

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Elektrický pohon elektrokoloběžky**



## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá stavbou elektrokoloběžky. Po komplexní analýze vhodných typů pohonu pro elektrokoloběžku byl zvolen BLDC motor, který se zdá svými parametry jako nejvhodnější typ pohonu díky svojí vysoké účinnosti, nízkému zástavbovému prostoru a bezúdržbovosti. Hlavním tématem diplomové práce byl návrh střídače obstarávající napájení BLDC motoru. Vhodná topologie střídače pro tento motor je 3f střídač. Plně řízený 3f střídač umožňuje rekuperaci kinetické energie při brždění zpátky do baterie, což zvyšuje dojezd celého systému.

Pro vhodné dimenzování součástek bylo nakresleno schéma střídače a navrhnutá deska silové části střídače a přídavné logiky. Deska střídače byla nakreslena s ohledem na co nejmenší parazitní kapacity a indukčnosti. Po osazení byla deska otestována na funkčnost a naměřeny nasimulované průběhy proudů, které očekáváme u BLDC motoru.

## **Klíčová slova**

Bezkartáčový stejnosměrný motor, střídač, polomost, driver, LiFePO<sub>4</sub> baterie, koloběžka, dopravní prostředek

## **Abstract**

This thesis is focused on construction of an electronic kickbike. After a complex analysis of possible motor types a BLDC motor was chosen, which seemed to be the most suitable one, according to its parameters, like high effectivity, low mounting space and long servis period.

The main topic of the master's thesis was the design of the BLDC engine. The most suitable topology of a driver for the motor is a three phase inverter. A fully controlled three phase inverter allows recuperation of kinetic energy, while breaking, back to the battery, which increases action radius of the whole system.

In order to select the most suitable components for the engine, thermal simulations of the components and devices, while the engine was fully loaded, were executed. Furthermore scheme of engine's inverter was designed as well as driver PCB and logic PCB. The PCB was created in a 4 layer sandwich design, to eliminate parasite capacitance and inductance. After that the inverter was constructed and its functionality tested.

## **Key words**

Brushless DC electromotor, inverter, half bridge, driver, LiFePO<sub>4</sub> battery, kick bike, vehicle

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou 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 diplomové práce je legální.

.....  
podpis

V Plzni dne

Lukáš Sedláček

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Pavlovi Drábkovi, Ph.D. a všem ostatním, kteří se podíleli na vypracování diplomové práce a sestavení vzorku driveru.

# Obsah

1. Úvod.....	8
2. Stejnoseměrné motory.....	9
3. Základní popis BLDC motoru.....	11
3.1 Popis motoru.....	11
3.2 Zjištění polohy rotoru.....	13
3.3 Komutace BLDC motoru.....	16
4. Návrh střídače teorie.....	17
4.1 Výběr spínacích součástek.....	17
4.2 Proudové senzory.....	20
4.3 Budiče výkonových tranzistorů.....	21
5. Topologie střídače pro BLDC a možnosti řízení.....	24
5.1 PWM řízení motoru.....	26
5.2 Dvouhodnotová regulace.....	29
6. Vlastní návrh střídače.....	30
6.1 Naměřené hodnoty z továrního budiče.....	30
6.2 Tranzistor.....	31
6.3 Proudová čidla.....	32
6.4 Gate driver.....	33
6.5 Návrh schématu.....	36
7. Měření a simulace.....	43
7.1 Simulace oteplení tranzistoru.....	43
7.2 Oživení střídače.....	45
8. Závěr.....	48
9. Seznam literatury a informačních zdrojů.....	49
10. Seznam obrázků.....	50

# 1. Úvod

S kolegou Janem Dvorským jsme dostali nabídku vytvořit elektrokoloběžku s pokročilým typem motoru jako výstavní kus pro katedru KEV. Už od začátku bylo jasné, že práce nebude jednoduchá, ale tato výzva se nám líbila. Katedra má jednu koloběžku k dispozici, ale ta neumí elektricky brzdit a rekuperovat zpět do baterie. Dle zadání naše koloběžka musí umět rekuperovat do baterií a podle toho se musí uspořádat celý pohon. Kolega Jan Dvorský má na starost řízení a programovou část pohonu a mou prací je hardware driveru.

Historie stejnosměrných motorů, ze kterého BLDC motor vychází, sahá už k prvním motorům vůbec, nicméně první funkční prototyp tohoto typu motoru byl vytvořen již v 50. letech 20. století. Klasické stejnosměrné motory mají komutátor, který značně omezuje jejich dlouhodobou funkčnost bez nutnosti oprav. Dále komutátor při své činnosti vytváří vodivý uhlíkový prach, značné množství vysokofrekvenčního rušení a v neposlední řadě dochází k jiskření při přechodu uhlíku z jedné lamely komutátoru na druhou. Tyto věci mohou být značně problematické při využití v mnoha odvětvích. Na druhou stranu kvalita regulace otáček a momentu u stejnosměrných motorů je značně jednodušší a přesnější než u střídavých motorů. Proto bylo vynaloženo mnoho prostředků pro zdokonalení stejnosměrných motorů tak, aby se jejich hlavní nedostatek, komutátor, odstranil.

BLDC motor vznikne zjednodušeně řečeno prohozením rotoru a statoru u stejnosměrného stroje s buzením permanentními magnety. Musíme ovšem zajistit, aby cívky statoru měly pouze tři fáze oproti klasickému DC motoru, který má na rotoru mnoho fází pospojovaných v komutátoru. V pravém slova smyslu můžeme jako bezkartáčový motor označit pouze stejnosměrný bezkartáčový (BLDC) a synchronní bezkartáčový motor (BLAC nebo PMSM). Tyto dva motory jsou si dosti podobné. Oba mají na rotoru permanentní magnety a na statoru tři fázové vinutí napájené ze střídače. Hlavním rozdílem mezi motory je tvar magnetické indukce ve vzduchové mezeři. U BLDC motoru je magnetické pole lichoběžníkové a u BLAC je sinusové.



## 2. Stejnoseměrné motory

Pohony se stejnosměrným motory dosahují velmi dobrých regulačních vlastností, které vyplývají z principu činnosti DC motoru. Konstrukce těchto motorů zajišťuje ideální úhel vektorů magnetického pole rotoru a statoru. Tím je zajištěn maximální moment motoru. V pohonech se nejčastěji využívají motory s cizím buzením, u menších výkonů pak motor s permanentními magnety. Otáčky motoru s cizím buzením jsou přímo úměrné napětí kotvy a moment motoru je závislý na proudu kotvou. Z toho vyplývá jednoduchá regulace takového motoru.

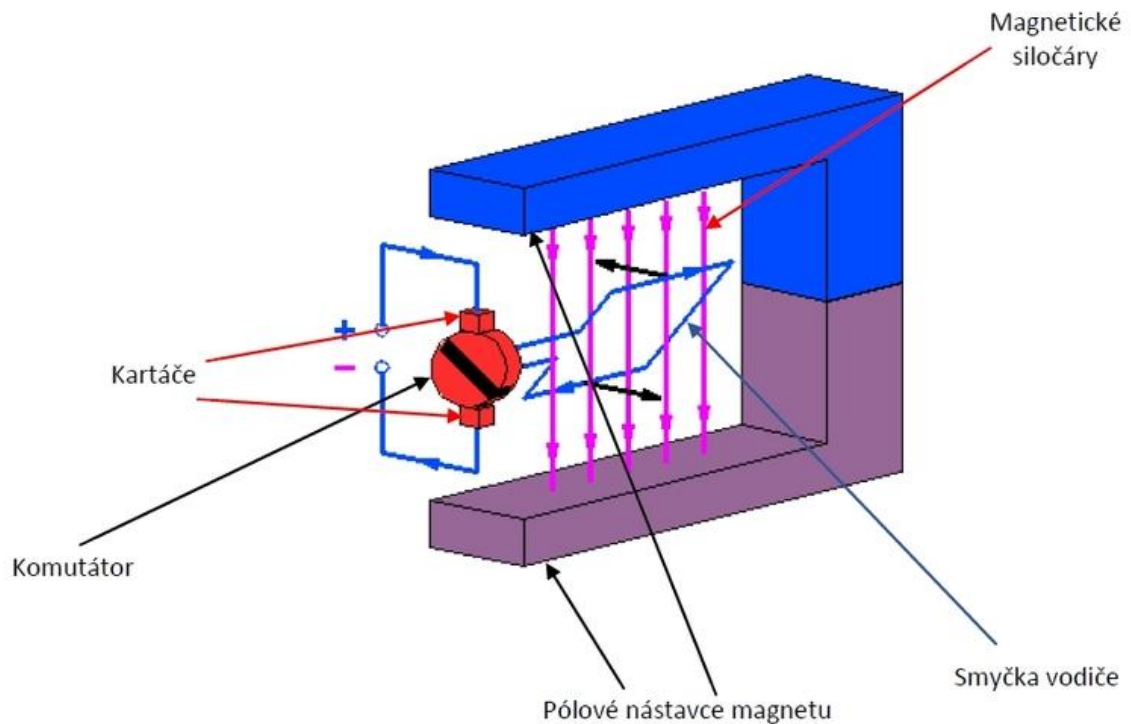
U stejnosměrných motorů se využívá mechanické komutace a používají se grafitové nebo železné kartáče.

Uhlíkové kartáče mají větší styčnou plochu s komutátorem a jsou schopny přenášet větší proudy než kovové kartáče. Vyžadují ale větší přitlačnou sílu a tak způsobují větší brždění motoru a větší ztráty při chodu naprázdno. Grafitové uhlíky se používají v pohonech, kde dochází k častějšímu momentovému přetěžování.

Železné kartáče nevyžadují pro malý přechodový odpor velké přitlačné síly, proto je i mechanické brždění motoru způsobované komutátorem malé. Železná kartáče trpí menším opalováním kartáčů než grafitové.

Uvnitř magnetického pole, které je generováno statorem, se nachází rotorové vinutí. Průchod proudu rotorovým vinutím vytváří rotorové magnetické pole, které interaguje se statorovým magnetickým polem a tím vzniká záběrný moment motoru. Aby se motor začal otáčet, musí se měnit směr magnetického pole rotoru. To je zajištěno komutátorem, který společně s kartáči zajišťují přenos energie ze stojící části motoru do té pohybující se.

Komutátor je umístěn na rotoru a uhlíkové kartáče jsou na statoru. Komutátor je rozdělen na mnoho sekcí, které jsou od sebe izolované. K jednotlivým sekcím jsou připojeny konce vinutí jednotlivých cívek rotoru, počet lamel rotoru odpovídá počtu pólů motoru. Naproti sobě jsou umístěny kartáče, které jsou přitlačovány k většinou mosaznému komutátoru. Jakmile přivedeme na komutátor proud, začne procházet příslušnou cívkou rotoru a vybudí rotorové magnetické pole. Toto pole působí proti statorovému poli a způsobí pootočení motoru. Společně s motorem se pootočí i komutátor, kartáče se tedy přemístí pod sousední lamelu komutátoru a celý děj se opakuje.



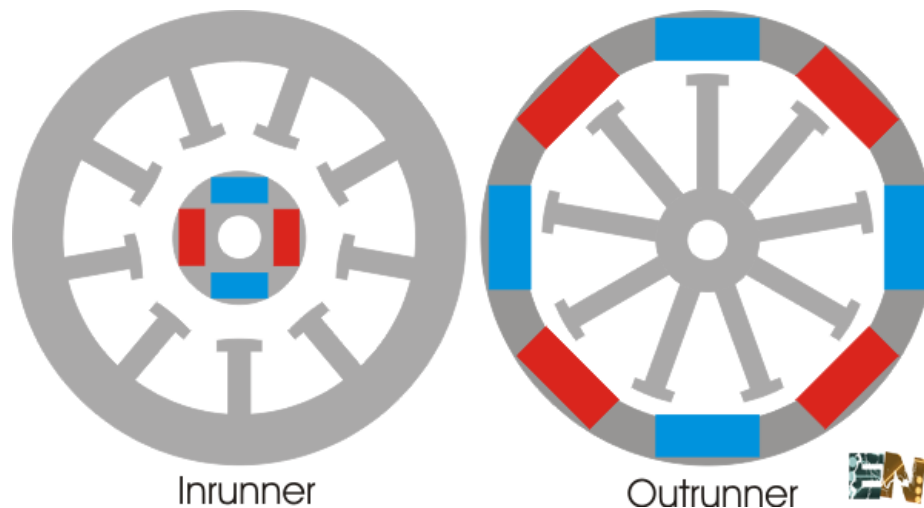
Obrázek 2-1 Princip činnosti DC motoru [1]

Hlavním problémem kartáčových stejnosměrných motorů je právě komutátor. Veškerý výkon motoru se musí přenést přes kluzný kontakt uhlík – komutátor. Při vysokých proudech dochází k natahování oblouků mezi lamelami komutátoru, a tím se snižuje účinnost přenosu a nadměrně se opotřebovávají uhlíky. To zvyšuje nároky na servisní intervaly pohonu. V neposlední řadě komutátor vytváří při svojí funkci vysokofrekvenční rušení, šířící se skrz napájecí síť i vzduchem do ostatních spotřebičů. To ovlivňuje elektromagnetickou kompatibilitu.

## 3. Základní popis BLDC motoru

### 3.1 Popis motoru

Bezkartáčový stejnosměrný motor je bezúdržbovou a účinnější evolucí klasických stejnosměrných motorů. BLDC motor neobsahuje klasický komutátor, jaký známe z DC strojů. Na rotující části motoru jsou umístěny permanentní magnety, tvořeny převážně prvky vzácných zemin jako například samarium-cobalt nebo neodym-železo-bor, které zajišťují dostatečnou magnetickou indukci. Stator je tvořen 3f vinutím, navinutých na pólových nástavcích, většinou spojeným do hvězdy bez vyvedeného středu. Tím, že se otáčí nenapájená část stroje, není třeba mechanický komutátor. Oproti ostatním motorům, kde je stator umístěn zvenku motoru, zde bývá většinou stator uvnitř a otáčí se vnější část motoru. Jedná se tedy o provedení „inrunner“, kde se otáčí vnitřní část nebo „outrunner“, kde se otáčí vnější část.



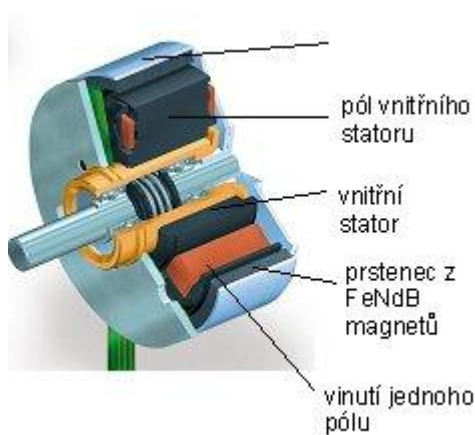
Obrázek 3-1 Inrunner a outrunner motor [2]

Motor, u kterého se otáčí vnitřní část má magnety menší a blíže statorové části, z toho důvodu se otáčí rychleji než u motoru s rotorovou vnější částí. Na druhou stranu inrunner motor nedosahuje takových točivých momentů jako outrunner.

BLDC motor se v posledních letech rozšiřuje do velkého množství aplikací. V průmyslu se díky svému vysokému rozsahu otáček a opět díky dobré regulovatelnosti otáček při konstantním momentu využívají jako lineární motory, servomotory, aktuátory pro roboty, serva pro CNC stroje atd. Vysoko výkonové BLDC motory nacházejí čím dál tím větší uplatnění v elektromobilech a hybridních automobilech. Tato vozidla využívají BLAC. BLAC motory

jsou konstrukčně téměř stejné s BLDC motory, ale jejich BEMF je sinusové na rozdíl od BLDC, které má BEMF lichoběžníkového typu.

Vinutí motoru je tvořeno 3f vinutím na statoru, které je většinou spojeno do hvězdy bez vyvedeného středu, jsou ovšem i motory, které jsou pospojovány do trojúhelníku. Pokud budeme uvažovat motor s jednou pólovou dvojicí na fázi, jsou cívky navinuty s mechanickým rozestupem  $180^\circ$  a spojeny do série tak, aby při připojení k napájení vytvořily severní a jižní magnetický pól, se kterým interaguje magnetické pole permanentních magnetů na rotoru. Pro hladší chod motoru a vyšší točivé momenty jsou motory většinou konstruované jako více pólové.



