma zapojení - procesor



Michal Bedlivý  
 BLDC\_motor\_controller  
 19.05.2019 20:14  
 Sheet: 2/5

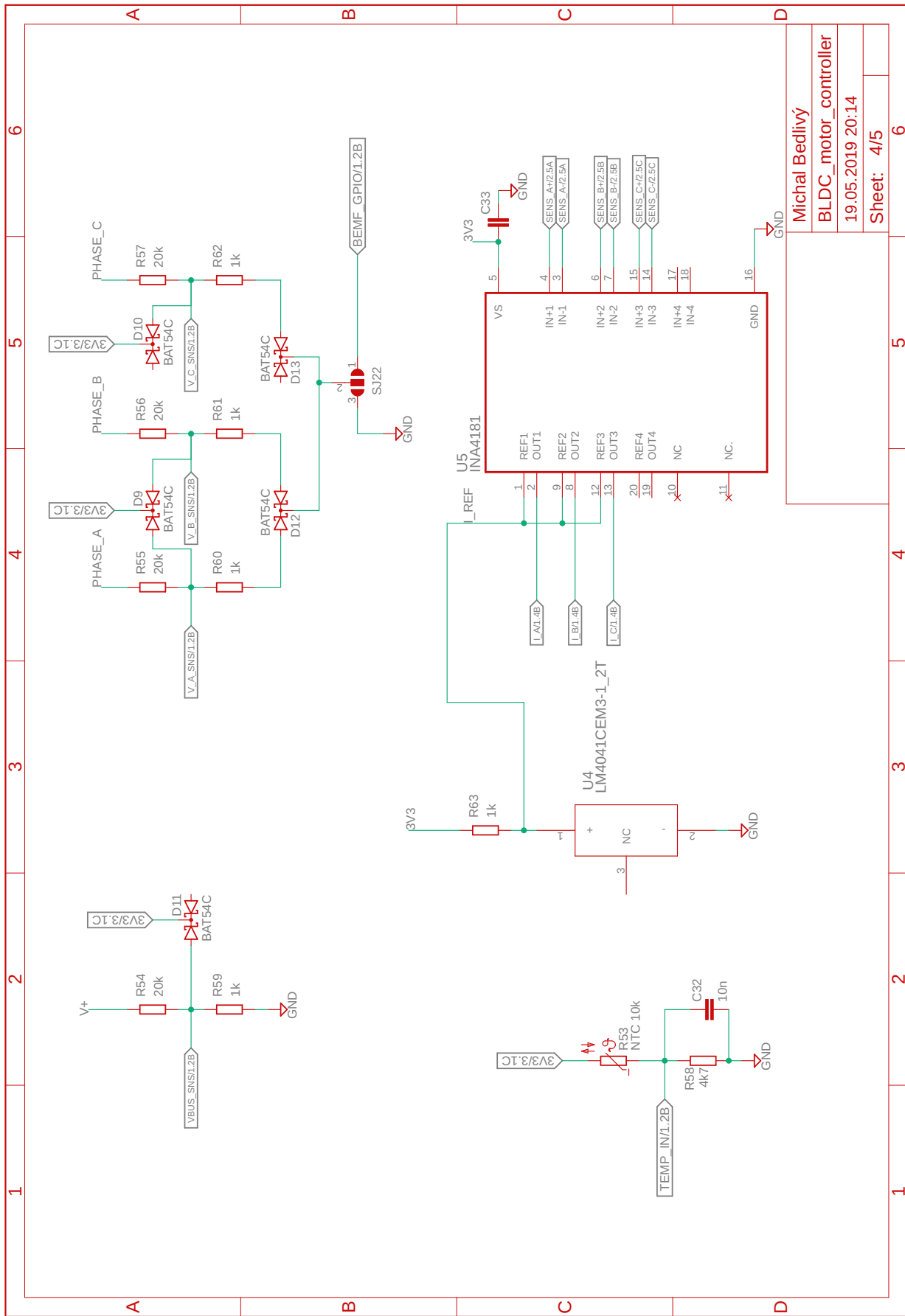
Obr. A.5: Schéma zapojení - výkonová část