Obrázek 3-2 Řez BLDC motorem [3]

Konstrukční řešení podle obrázku 3-2 je s vinutím na vyniklých pólech statoru. To umožňuje zvýšit měrnou hmotnost a měrný objem stroje, díky efektivnějšímu využití mědi vinutí. Proto je možný nárůst momentu až o 20% oproti motorům s homogenním polem. Nevýhodou tohoto uspořádání je vznik reluktančních momentů, vzhledem k nehomogennímu magnetickému poli pod pólovými nástavci.

Všechny elektrické stroje potřebují ke své funkci magnetický tok mezi rotorem a státorem ve vzduchové mezeře. Takový tok lze vytvořit budícím vinutím, které ovšem vyžaduje napájení. BLDC motory využívají permanentní magnety. Permanentní magnet je takový materiál, který prošel procesem magnetizace a má zbytkovou indukci  $B$  a koercivitu  $H$ . Při dnešních technologiích jsme schopni vytvořit magnety dostatečné kvality pro využití v motorech a v požadovaných tvarech pro daný typ motoru. Dnes se využívají hlavně dva typy permanentních magnetů pro tyto účely.

Samarium – Kobalt je slitina vzácných kovů. Tato slitina spojuje výhody dříve využívaných feritových materiálů, které mají vysokou koercivitu s výhodami AlNiCo materiály, které mají vysokou remanenci. Jejich hlavní nevýhodou je vysoká cena, neboť oba materiály patří mezi vzácné kovy.

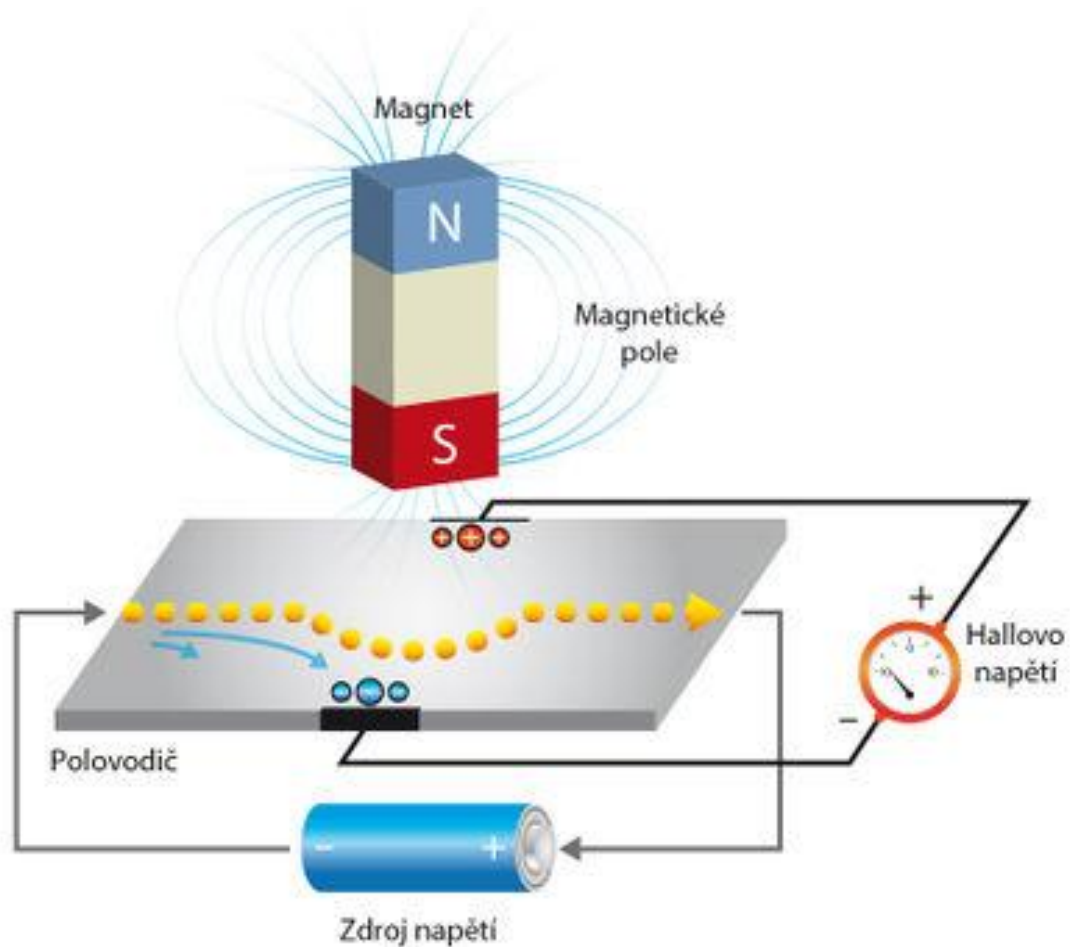
Poslední dobou je nejvyužívanější materiál pro permanentní magnety slitina Neodym-železo-bor. Jeho hlavní výhodou je, že při pokojových teplotách má vysokou remanenci i koercivitu, až 1,2T a přes 800kA/m. Díky takto vysokým hodnotám lze dosáhnout vysokých magnetických toků anebo snížení velikosti magnetů při stejné indukci oproti feritovým magnetům. Jsou také výrazně levnější oproti Sm-Co magnetům. Jejich největší nevýhodou je velmi nízký Curieův bod, to jejich funkční použití omezuje pouze do teplot okolo 100°C.

## 3.2 Zjištění polohy rotoru

Detekce polohy motoru je velice důležitá z hlediska nutnosti znát tuto informaci pro řízení driveru motoru. Jsou dva hlavní typy snímání polohy, které mají svoje pro a proti. Bezsenzorové snímání polohy je výhodnější z hlediska ceny, senzorové snímání polohy kontruje přesnějším snímáním polohy a možností zjistit polohu rotoru i u stojícího motoru.

### **Hallové senzory**

*„Princip těchto senzorů vychází z Hallova jevu. Vodivou destičku z kovu nebo polovodiče umístíme do homogenního magnetického pole tak, aby vektor magnetické indukce  $\vec{B}$  byl na destičku kolmý. Prochází-li destičkou elektrický proud ve směru nejdelší její hrany, lze voltmetrem zjistit, že mezi bočními stěnami destičky vzniká napětí. Toto napětí se označuje  $U_H$  a nazývá se Hallovo napětí na počest amerického fyzika E. H. Halla (1855 - 1938), který tento jev v roce 1879 objevil. Příčinou vzniku Hallova napětí je magnetická síla  $\vec{F}_m$ , která působí na volné nosiče náboje tvořící proud  $I$  v destičce. Tyto nositelé náboje jsou vychylovány ze svého původního směru, a tak není jejich koncentrace v příčném průřezu destičky konstantní. U jedné boční destičky proto vzniká jejich nadbytek, u protilehlé nedostatek. Nerovnoměrné rozdělení náboje je příčinou vzniku elektrického pole o intenzitě  $\vec{E}$ . Silové působení tohoto elektrického pole na částice je orientováno proti silovému působení pole magnetického.“ [4]*



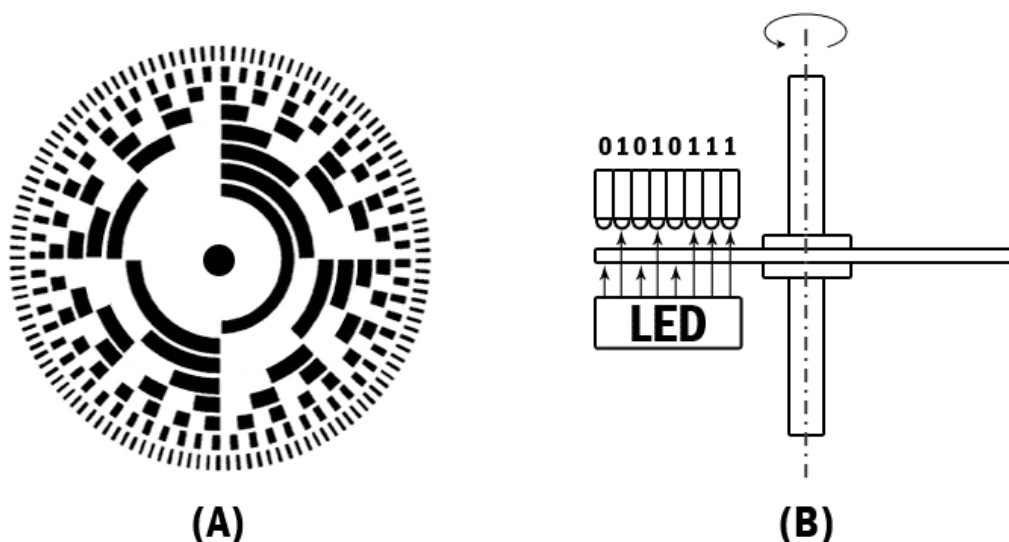
Obrázek 3-3 Popis Hallova jevu [5]

Dnes jsou Hallovy senzory vyráběny v podobě integrovaných obvodů, ve kterých jsou integrovány teplotní korekce, obvody upravující výstupní napětí dle určité lineární charakteristiky a další úpravy signálu. Vyrábějí se jak pro měření velikosti proudu, tak pro detekci směru magnetického pole. Pro detekci polohy rotoru jsou důležité hlavně Hallovy spínače, které mají na svém výstupu logickou jedničku nebo nulu, dle toho jestli se zrovna nachází pod pólem statoru nebo ne.

U menších motorů se Hallovy senzory umísťují přímo do rotoru, kde jsou většinou umístěny do kruhového plošného spoje tak, aby byly schopny snímat přímo magnetické pole statoru. U větších motorů se umísťují mimo hlavní motor do blízkosti pomocného magnetického terčiku. Nejčastěji se umísťují tři Hallovy senzory tak, aby měly vůči sobě posun 60°. Pokud se motor pootočí, změní se logické hodnoty na výstupech trojice senzorů a tak dokážeme rozpoznat, které vinutí máme zrovna napájet.

## Optický enkodér

Optický enkodér je složen ze tří hlavních součástí. Zdroje světla, stínícího disku a snímače světla. Stínící disk je umístěn na hřídel motoru a otáčí se stejnou rychlostí jako rotor. Zdrojem světla je dnes výhradně LED dioda, která svítí skrz stínící disk na fotodiodu nebo fototranzistor. Otáčením disku dochází k přerušování světelného toku, který je detekován snímačem. Jsou dva druhy optických enkodérů - absolutní a inkrementální typ. Inkrementální typ je jednodušší a dává informaci jen o rychlosti otáčení motoru. Disk je zde rozdělen na stejně široké části, které jsou buď průhledné nebo stíní. Počet dvojic na disku stanovuje, kolik impulzů dostaneme z inkrementálního čidla na výstupu po jedné otáčce rotoru. Druhým typem jsou čidla absolutní, které dávají informaci o pozici rotoru a o směru otáčení. Zde se používá několik dvojic fotodioda-fototranzistor. Průhledné a neprůhledné části na disku, které jsou zakódované do binárního nebo Greyova kódu viz *obrázek 3-4*.



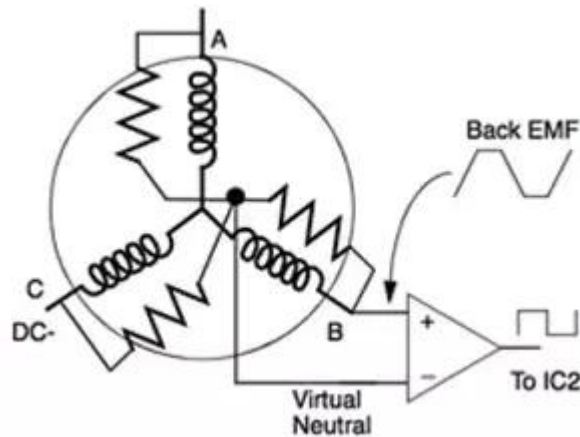
Obrázek 3-4 Stínící destička s binárním kódem [6]

## Bezsenzorová snímání

U malých motorů, kde by se složitě umísťovaly snímače do motoru anebo z důvodu ušetření financí se využívá bezsenzorové snímání takzvaného BEMF napětí. Hlavní nevýhodou tohoto snímání je nemožnost snímat velmi nízké otáčky motoru. Elektromotorické napětí vzniká na svorkách motoru při otáčení rotoru a je závislé na několika faktorech, jako je počet závitů cívky, délka a vnitřní průměr rotoru, magnetická indukce a úhlová rychlost. Z těchto



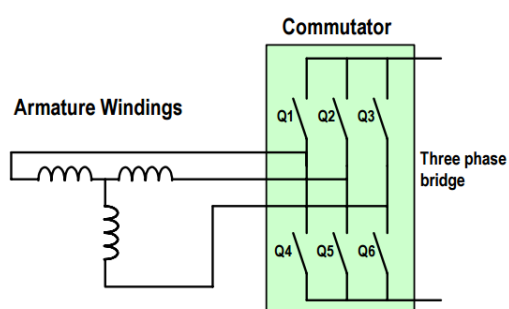
parametrů je vidět, že jediný parametr, který se mění je úhlová rychlost motoru. Na obrázku 3-5 vidíme jednoduchý obvod pro snímání průchodu nulou. Je to jedna z nejpoužívanějších metod měření BEMF



Obrázek 3-5 Jednoduchý způsob měření BEMF [7]

### 3.3 Komutace BLDC motoru

Mechanický komutátor je zde nahrazen kombinací snímání polohy rotoru a třífázového střídače s vhodným řízením. Každá kombinace z Hallových sensorů má svojí kombinaci spínačů v střídači, která v danou chvíli mají vést proud a napájí dvě vinutí v motoru. Třetí fáze je odpojena od zdroje a je plovoucí.



Hall Sensor code	Phase #	Active drive
101	1	Q1 (PWM1) Q6 (PWM6)
100	2	Q1 (PWM1) Q5 (PWM5)
110	3	Q3 (PWM3) Q5 (PWM5)
010	4	Q3 (PWM3) Q4 (PWM4)
011	5	Q2 (PWM2) Q4 (PWM4)
001	6	Q2 (PWM2) Q6 (PWM6)

Obrázek 3-6 Komutační schéma střídače [8]



## 4. Návrh střídače teorie

Pro správné dimenzování chladiče a součástek ve střídači musíme znát napěťové a proudové poměry, metodu řízení motoru, místo kde se střídač bude provozovat, možnosti chlazení atd.

Pro návrh součástek se vždy uvažují nejvíce náročné klimatické a elektrické podmínky. Střídač bude umístěn na těle koloběžky, takže v letních dnech lze očekávat teplota chladiče na přímém slunci až 50°C.

### 4.1 Výběr spínacích součástek

Nejdůležitější součástkou střídače jsou výkonové tranzistory, které ovládají proud motorem. V dnešní době se nejčastěji používají dva typy výkonových tranzistorů - IGBT nebo MOSFET. IGBT tranzistory jsou hybridem mezi bipolárním tranzistorem a polem ovládaným tranzistorem a spojují výhody obou. IGBT tranzistory se obvykle vyrábějí na nejnižší napětí 600V. V propustném směru se chovají jako dioda a vzniká na nich úbytek dle velikosti protékaného proudu 0,6-2V ve vysokoproudových aplikacích i více. To znamená, že při 25A jsou ztráty způsobené vedením na běžném IGBT tranzistoru okolo 45W na součástku. Dále pak mají nižší spínací rychlost než MOSFETy, takže spínací ztráty budou větší. Na rozdíl od IGBT se polem ovládané tranzistory chovají jako odpory. U nízkonapěťových tranzistorů jsou dnes výrobci schopni dosáhnout extrémně nízkých hodnot odporu kanálu v otevřeném stavu v řádech desítek i jednotek miliohmů. Což znamená, že propustné ztráty na běžném MOSFET tranzistoru jsou přibližně o 10W nižší. Ale s rostoucím závěrným napětím prudce stoupá odpor kanálu, a proto se pro aplikace s vyšším napětím hodí více IGBT tranzistory. V nízkonapěťových výkonových aplikacích se většinou využívají MOSFETy typu N, jelikož se dají zkonstruovat s menším odporem kanálu a majoritní nosiče kanálu v tomto případě elektrony mají vyšší pohyblivost.

Při výběru spínací součástky pro střídač je nejprve nutné rozhodnout, jestli je pro naši aplikaci výhodnější použít IGBT nebo MOSFET. Pro naše využití se více hodí tranzistory typu MOSFET, protože v nízkonapěťových aplikacích na nich vzniká mnohem menší ztrátový výkon. Dále je nutné stanovit si proudové poměry ve střídači, tedy maximální trvalý proud. V této fázi bychom už přibližně měli vědět, jak bude konstruovaná deska střídače a chlazení, a

podle toho zvolit vyhovující pouzdro tranzistoru.

Výpočet oteplení a návrh součástek, provedeme při uvažování řízení střídače six-step metodou. Napětí baterie je 60V a maximální trvalý proud motorem je 25A. Vzhledem k velké časové konstantě chladiče není třeba brát v potaz zvýšení tepelné ztráty při přetížení motoru při rozjezdech, protože je SW umožněno pouze krátkodobé přetížení.

### Napěťové dimenzování

Minimální napětí tranzistorů se určuje podle velikosti napájecího napětí, které je zde 60V a dle koeficientu bezpečnosti, kterým se tato hodnota vynásobí.

$$U_{DSmin} = U_b * k_u = 60 * 1,5 = 90V$$

$$U_{DSmax} = U_b * k_u = 60 * 2,5 = 150V$$

$$\begin{aligned} I_{ef} &= \sqrt{\frac{1}{T} * \int_0^T i_t^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} * \left[ \int_0^{\frac{3\pi}{2}} I_{dm}^2 dt + \int_{\frac{3\pi}{2}}^{2\pi} 0 dt \right]} = \sqrt{\frac{I_{dm}^2}{2\pi} * \left[ \frac{3\pi}{2} - 0 \right]} = \sqrt{\frac{3 * I_{dm}^2}{4}} \\ &= \sqrt{\frac{3 * 25^2}{4}} = 21,65A \end{aligned}$$

Z těchto výpočtu vyplývá, že musíme zvolit tranzistor s maximálním napětím  $U_{DS}$  minimálně 90V pro koeficient bezpečnosti 1,5 nebo minimálně 150V pro koeficient bezpečnosti 2,5. Rozhodl jsem se plošný spoj vypracovat pouze ve dvouvrstvé formě, která tolik neomezuje indukování napěťových špiček při spínání jako vícevrstvé desky, kde jsou vnitřní vrstvy použity k silovému napájení. Proto jsem tranzistor vybíral tak, aby měl větší maximální napětí než 150V. S přihlédnutím k těmto parametrům byl v obchodě farnell.com vybrán dostupný tranzistor, který splňoval požadavky na minimální trvalý proud 25A a větší napětí než 150V.

Tranzistor má trvalý proud při 25°C 40A a při 100°C 25A a maximální špičkový proud až 160A který je omezen hlavně teplotou čipu závislý na šířce pulzu. To nám dovoluje krátkodobě motor přetěžovat nadproudy, například při rozjezdu nebo při prudkém brždění. TO- 247 pouzdro zajišťuje dobrý tepelný přenos mezi tranzistorem a chladičem.

Na tepelných ztrátách tranzistoru se podílí hlavně ztráty vedením a spínáním. Ztráty vedením jsou závislé na velikosti procházejícího proudu a na odporu kanálu v sepnutém stavu.

$$P_{pr} = R_{DS(on)} * I_{ef}^2 = 45 * 10^{-3} * 21,65^2 = 21,09W$$

Druhým typem ztrát jsou ztráty spínáním. Tyto ztráty vznikají na tranzistoru hlavně tím, že sepnutí a vypnutí tranzistoru není nekonečně krátké a určitý krátký čas prochází tranzistorem proud, když není v saturaci a má tak nezanedbatelný odpor kanálu. Toto zpoždění je způsobeno konečnou rychlostí jakou se nabíjí kapacita gate přechodu. Pokud před okamžikem sepnutí tekl proud skrz antiparalelní diodu, musí tranzistor pohltit i tento zbytkový proud. K tranzistoru je připojena antiparalelně dvojitá shottkyho dioda, která je výrazně rychlejší a s menším propustným napětím než dioda zabudovaná v tranzistoru.

$f_{sp}$  je spínací frekvence střídače která je nastavena na 20kHz

$$P_{sp} = (E_{on} + E_{off}) * f_{sp} = \left[ V_{DS} * I_D * \left( \frac{t_r + t_f}{2} \right) + Q_{rr} * V_{DS} + V_{DS} * I_D * \left( \frac{t_r + t_f}{2} \right) \right] * f_{sp} \\ = 2,04W$$

Celkové ztráty tranzistoru tedy dostaneme součtem ztrát spínáním a vedením.

$$P_{tot} = P_{pr} + P_{sp} = 21,09 + 2,04 = 23,13W$$

Nárůst teploty při provozování tranzistoru při těchto parametrech oproti okolní teplotě můžeme přibližně spočítat vynásobením celkových ztrát a tepelného odporu tranzistoru mezi přechodem a chladičem.

$$\Delta T = (R_{thJC} + R_{this} + R_{thp}) * P_{tot} = (0,78 + 0,8 + 0,0004) * 23,13 = 36,5^\circ C$$

Pro kontrolu můžeme spočítat velikost ztrát na antiparalelní diodě. Touto diodou se uzavírá proud v záporné polaritě proudu při zákmitěch, které vznikají spínáním indukčnosti. V nejhorším stavu diodou poteče plný proud motoru. Ztráty na diodě jsou opět dvojího druhu jako na tranzistoru a to spínáním a vedením.

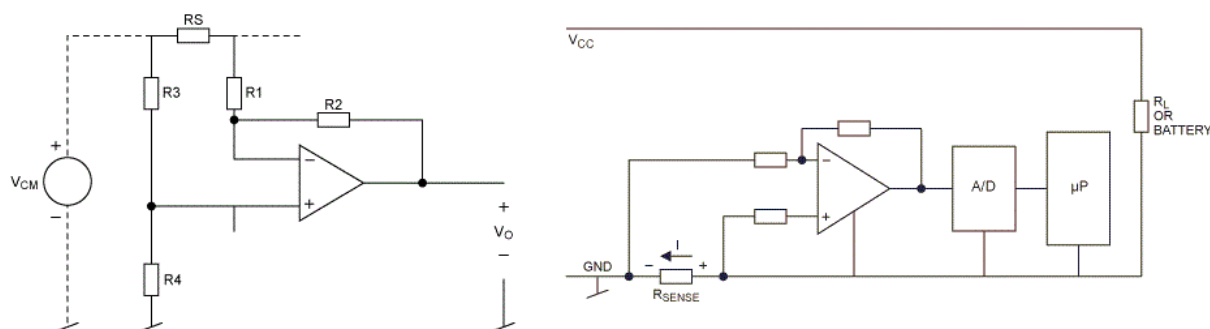
$$P_{totD} = P_{prD} + P_{spD} = U_f * I_D + \left( \frac{1}{4} * Q_{rr} * V_{DS} \right) * f_{sp} = 25W$$

## 4.2 Proudové senzory

Pro správné řízení momentu motoru potřebujeme znát přesnou okamžitou hodnotu proudu jednotlivými fázemi motoru. Existuje několik možných metod, jak tento proud měřit. Jednou z metod je do cesty proudu zařadit snímací odpor, na kterém můžeme měřit úbytek napětí. Toto je značně nevhodné řešení, neboť na odporu vzniká nezanedbatelný ztrátový výkon. Také musí být dimenzován na celý proud, který teče motorem. Odpor musí být bezindukční, aby na něm nevznikaly napěťové špičky při spínání driveru. Pokud by tento snímací odpor měl velkou rezistenci, aby bylo možné snímat i malé proudy, vznikal by na něm při plném zatížení velký úbytek napětí a snižoval tak výkon motoru. Pokud naopak bude odpor malý, aby na něm byl co nejmenší úbytek při plném proudu motorem, můžeme přijít o schopnost měřit malé proudy, protože by se mohly ztratit v šumu vyhodnocovací logiky, která obstarává převod napětí na odporu na měřitelnou úroveň pro procesor.

### Bočníky

Snímací odpory se umísťují buď před, nebo za zátěž, tak jak je znázorněno na *obrázku 4-1*. Odpor, který je zařazen v napájecí části měniče poskytuje při dodržení některých kritérií přesnější a méně zarušené hodnoty. Zde použitý zesilovač musí mít co největší potlačení souhlasného zesílení CMRR, nízký napěťový offset a musí umět pracovat s velkým souhlasným napětím. V případě použití měřicího odporu připojeného k zemi, lze využít klasický operační zesilovač, zapojen jako neinvertující zesilovač.

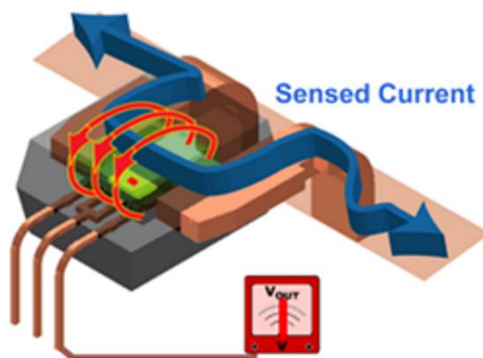


Obrázek 4-1 Umístění bočníku [9]

### Hallovy sondy

Vhodnější možnost jak měřit protékající proud je zařadit do obvodu čidlo proudu. Tato čidla kladou protékajícímu proudu téměř nulový odpor, námi vybrané čidlo má vnitřní odpor pouze  $100\ \mu\Omega$ .

Proudové Hallovy senzory jsou dnes již finančně dostupné a jejich parametry se blíží téměř ideálním proudovým čidlům. Tyto čidla mají většinou v sobě integrovány obvody, které eliminují teplotní závislost Hallova senzoru, obvody které linearizují převodní charakteristiku a upravují výstupní napětí na měřitelné hodnoty. Tyto obvody téměř neovlivňují měřený proud a jsou velice přesné. Největší nevýhoda je citlivost na vnější magnetické pole, které musíme odstínit při návrhu celé konstrukce.

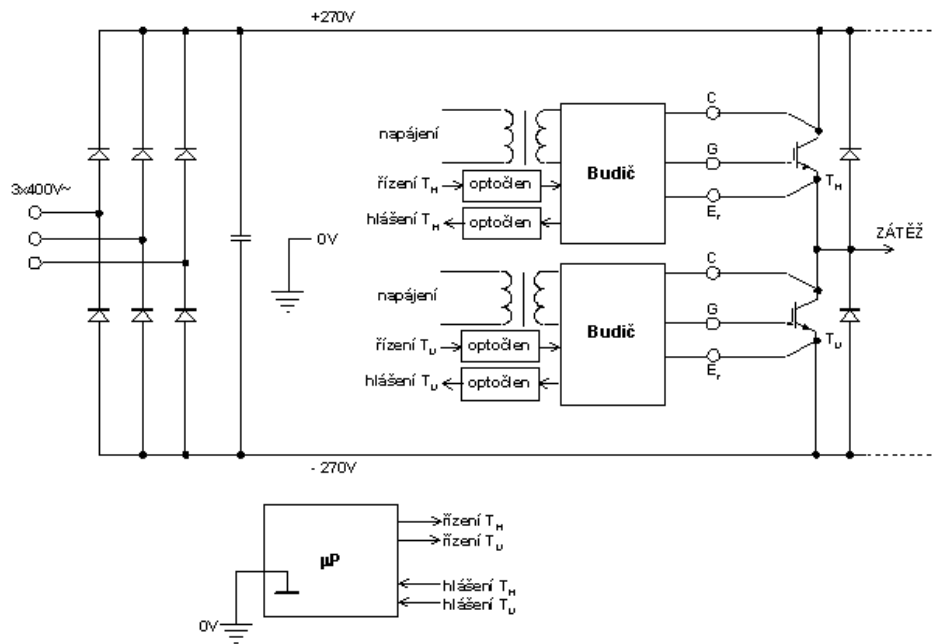


Obrázek 4-2 Řez Hallova čidlem [10]

### 4.3 Budiče výkonových tranzistorů

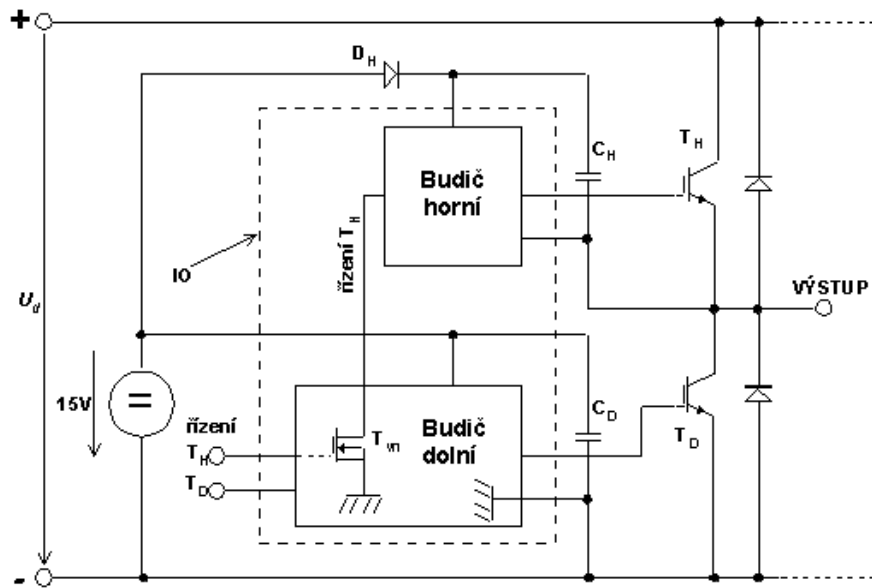
„Budičí obvod tranzistoru (budič, driver) musí samozřejmě na svém výstupu generovat kvalitní řídicí signál pro řídicí elektrodu výkonového spínacího tranzistoru. Avšak základní úlohou budiče není jen napájet gate tranzistoru, ale i zajistit galvanické oddělení řídicího signálu na rozhraní mezi řídicími a výkonovými obvody měniče. Větev měniče, tvořená tranzistory  $T_H$ ,  $T_D$ , je napájena ze šesti pulsního můstkového usměrňovače, na jehož výstupu je jmenovité stejnosměrné napětí 540V. Je však nutno mít na zřeteli, že oproti zemnicímu "žlutozelenému" vodiči PE (0V) se kladná sběrnice nachází na potenciálu +270V (ve střední hodnotě) a záporná sběrnice na potenciálu -270V. V případě elektrického zařízení určeného do průmyslu musí být podle bezpečnostních norem řídicí obvody (na obrázku 4-3 "uP") vždy uzemněny. Pak je zřejmé, že emitor dolního tranzistoru tedy i celý dolní budič se nachází oproti řídicím obvodům trvale na potenciálu -270V. Řídicí signál proto nelze přivést do budiče vodičem, nýbrž jedině galvanicky oddělenou cestou. Ještě zdaleka horší situace nastává u budiče horního, jehož obvodová zem pevně spojená s emitorem horního tranzistoru, se

potenciálově pohybuje oproti řídicím obvodům skokem na hodnoty  $\pm 270V$ , ale navíc se strmostí  $du/dt$  dosahující  $\pm 10$  až  $\pm 120kV/ms$  (!), podle typu výkonových tranzistorů.



Obrázek 4-3 Plovoucí buzení obou tranzistorů [11]

U elektrických zařízení, která nejsou určena pro provoz v průmyslu, bezpečnostní normy nevyžadují uzemnění řídicích obvodů. Zde se nabízí lákavá možnost zcela se vyhnout galvanickému oddělení řídicích signálů. Pak je možno obvodovou zem celého řízení (které není na obrázku 4-4 nakresleno) spojit se zápornou sběrnicí výkonového stejnosměrného zdroje  $U_d$  a tudíž lze přímo, bez galvanického oddělení, budit dolní výkonový tranzistor  $T_D$  dolním budičem.