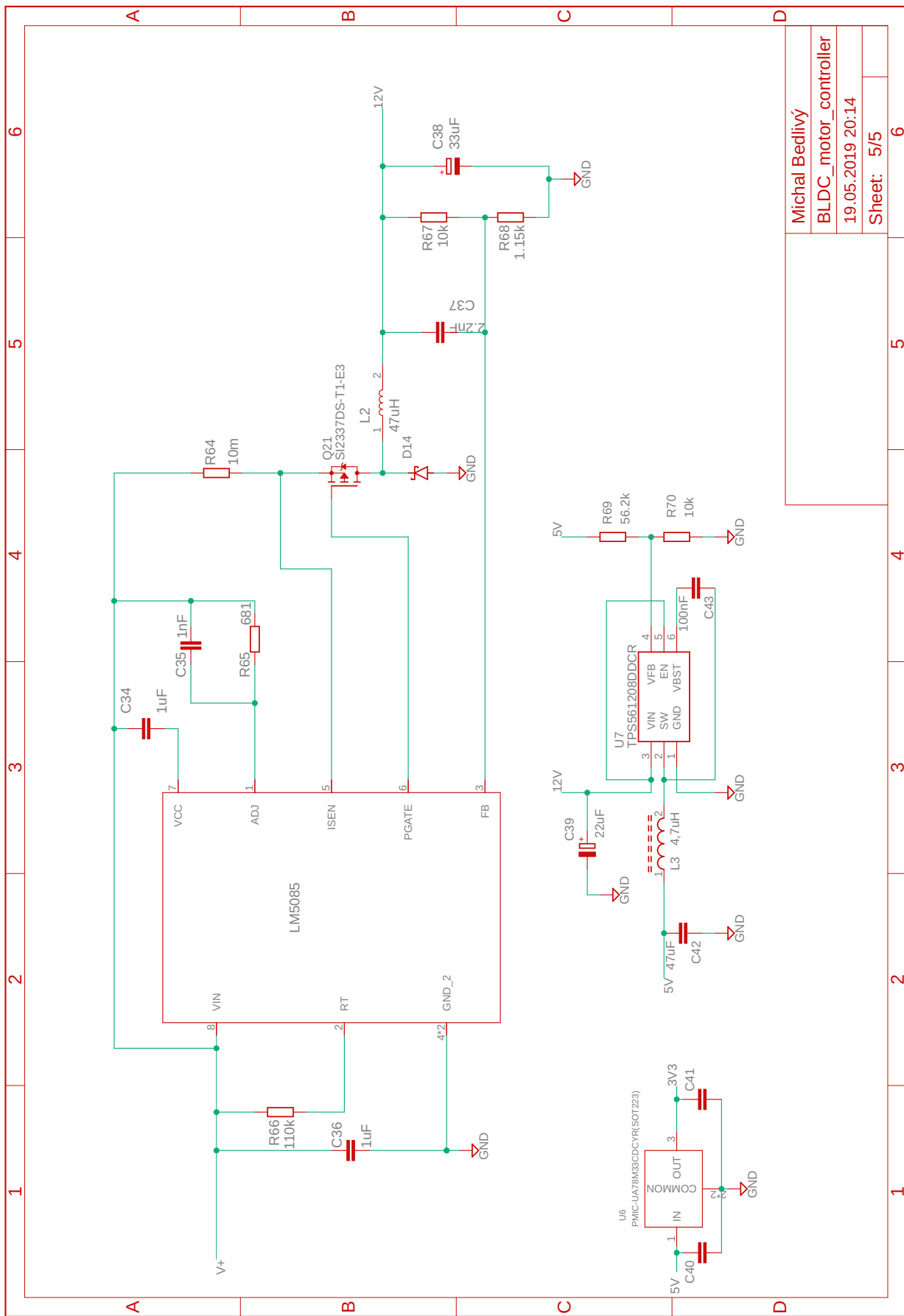
Michal Bedlivý  
 BLDC\_motor\_controller  
 19.05.2019 20:14  
 Sheet: 3/5

Obr. A.6: Schéma zapojení - Vstupy, výstupy, CAN buďič



Michal Bedlivý  
 BLDC\_motor\_controller  
 19.05.2019 20:14  
 Sheet: 4/5

Obr. A.7: Schéma zapojení - měření proudů a napětí



Michal Bedlivý  
 BLDC\_motor\_controller  
 19.05.2019 20:14  
 Sheet: 5/5

Obr. A.8: Schéma zapojení - zdroje 12V, 5V a 3,3V

## B Obsah příloženého CD

```
/ ..... kořenový adresář příloženého CD
├── pdf
│   ├── Bedlivy M BP.pdf
├── EAGLE
│   ├── BLDC controller.sch
│   └── BLDC controller.brd
```