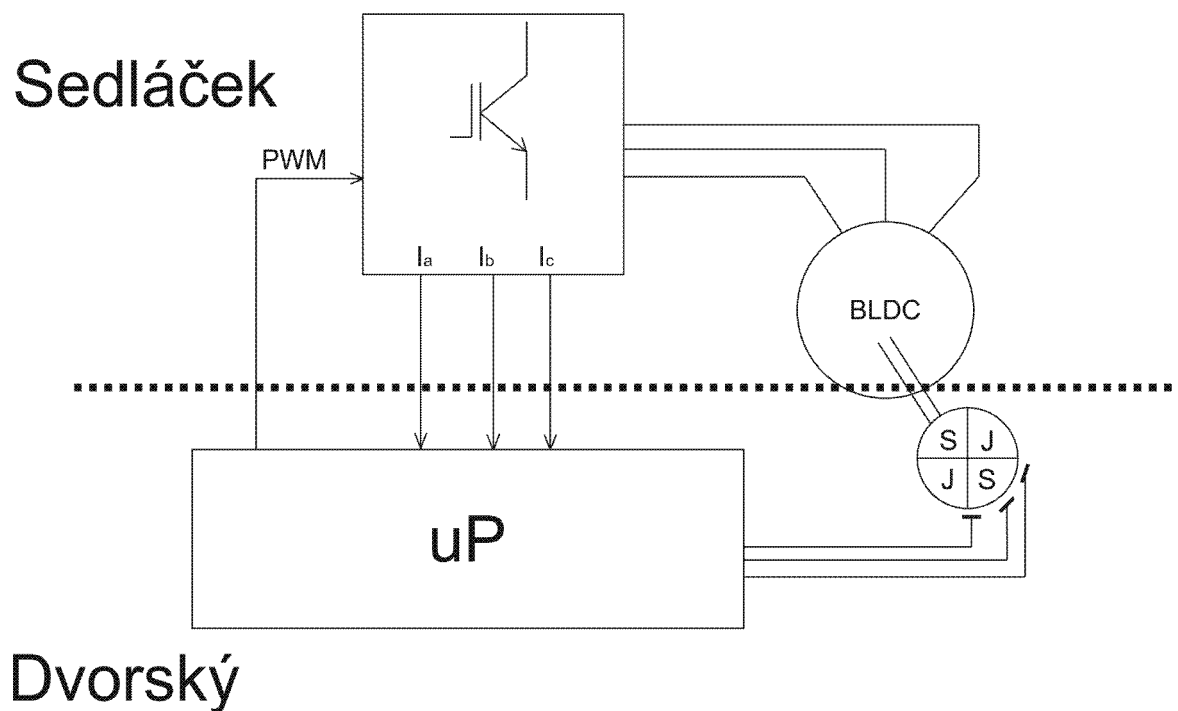


Obrázek 4-4 Buzení pomocí nábojové pumpy [11]

Problém horního budiče však zůstává nezměněn a je řešen následovně. Napájecí energie je dodávána pouze z plovoucího kondenzátoru  $C_H$  o malé kapacitě. Kondenzátor je dobíjen ze zdroje 15V přes oddělovací diodu  $D_H$  vždy v okamžiku sepnutí dolního tranzistoru  $T_D$ . Nevýhodou je, že napětí na kondenzátoru je menší o úbytek na diodě, ale především o úbytek na sepnutém dolním tranzistoru. Tento úbytek může dosáhnout při (krátkodobém) přetížení měniče i několika voltů. To znamená, že právě při přetížení měniče je horní tranzistor navíc ještě nedostatečně buzen. Další nevýhodou je, že nelze ani na nepříliš dlouhou dobu trvale sepnout horní tranzistor (kondenzátor se vybije). Rovněž nelze měnič provozovat v přerušovaném režimu s častým elektronickým zablokováním obou tranzistorů.“ [11, upraveno autorem]

## 5. Topologie střídače pro BLDC a možnosti řízení

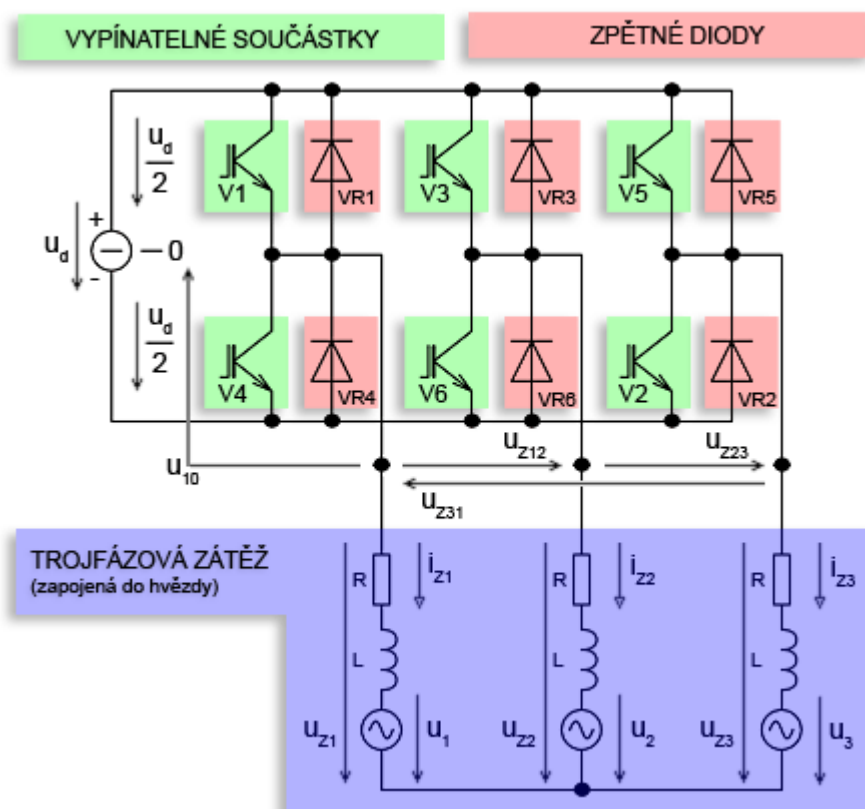
Vzhledem k zadaným požadavkům, že pohon musí umět rekuperovat do baterie a brzdit elektricky, připadá v úvahu jako driver pouze 3f střídač. Práce na pohonu koloběžky byla rozdělena tak, že kolega Jan Dvorský se stará o SW výbavu pohonu a já o HW výbavu. Předpokládaná topologie pohonu je znázorněna na *obrázku 5-1* i s nákresem, kdo se stará o jakou úlohu.



Obrázek 5-1 Rozdělení práce na pohonu



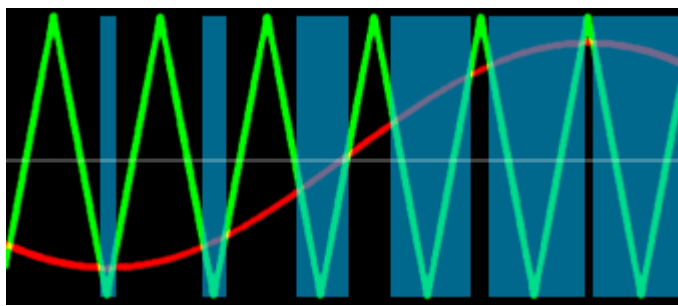
3f střídač je tvořen trojicí polomůstek složených nejčastěji z MOSFET nebo IGBT tranzistorů, kde každý polomůstek napájí jednu fázi motoru. 3f střídač pro BLDC motor je konstrukčně stejný se střídači pro asynchronní motory a další motory, rozdílné je zde řízení. U ASM je většinou sepnut jeden z horních tranzistorů T1, T3, T5 a dva spodní tranzistory. U BLDC motoru je vždy zapnut jen jeden horní a jeden dolní tranzistor. V každém taktu se nám tedy 3f střídač rozpadne na jeden Hmost, který má mezi svými vývody dvě fáze motoru, zapojeny proti sobě polaritou a třetí fáze není v tuto chvíli napájena. Je zde využíváno unipolární spínání prvků v Hmostě, takže se spínají jen prvky například T1 a T6. V případě nulového vektoru se proud uzavírá skrz antiparalelní diody.



Obrázek 5-2 Zapojení silového obvodu [12]

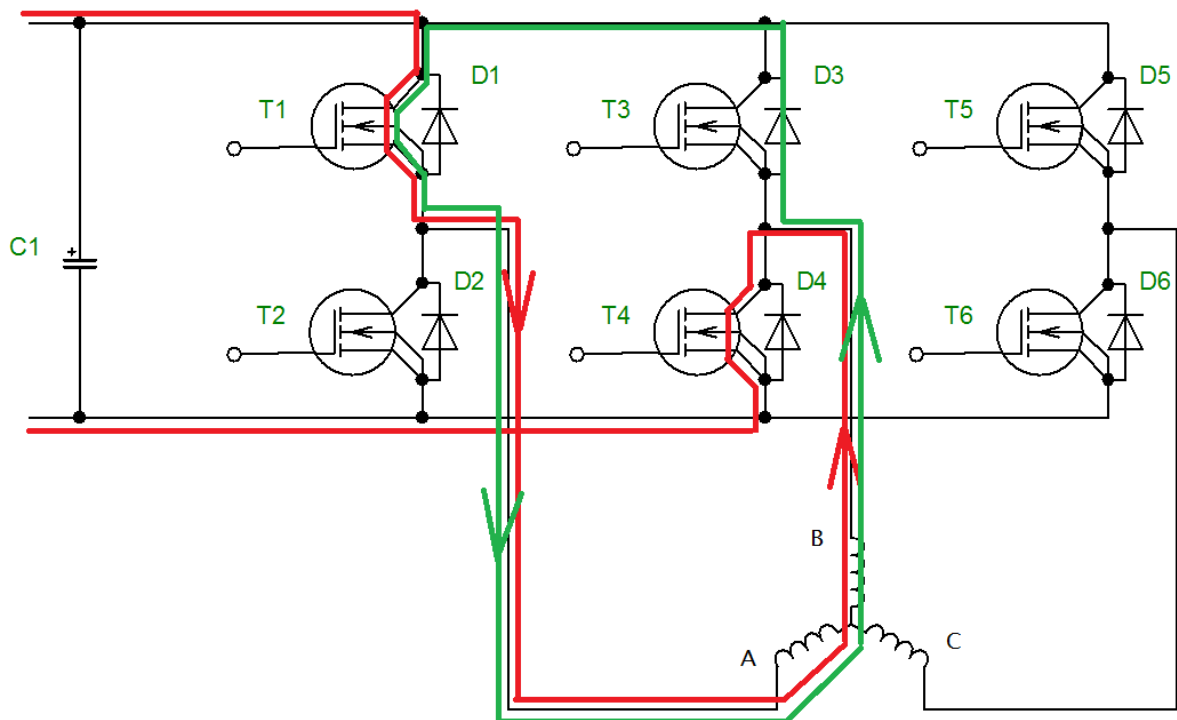
## 5.1 PWM řízení motoru

BLDC motor se chová jako stejnosměrný motor, jeho otáčky se řídí napětím, které se přivádí na stator. K tomu se většinou využívá pulsně šířková modulace, dále jen PWM, jednotlivých můstků střídače. PWM je založena na koincidenci dvou signálů, kde jeden je vysokofrekvenční nosný signál a druhý je řídicím napětím, které požadujeme na výstupu střídače. Toto je realizováno většinou číslicově přímo v řídicím procesoru. Nosný pilový signál, který je na *obrázku 5-3* znázorněn červeně, určuje spínací frekvenci střídače. Zelený signál je námi požadované napětí na výstupu. V případě rovnosti modulovaného a modulačního napětí se mění stavy na hradlech právě používaných tranzistorů. Podle toho jestli jsme v otevření nebo sevření pily se na zátěž přivede napětí anebo se zátěž odpojí od zdroje. Tím se mění efektivní hodnota napětí na vinutích motoru a tím i jeho otáčky.



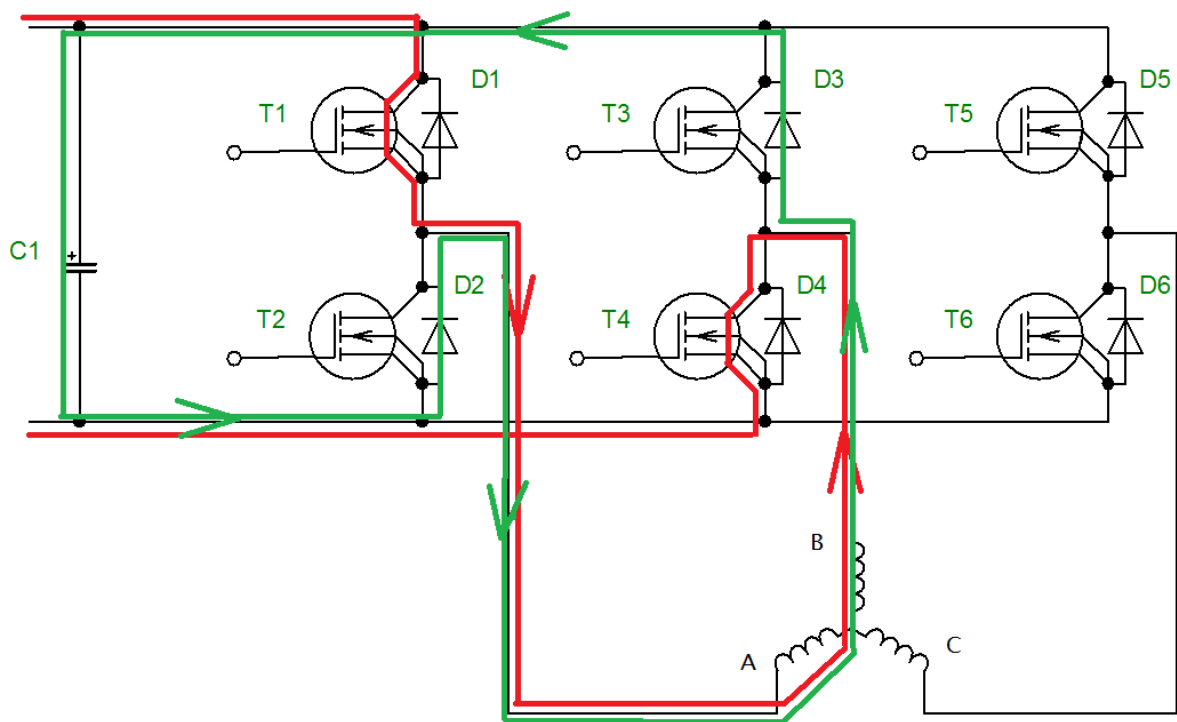
Obrázek 5-3 Řídicí signály PWM [12]

Existují dva typy řízení PWM, a to unipolární spínání prvků v střídači a druhé je bipolární spínání. U unipolárního spínání je vždy vrchní tranzistor T1, T3, T5 po celou dobu vedení fáze trvale sepnut a PWM signál se přivádí pouze na spodní tranzistor, fáze skrz kterou chceme protlačit daný proud. Pro vysvětlení toku proudu uvažujme sepnutý tranzistor T1 a T6. Při zapnutí obou tranzistorů teče proud skrz T1 do fáze motoru A, vrací se fázi motoru B a prochází skrz T4 zpět do zdroje. U indukčnosti je jako stavová veličina proud, proto pokud přerušíme napájení ze zdroje tím, že vypneme tranzistor T4, proud který tekla motorem, se začne uzavírat skrz zpětnou diodu D3, dále pak otevřeným tranzistorem T1 opět do fáze A. Proud v motoru v tuto chvíli exponenciálně klesá. Napětí na fázích motoru je téměř nulové, jsou zde jen úbytky na diodě D3 a T1.



Obrázek 5-4 Směry proudů u unipolárního řízení

Druhým typem řízení je bipolární spínání tranzistorů. Při zapnutých tranzistorech je cesta proudu totožná jako u unipolárního řízení a je v *obrázku 5-5* znázorněna opět červenou barvou. Změna oproti unipolárnímu řízení nastává v čase, kdy je zátěž odpojená od zdroje. V tento moment vypneme oba tranzistory. Proud, který je v obrázku znázorněn zeleně, se již nemůže uzavírat skrz otevřený tranzistor T1 a teče následující cestou. Přeš vinutí motoru, přes diodu D3, teče do kondenzátoru v meziobvodu C1 a pak zpátky skrz antiparalelní diodu D2 do fáze A motoru. V této situaci není na svorkách motoru nulové napětí, ale celé napětí DC meziobvodu v opačné polaritě než při sepnutých tranzistorech. Dochází tak k strmějšímu poklesu proudu motorem.



Obrázek 5-5 Směry proudů u bipolárního řízení

Avšak tyto metody ale neumožňují řízení motoru v generátorickém režimu. Abychom mohli řídit motor i v případě brždění a mohli jsme tak rekuperovat musíme využít takzvané komplementární řízení tranzistorů. To znamená, že v základu využijeme bipolární řízení tranzistorů T1 a T4. V momentě kdy jsou tranzistory vypnuté, ale nenecháme proud procházet skrze antiparalelní diody zpět do zdroje, nýbrž sepne opačné tranzistory v Hmůstku a to T3 a T2. Uvažujme jednotku D, kterou se označuje střída sepnutí tranzistorů při PWM. Pokud je  $D = 50\%$ , tak je střední hodnota napětí i proudu rovna nule. Pokud budeme snižovat střidu D pod 50%, bude střední hodnota napětí na motoru záporná a motorem bude procházet proud v záporné polaritě. V tento moment se motor začne rozbíhat opačně. Pokud budeme střidu zvětšovat, napětí poroste do kladných hodnot a motorem bude procházet proud v kladném směru.

## 5.2 Dvuhodnotová regulace

Dvuhodnotová regulace je nejrozšířenější a nejjednodušším typem regulace vůbec. Lze se s ní setkat i v domácích spotřebičích. Jedná se například o regulaci teploty žehličky, chladničky a podobně. Podstatou dvuhodnotové regulace je udržovat regulovanou veličinu mezi horní a dolní mezní hodnotou.

Pro řízení motoru při trakčním využití je vhodnější řídit proud motoru nikoliv otáčky. Při řízení otáček může docházet ke skokům momentu a škubání celé poháněné soustavy, podle toho jak bude reagovat regulátor otáček. Vhodnější je řídit přímo proud a tedy moment motoru. Toto řešení je velice jednoduché, dostatečně přesné a vhodné zvláště pro analogovou regulaci, v případě číslicové musí být dostatečná vzorkovací frekvence A/D převodníků. V základním principu bohužel toto řešení vede na PWM s proměnou frekvencí spínání, v krajní mezi může dosáhnout limitu spínání výkonových prvků. Dále také kolísavá spínací frekvence vede k problematické filtraci elektromagnetického rušení.

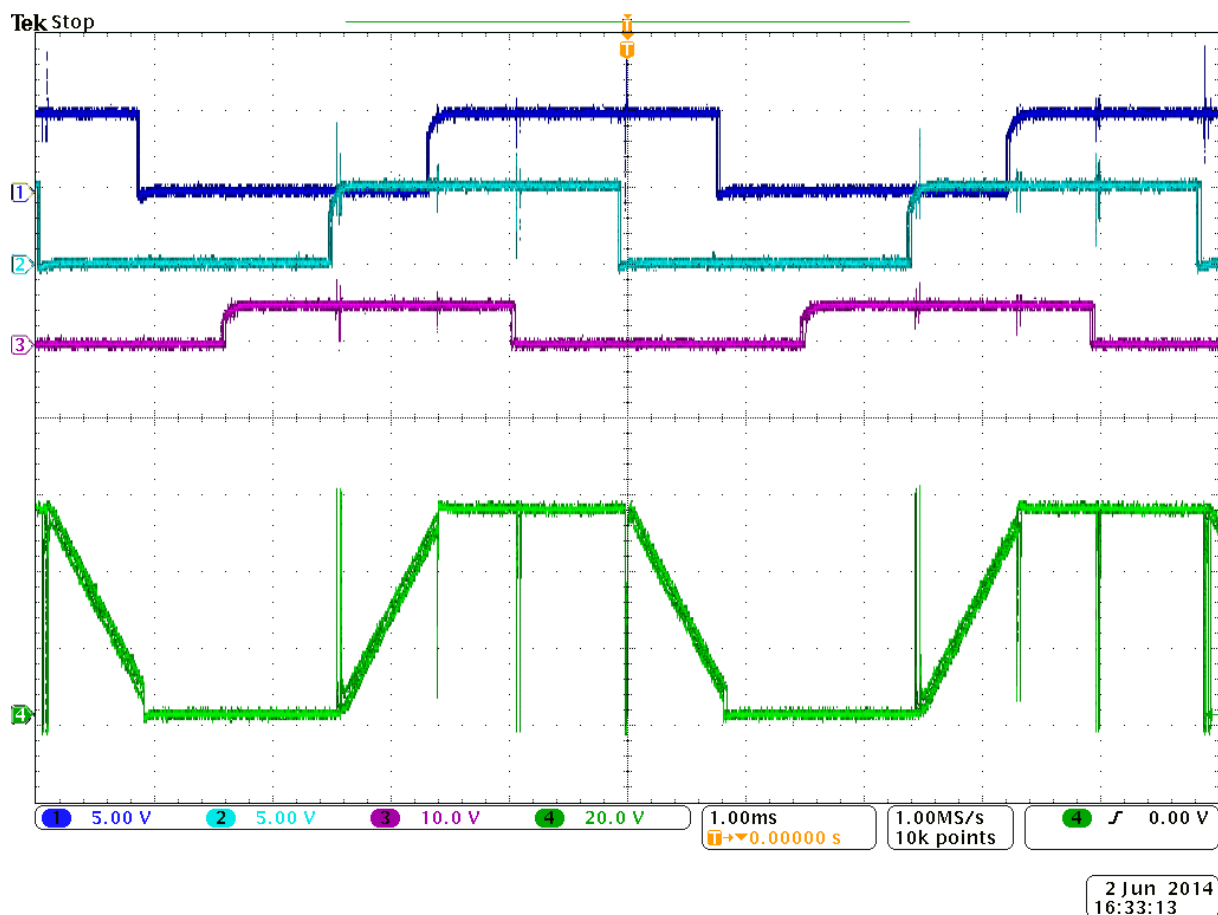
V případě číslicového řízení není problém omezit spínací frekvenci na vhodně zvolenou maximální hodnotu. V každé periodě přečteme aktuální hodnotu proudu v aktivní fázi pomocí A/D převodníku a porovnáme ji s námi zvolenou horní a spodní mezí. Pokud je proud větší než horní mez, tak tranzistory vypneme a necháme proud exponenciálně klesat tak dlouho, dokud aktuální hodnota z A/D převodníku nebude menší než spodní regulační mez, kdy tranzistory opět sepneme.

## 6. Vlastní návrh střídače

### 6.1 Naměřené hodnoty z továrního budiče

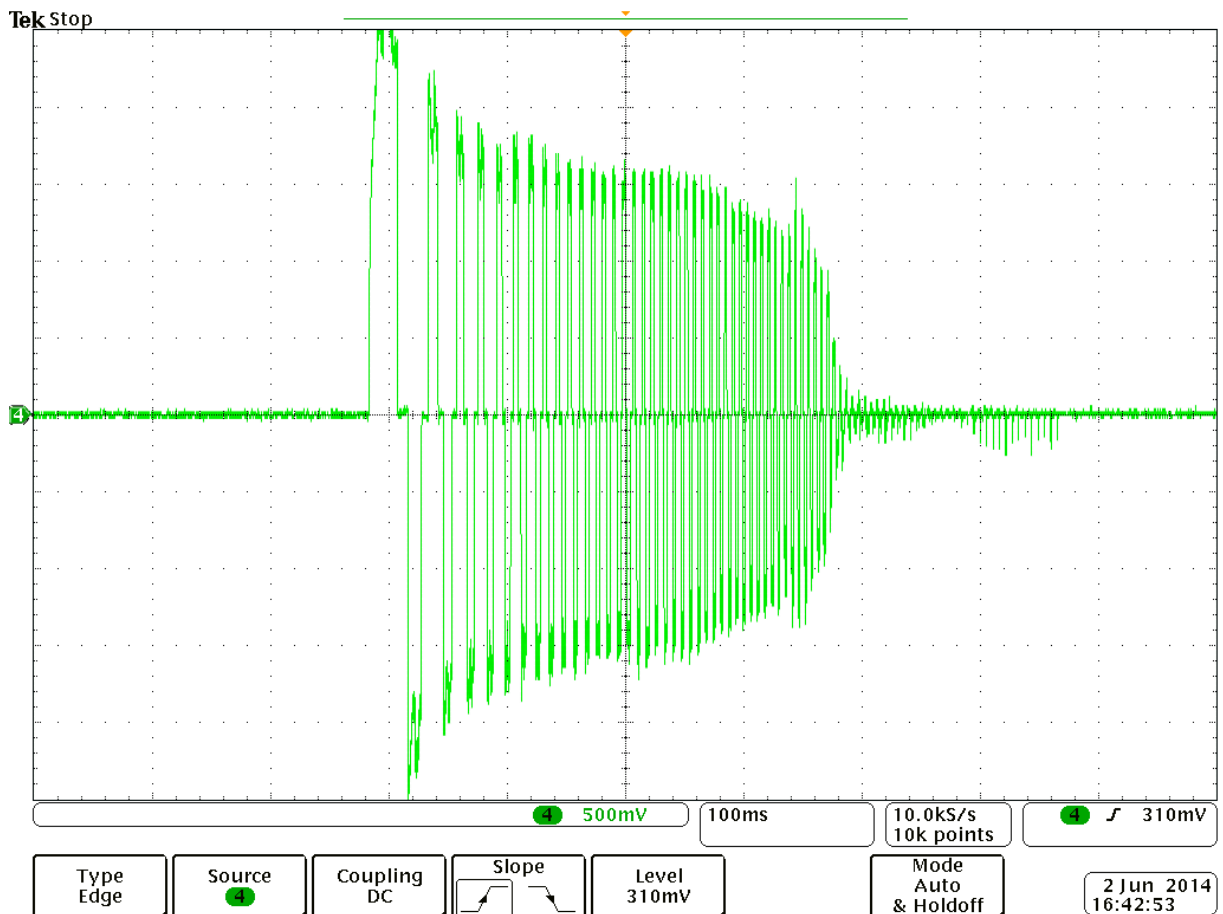
K zakoupenému motoru jsme dostali i tovární budič, kterým se má napájet. Tento budič jsme využili pro změření - frekvence na jaké budič pracuje, maximálního proudu, který bychom neměli překročit a sledu fází vůči Hallovým sondám.

Hallové sondy jsou typu open collector, při návrhu desky se s tím musí počítat a osadit vstupy pull-up odpory. Odečtením počtu pulzů na jednotlivých výstupech jsme zjistili, že motor má 24 pólů. Na obrázku jsou vidět jednotlivé signály z Hallových sond.

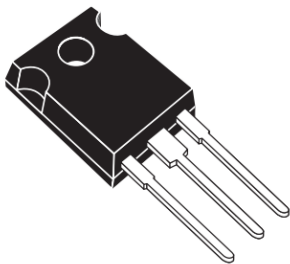


Obrázek 6-1 Výstupy z Hallova sensorů motoru

Jako další jsme měřili maximální proud motorem, který bychom neměli překročit z důvodu možného přehřátí feritových magnetů na rotoru. Je zde vidět průběh proudu jednou fází motoru při rozjezdu „s plným plynem“ na koloběžce. Je zde vidět 25A špička, na kterou je celý střídač také stavěn.



## 6.2 Tranzistor



**TO-247**

Obrázek 6-2 Pouzdro tranzistoru TO247 [13]

Výběr tranzistoru již byl popsán výše ve čtvrté kapitole. Jedná se tedy o MOSFET tranzistor s velice nízkým odporem kanálu v sepnutém stavu. Dle parametrů, které vidíme níže ve vybraných hodnotách z katalogového listu, můžeme vyčíst maximální trvalý proud 40A při 25°C teploty tranzistoru. I při maximální teplotě 100°C, které by se v našich podmínkách nikdy nemělo dosáhnout, tranzistor splňuje požadavek

minimálního proudu 25A. Maximální ztráta čipu je stanovena na 160W, ke které se ani zdaleka v provozu nepřiblížíme.

Symbol	Parameter	Value			Unit			
		TO-220 D <sup>2</sup> PAK TO-247	TO-220FP					
$V_{DS}$	Drain-source voltage ( $V_{GS} = 0$ )	200			V			
$V_{GS}$	Gate- source voltage	$\pm 20$			V			
$I_D^{(1)}$	Drain current (continuous) at $T_C = 25^\circ\text{C}$	40			A			
$I_D^{(1)}$	Drain current (continuous) at $T_C = 100^\circ\text{C}$	25			A			
$I_{DM}^{(2)}$	Drain current (pulsed)	160			A			
$P_{tot}$	Total dissipation at $T_C = 25^\circ\text{C}$	160	40		W			
$R_{DS(on)}$	Static drain-source on resistance	$V_{GS} = 10\text{V}, I_D = 20\text{A}$		0.038	0.045	$\Omega$		
$R_{thj-case}$	Thermal resistance junction-case max	0.78		3.1		$^\circ\text{C/W}$		
Symbol	Parameter	Test conditions			Min.	Typ.	Max.	Unit
$C_{iss}$	Input capacitance	$V_{DS} = 25\text{V}, f = 1\text{MHz},$ $V_{GS} = 0$				2500		pF
$C_{oss}$	Output capacitance					510		pF
$C_{rss}$	Reverse transfer capacitance					78		pF
$t_{d(on)}$	Turn-on delay time	$V_{DD} = 100\text{V}, I_D = 20\text{A}$ $R_G = 4.7\Omega, V_{GS} = 10\text{V}$ (see <a href="#">Figure 17</a> )				20		ns
$t_r$	Rise time					44		ns
$t_{d(off)}$	Turn-off delay time					74		ns
$t_f$	Fall time					22		ns
$Q_g$	Total gate charge	$V_{DD} = 160\text{V}, I_D = 40\text{A},$ $V_{GS} = 10\text{V}$ (see <a href="#">Figure 18</a> )				75		nC
$Q_{gs}$	Gate-source charge					13.2		nC
$Q_{gd}$	Gate-drain charge					35.5		nC

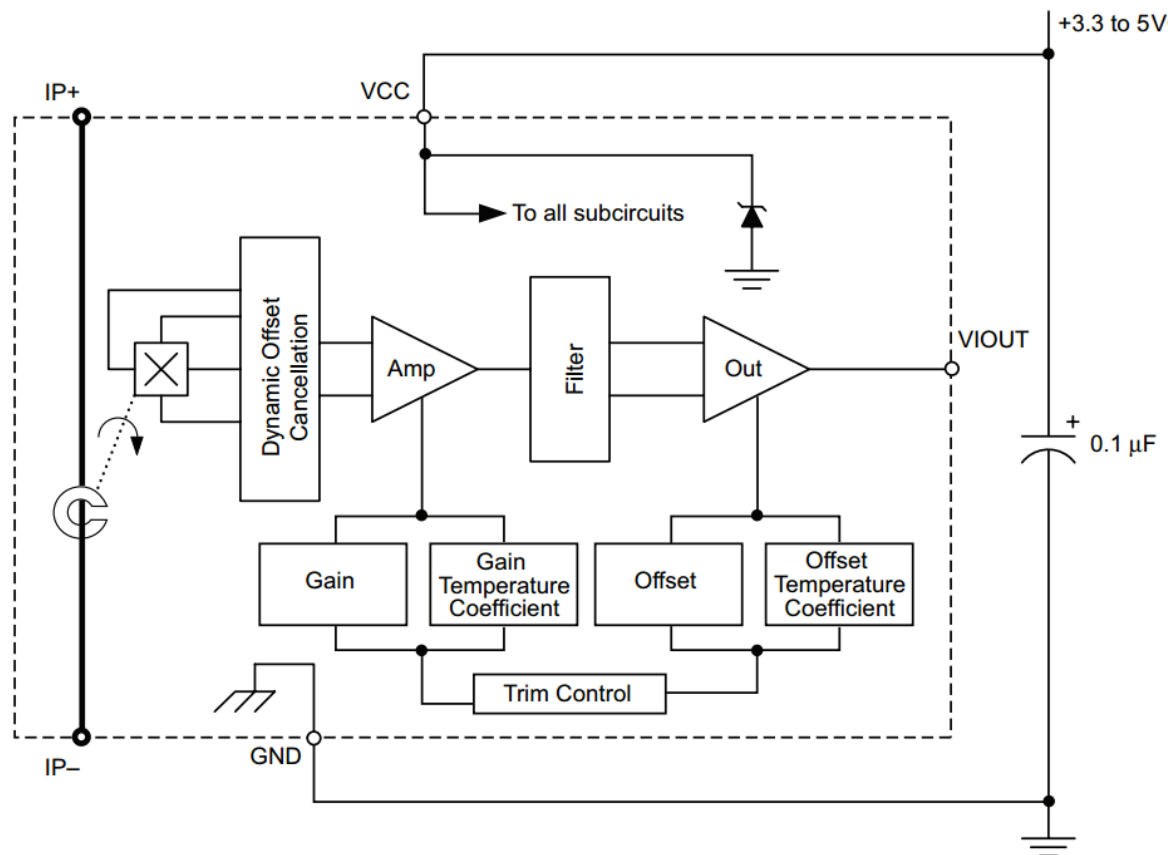
Obrázek 6-3 Vybrané hodnoty z katalogového listu [13]

### 6.3 Proudová čidla

Firma Allegro Microsystems vyrábí vhodná čidla z rodiny ACS758xCB. Tato čidla jsou přímo konstruována pro měření proudu ve střídačích ovládaných mikro procesorem. Proud měří na základě Hallova efektu, takže je výstupní část galvanicky oddělena od té silové. Čidlo je plně integrované, takže se uvnitř nachází tepelná kompenzace, filtry šumu, ochrany před vysokým  $dU/dt$  a tvarovače signálu, tak aby výstupní signál měl přesně definovanou lineární charakteristiku, a podporují napájení napětím 3,3V. Námí zvolené čidlo ACS758LCB-050B-



PFF-T podporuje bipolární směr proudu až do hodnoty  $\pm 50\text{A}$ . Citlivost čidla je  $40\text{mV/A}$  vzhledem k bipolárnímu směru proudu, nulový proud tekoucí skrz čidlo je reprezentován napětím  $U_{cc}/2$  na výstupu.



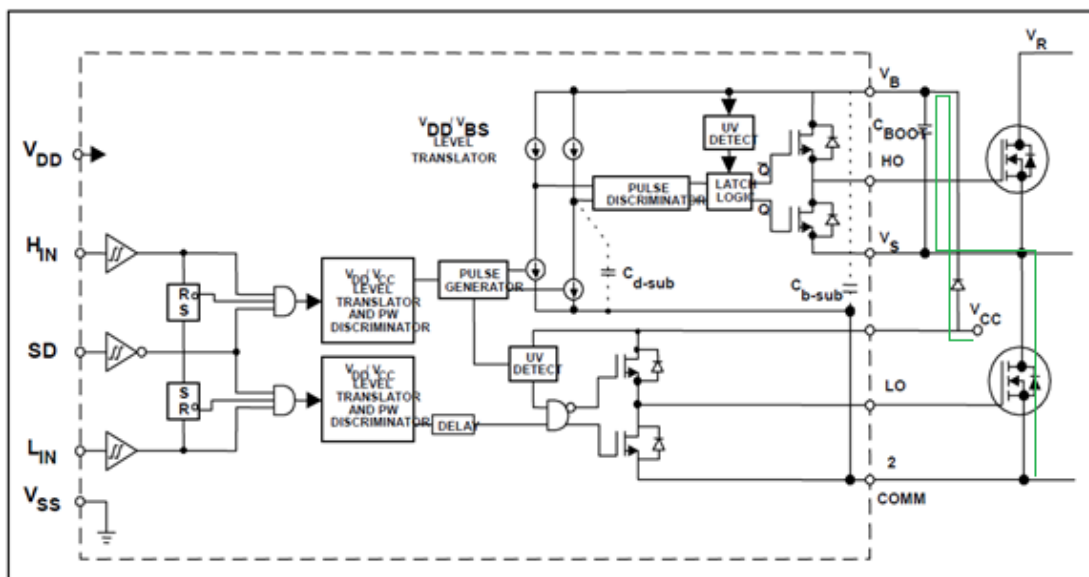
Obrázek 6-4 Blokové schéma čidla proudu [14]

## 6.4 Gate driver

Při návrhu střídače vyvstává jeden ze zásadních problémů, a to jak řešit buzení tranzistorů v jednotlivých polomostech. Buzení spodního tranzistoru je bezproblémové, protože jeho source vývod je spojen se zemí a tak napětí na gate je opřeno vůči zemi. Problém nastává při buzení horního tranzistoru. Jeho source vývod není spojen se zemí. Pro otevření MOSFET tranzistoru je nutno, aby gate měl minimálně o  $12\text{V}$  vyšší napětí, než je potenciál na source vývodu. V momentě spínání má source potenciál napájecího napětí, proto pro sepnutí tranzistoru musíme na gate přivést signál s napětím baterie zvýšené o  $15\text{V}$ . Existuje několik variant, které se liší komplikovaností zapojení a svými vlastnostmi.

Jedna z možností jakým stylem budít hradla tranzistorů je využít integrovaný

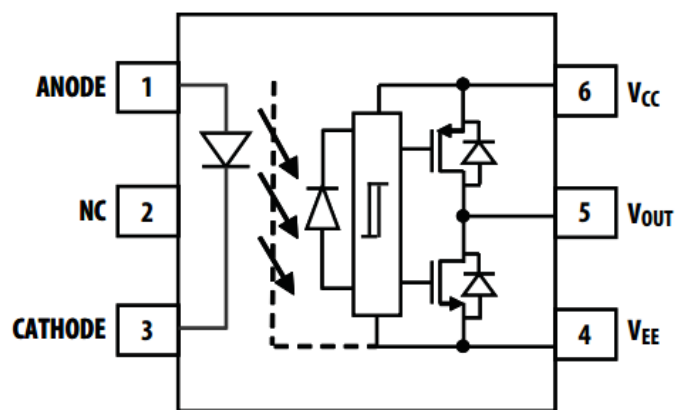
„high/low - side driver“, který se doplní jen o pár externích součástek. Tyto integrované obvody pro napájení vrchního budiče využívají nábojovou pumpu. Toto zapojení je hojně využíváno pro jeho jednoduchost a aplikovatelnost na většinu zapojení. Jedním z nejznámějších IO této kategorie je asi IR2110 a jeho více či méně výkonné dvojčata. Blokové schéma vidíte na obrázku níže. Princip, na kterém toto zapojení funguje, je že jako první se sepne spodní tranzistor.  $C_{BOOT}$  se nabije po zeleně vyznačené cestě na napětí  $V_{CC}$  typicky 15V. Při druhé periodě, kdy chceme sepnout vrchní tranzistor, se chová jako zdroj napětí pro výstupní polomůstek gate driveru. Spodní tranzistor je v tuto chvíli vypnut, a tudíž záporný pól kondenzátoru není opřený o zem, ale o source vrchního tranzistoru.



Obrázek 6-5 Blokové schéma IR2110 [15]

Pro buzení hradel tranzistorů jsem vybral speciální optočlen ACPL-P341, který je přímo navrhnut pro buzení hradel výkonových tranzistorů. Optočlen zajišťuje galvanické oddělení řídicího obvodu od toho výkonového. Na výstupu jsou výkonové tranzistory, které dokážou do hradla dodat špičkový proud až 3A. Pro napájení budičů vrchních tranzistorů jsem zvolil samostatné DC/DC měniče, které napájí tyto optočleny. Tím je zajištěno trvalé napájení pro vrchní tranzistor bez ohledu na způsob řízení, jako je tomu například při napájení z nábojové pumpy.

### Functional Diagram

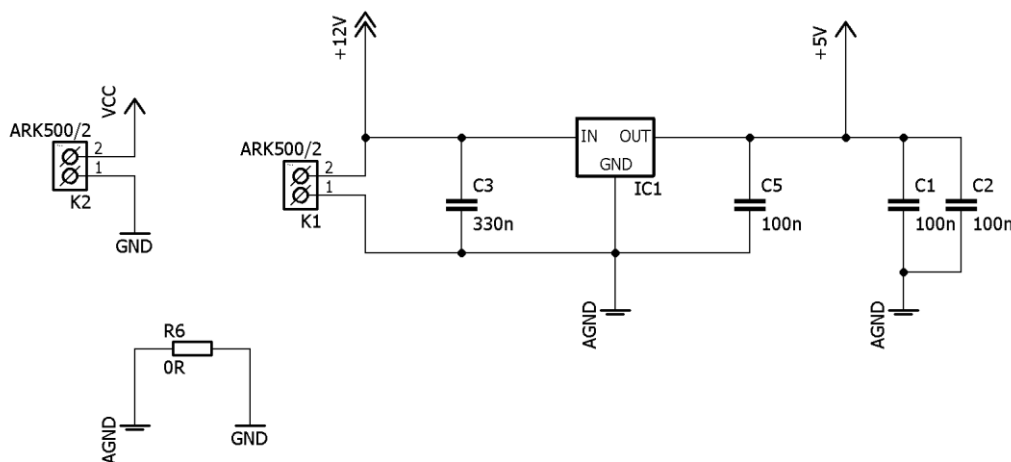


Obrázek 6-6 Blokové schéma obvodu ACPL-P341 [16]

## 6.5 Návrh schématu

Celé schéma je rozděleno na tři základní bloky. Je to napájecí část, část s mikroprocesorem, která se stará o řízení střídače a výkonová část, kde jsou osazeny spínací tranzistory, proudová čidla a budiče.

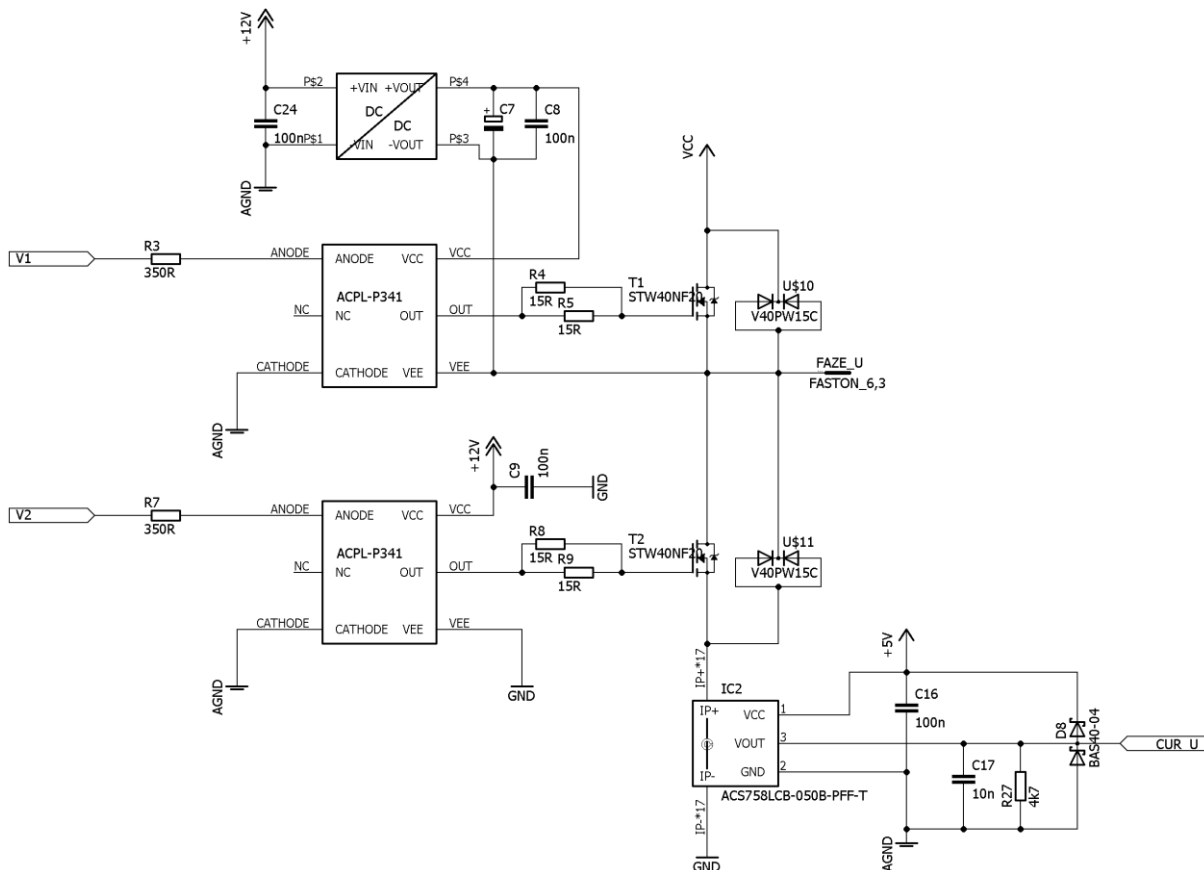
Napájení vnitřních obvodů je zajištěno externím 15V zdrojem, který napájí gate drivery ACPL a lineární stabilizátor LM7805. Ten napájí procesor a proudová čidla. Svorkovnice K2 je hlavní silový přívod pro střídač. Odpor R6 je propojení signálové a výkonové země pouze v jednom uzlu, tak aby nedocházelo k rušení. Kondenzátory C1 a C2 jsou blokovací kondenzátory pro mikroprocesor.



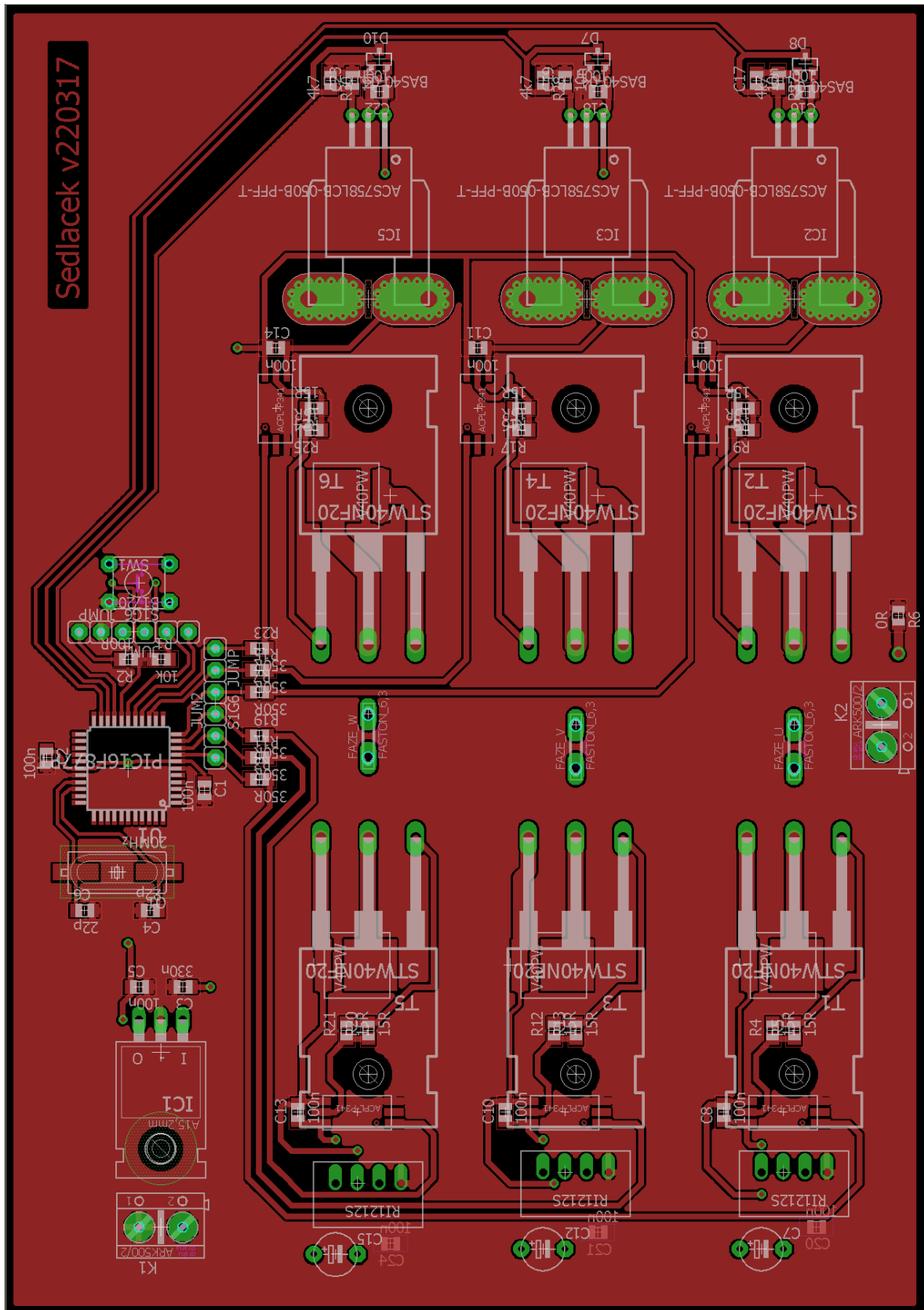
Obrázek 6-7 Schéma napájecí části



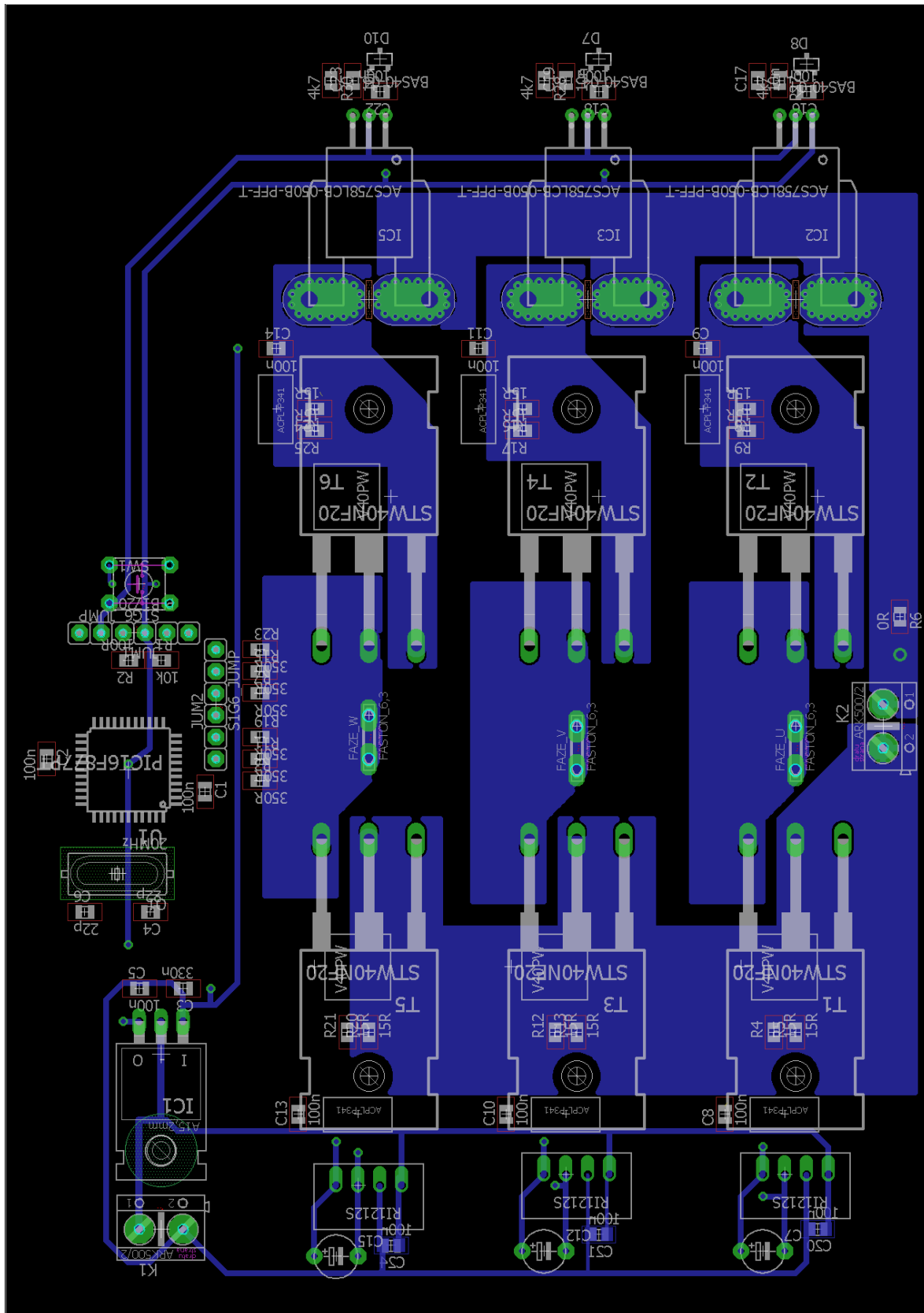
Na obrázku 6-9 je vidět jeden polomost střídače. O buzení tranzistorů se stará optočlen ACPL, kde horní optočlen je napájen z pomocného DC/DC měniče, který obstarává galvanické oddělení napájení pro vrchní tranzistor. Spodní tranzistor je připojen na 15V vstup napájení. Výstup z proudových čidel je osazen filtrem, pro danou frekvenci proudu. Výstup je blokován proti zemi a proti napájení 5V diodami, tak aby se v případě poruchy čidla nedostalo nebezpečné napětí na A/D převodníky.



Obrázek 6-9 Schéma výkonové části

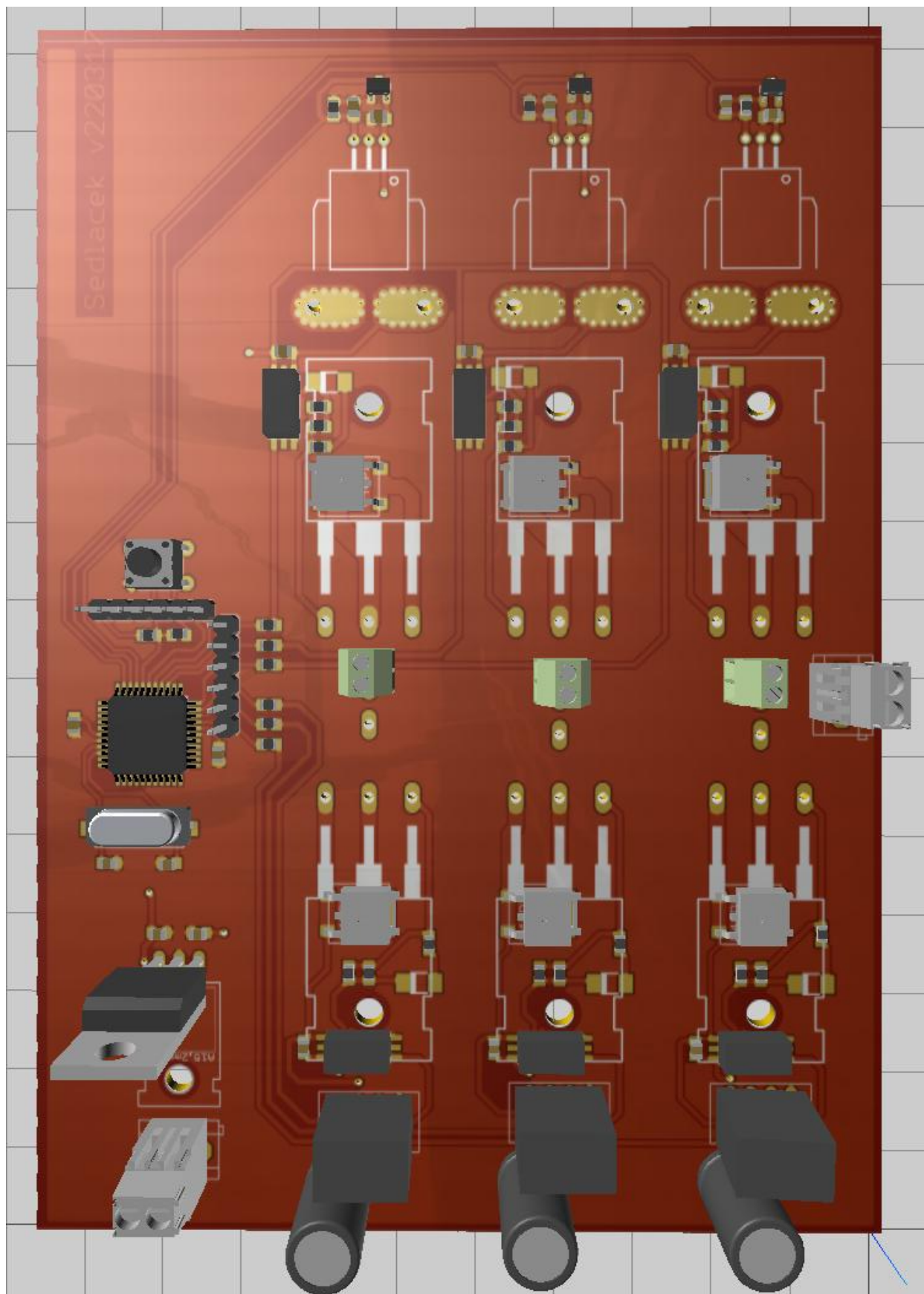


Obrázek 6-10 Top vrstva střídače

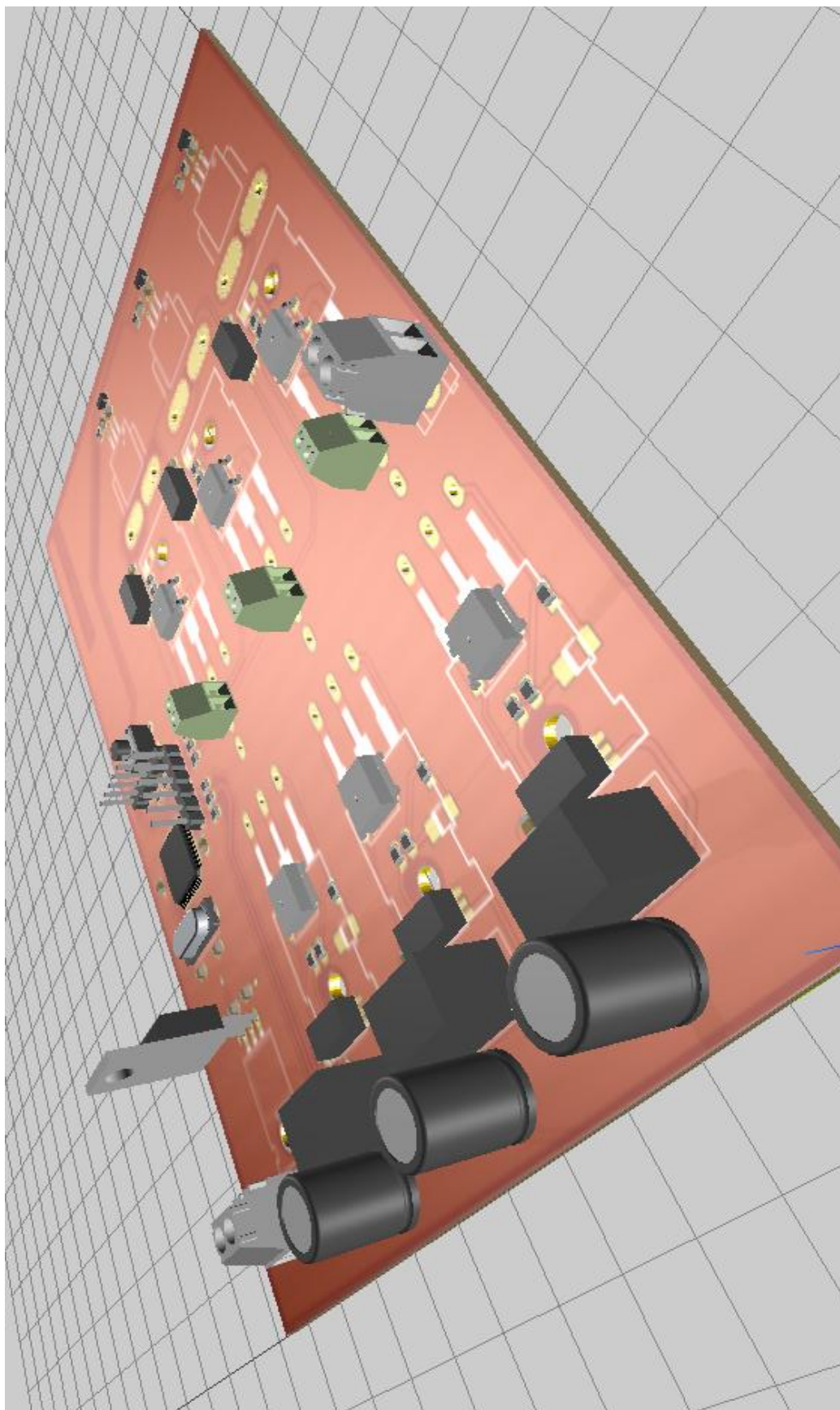


Obrázek 6-11 Bottom vrstva střídače





Obrázek 6-12 3D model desky střídače, pohled na vrstvu Bottom [17]



Obrázek 6-13 3D model desky střídače, pohled z boku [17]

## 7. Měření a simulace

### 7.1 Simulace oteplení tranzistoru

Protože přes tranzistor neprochází DC proud, ale je provozován v časově proměnných stavech, je třeba brát v potaz určitý rozkmit teploty čipu, v závislosti jestli tranzistorem zrovna teče proud nebo ne. Tato kontrola by byla velice složitá na analytický výpočet, a tak je nasimulován v programu Matlab. Bohužel pro tento typ tranzistoru není v katalogovém listu uvedeno přesné tepelné schéma součástky. Proto místo několikanásobného  $\tau$  článku, jimž se tranzistor při simulacích nahrazuje, jsem nucen zjednodušit tranzistor pouze na odpor čip – chladič, uvedeného v katalogovém listu. Nicméně tepelné kapacity objevující se v pouzdře chladiče, jsou zanedbatelné oproti tepelné kapacitě velkého chladiče.

Uvažujme parametry tepelného schématu:

Tepelný odpor chladiče

$$R_{thr} = 0,2 \text{ K/W}$$

Hmotnost chladiče

$$m_h = 3495 \text{ g hmotnost chladiče}$$

Tepelná kapacita chladiče

$$C_{thr} = \rho_{cu} * m = 3495 * 1,249 = 4365,25 \text{ J/W}$$

Tepelný odpor teplovodivé silikonové pasty

$$R_{thp} = 0,0004 \text{ K/W}$$

Tepelný odpor slídové podložky

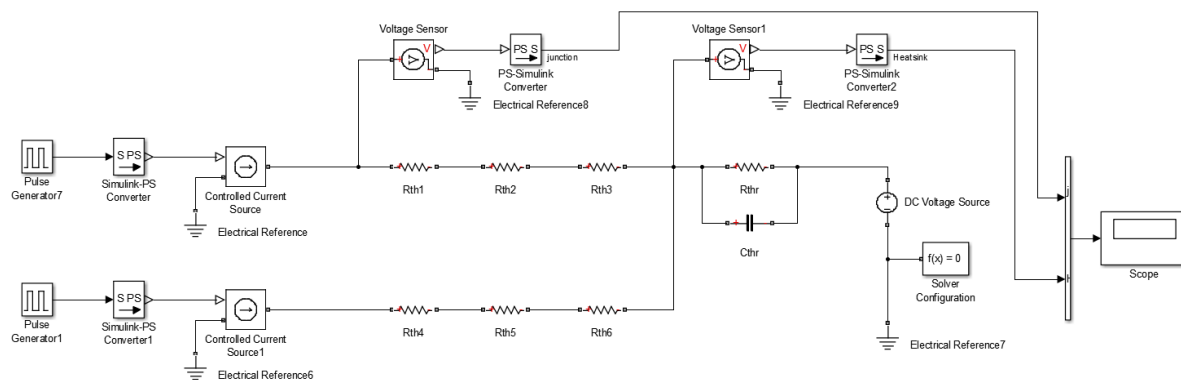
$$R_{this} = 0,8 \text{ K/W}$$

Tepelný odpor tranzistoru

$$R_{thp} = 0,78 \text{ K/W}$$

Celkové ztráty jednoho tranzistoru

$$P_{tot} = 23,13 \text{ W}$$



Obrázek 7-1 Schéma tepelné simulace v Matlabu

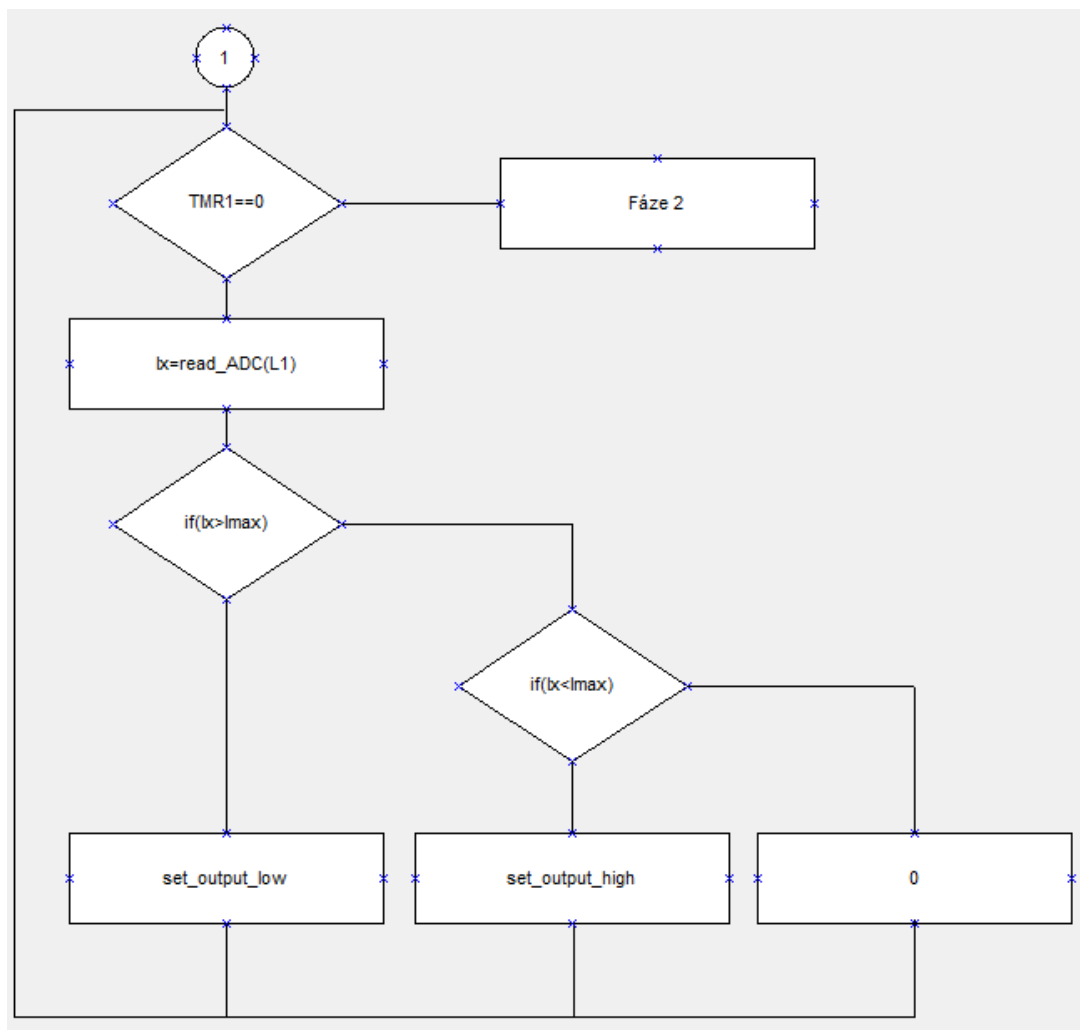


Obrázek 7-2 Nasimulovaný průběh teploty

## 7.2 Oživení střídače

Po osazení byla deska budiče postupně ožívána. Nejdříve byl připojen na napájení procesor skrze programátor PicKit2. Po ověření jeho funkčnosti se připojily k napájení i budiče tranzistorů a změřily se průběhy napětí na gatech tranzistorů.

Po ověření funkčnosti celé desky střídače, byl do procesoru naprogramován jednoduchý řídicí obvod, který měl simulovat částečně provozní podmínky střídače. Vycházel jsem z předpokladu, že při provozu střídače se vždy ovládání rozpadne na klasický Hmost a třetí fáze je v této době vypnutá. Proto jsem do procesoru naprogramoval jen řízení jednoho Hmostu, ve kterém se cyklicky po 13.1ms přepíná proud v kladné a záporné polaritě v jedné fázi motoru. Program funguje dle vývojového diagramu zobrazeném na *obrázku 7-3*. V každé periodě, která trvá 200us přečte hodnotu proudu z A/D převodníku a porovná jí se zadanými mezemi proudu, mezi nimiž se chceme pohybovat. Toto je jednoduchá dvouhodnotová regulace proudu, která by v třífázové variantě byla realizována na koloběžce.



Obrázek 7-3 Vývojový diagram řídicího programu

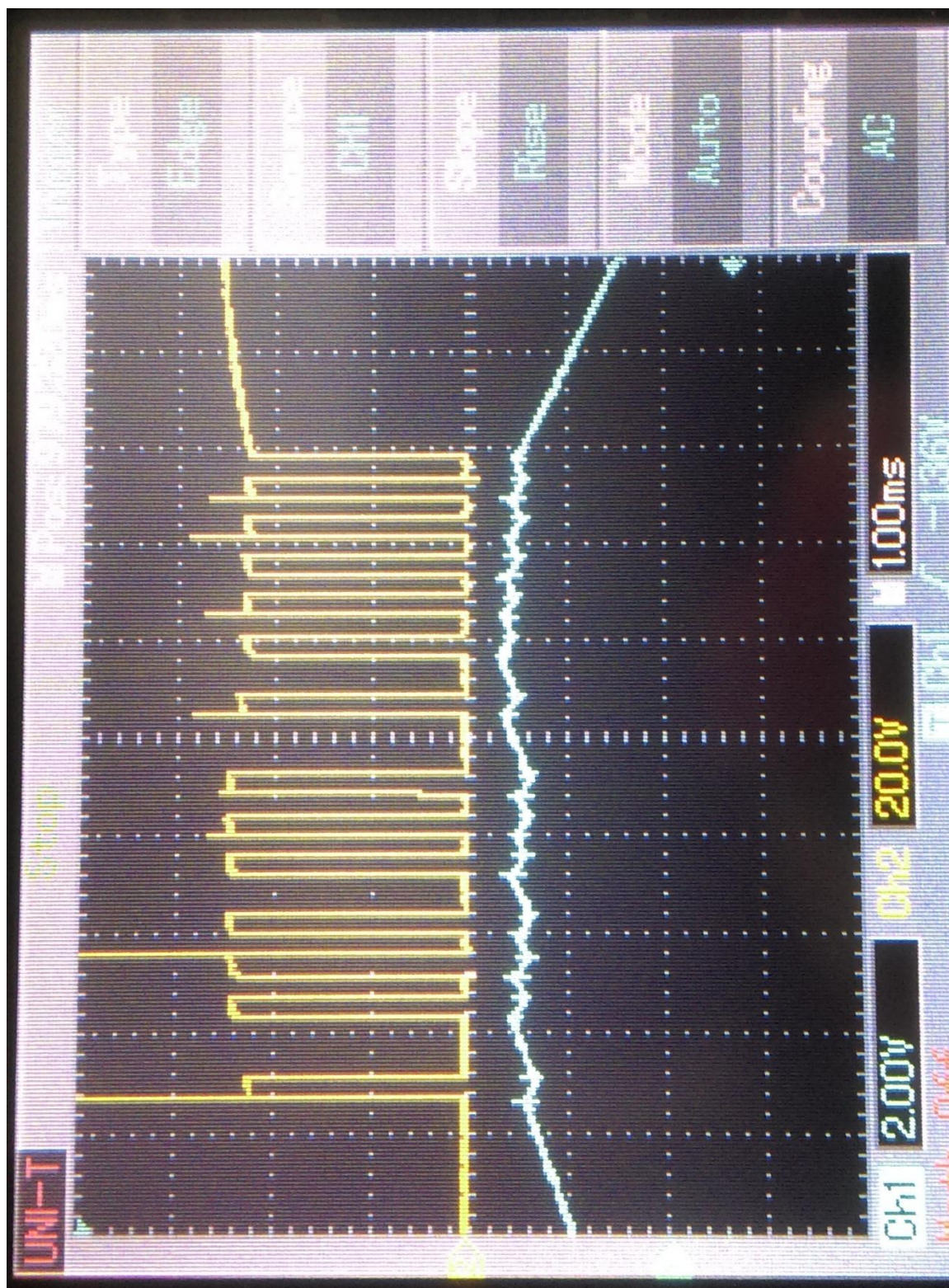


V domácích podmínkách jsem driver testoval s menším zdrojem, jehož výstupní proud 7A stejnosměrných a maximální výstupní napětí 42V. Jako zátěž byly použity tři paralelně zapojené tlumivky k sodíkovým výbojkám. Každá z výbojek má indukčnost 330mH a odpor 8ohmů. Naměřené průběhy dvouhodnotové regulace jsou vidět na následujících obrázcích.



Obrázek 7-4 Průběh proudu a napětí na zátěži





Obrázek 7-5 Detail dvouhodnotové regulace proudu

## 8. Závěr

Cílem této práce bylo sestavit střídač pro BLDC motor, který bude pohánět výstavní elektrokoloběžku katedry KEV na ZČU. Hlavní částí práce bylo navrhnout výkonové schéma vhodné pro tento typ měniče, vybrat vhodné součástky a nakreslit desku plošného spoje, tak aby výkonové části obvodu nerušily mikroprocesorovou část řízení. Tyto body byly splněny a funkčnost driveru byla ověřena v domácích podmínkách. Naměřené průběhy proudů a napětí jsou na *obrázcích 7-4 a 7-5*. Dle *obrázku 7-5* je vidět, že regulační smyčka funguje a drží konstantní velikost proudu zátěží na 3A. Bohužel v laboratorních podmínkách budič selhal a zničily se A/D převodníky na mikroprocesoru. Toto mohlo být způsobeno špatným návrhem desky střídače, kdy se do signálových cest mohlo naindukovat nebezpečné napětí. Případně vedením dlouhých vodičů do odporů.

Z důvodu špatného odhadu časové náročnosti tohoto složitého projektu, jsem nestihl opravit střídač a z toho důvodu nejsou v diplomové práci obsaženy průběhy proudu při plném zatížení a ověření dlouhodobější funkčnosti. Toto bylo ovlivněno taktéž značnými problémy, při programování řídicího systému do mikroprocesoru, kdy jsem nepředpokládal, že toto bude součástí mé diplomové práce.



## 9. Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/766> [květen 2017]
- [2] [http://www.electrooobs.com/eng\\_circuitos\\_tut7.php](http://www.electrooobs.com/eng_circuitos_tut7.php) [květen 2017]
- [3] <http://www.techpark.sk/technika-92009/ECmotory.html> [květen 2017]
- [4] Reichl J., Všetická M. Hallův jev. *Encyklopedie fyziky*[Online] 2006-2017. [Citace: květen 2017]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/294-halluv-jev>.
- [5] [http://www.wikiskripta.eu/index.php/Soubor:Hallův\\_jev\\_b.jpg](http://www.wikiskripta.eu/index.php/Soubor:Hallův_jev_b.jpg) [květen 2017]
- [6] <http://senzory.aspone.cz/ois.htm> [květen 2017]
- [7] <https://www.digikey.com/en/articles/techzone/2013/jun/controlling-sensorless-bldc-motors-via-back-emf> [květen 2017]
- [8] [http://www.nxp.com/documents/application\\_note/AN10661.pdf](http://www.nxp.com/documents/application_note/AN10661.pdf) [květen 2017]
- [9] <https://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/746> [květen 2017]
- [10] <http://insights.globalspec.com/article/994/how-electric-current-sensor-technology-works> [květen 2017]
- [11] Vorel P., Potočka M. Budiče výkonových tranzistorů MOSFET a IGBT. *Elektrorevue*[Online] 2004. [Citace: květen 2017]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/04030/index.html>.
- [12] <https://www.educon.zcu.cz/view.php?cislomodulu=2005022203> [květen 2017]
- [13] [http://www.farnell.com/datasheets/1718578.pdf?\\_ga=1.94304285.1052204104.1489000723](http://www.farnell.com/datasheets/1718578.pdf?_ga=1.94304285.1052204104.1489000723) [květen 2017]
- [14] [http://www.farnell.com/datasheets/1927450.pdf?\\_ga=2.265426831.1655419282.1495382948-1052204104.1489000723](http://www.farnell.com/datasheets/1927450.pdf?_ga=2.265426831.1655419282.1495382948-1052204104.1489000723) [květen 2017]
- [15] [http://www.farnell.com/datasheets/81026.pdf?\\_ga=2.29120764.1972873439.1495383126-1052204104.1489000723](http://www.farnell.com/datasheets/81026.pdf?_ga=2.29120764.1972873439.1495383126-1052204104.1489000723) [květen 2017]
- [16] [http://www.farnell.com/datasheets/1676974.pdf?\\_ga=2.68538769.1496460577.1493749695-1052204104.1489000723](http://www.farnell.com/datasheets/1676974.pdf?_ga=2.68538769.1496460577.1493749695-1052204104.1489000723) [květen 2017]
- [17] <http://3dbrdviewer.cytec.bg> [květen 2017]

## 10. Seznam obrázku

Obrázek 2-1 Princip činnosti DC motoru [1] .....	10
Obrázek 3-1 Inrunner a outrunner motor [2].....	11
Obrázek 3-2 Řez BLDC motorem [3] .....	12
Obrázek 3-3Popis Hallova jevu [5] .....	14
Obrázek 3-4 Stínící destička s binárním kódem [6] .....	15
Obrázek 3-5 Jednoduchý způsob měření BEMF [7].....	16
Obrázek 3-6 Komutační schéma střídače [8] .....	16
Obrázek 4-1 Umístění bočnicku [9].....	20
Obrázek 4-2 Řez Hallova čidlem [10].....	21
Obrázek 4-3 Plovoucí buzení obou tranzistorů [11] .....	22
Obrázek 4-4 Buzení pomocí nábojové pumpy [11] .....	23
Obrázek 5-1 Rozdělení práce na pohonu .....	24
Obrázek 5-2 Zapojení silového obvodu [12].....	25
Obrázek 5-3 Řídicí signály PWM [12] .....	26
Obrázek 5-4 Směry proudů u unipolárního řízení.....	27
Obrázek 5-5 Směry proudů u bipolárního řízení.....	28
Obrázek 6-1 Výstupy z Hallova senzorů motoru .....	30
Obrázek 6-2 Pouzdro tranzistoru TO247 [13].....	31
Obrázek 6-3 Vybrané hodnoty z katalogového listu [13] .....	32
Obrázek 6-4 Blokové schéma čidla proudu [14].....	33
Obrázek 6-5 Blokové schéma IR2110 [15].....	34
Obrázek 6-6 Blokové schéma obvodu ACPL-P341 [16] .....	35
Obrázek 6-7 Schéma napájecí části.....	36
Obrázek 6-8 Schéma řídicí části.....	37
Obrázek 6-9 Schéma výkonové části .....	38
Obrázek 6-10 Top vrstva střídače .....	39
Obrázek 6-11 Bottom vrstva střídače .....	40
Obrázek 6-12 3D model desky střídače, pohled na vrstvu Bottom [17] .....	41
Obrázek 6-13 3D model desky střídače, pohled z boku [17] .....	42
Obrázek 7-1 Schéma tepelné simulace v Matlabu .....	44
Obrázek 7-2 Nasimulovaný průběh teploty.....	44
Obrázek 7-3 Vývojový diagram řídicího programu .....	45
Obrázek 7-4 Průběh proudu a napětí na zátěži.....	46
Obrázek 7-5 Detail dvouhodnotové regulace proudu.....	47

