

**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 byly provedeny simulace oteplení součástek při plném zatížení motoru. Dále bylo nakresleno schéma střídače a navrhnutá deska silové části střídače a přídavné logiky. Deska střídače byla nakreslena ve čtyř vrstevném sendvičovém provedení kvůli eliminaci parazitních kapacit a indukčností.

## **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

<b>OBSAH</b> .....	<b>7</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>8</b>
<b>1 ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>2 BLDC MOTOR</b> .....	<b>10</b>
<b>3 DIMENZOVÁNÍ SOUČÁSTEK STRÍDAČE</b> .....	<b>13</b>
<b>4 NÁVRH STRÍDAČE</b> .....	<b>18</b>
4.1 POLOMŮSTEK.....	18
4.2 H-MOST .....	19
4.3 ZAPOJENÍ DO HVĚZDY .....	20
4.4 ZAPOJENÍ DO TROJÚHELNÍKA .....	21
4.5 BUDIČ POLOMOSTŮ STRÍDAČE .....	22
4.6 PROUDOVÉ ČIDLA .....	26
4.7 NAPÁJECÍ ZDROJE .....	27
4.8 STRÍDAČ .....	29
4.9 ZÁSTAVBOVÁ KRABICE.....	32
<b>5 ZÁVĚR</b> .....	<b>33</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>34</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK</b> .....	<b>35</b>

## **Seznam symbolů a zkratk**

Brushless, BLDC	Bezkartáčový stejnosměrný motor
HVAC	heating, ventilating, air conditioning, vytápění, ventilace a klimatizace
DC	Direct current, stejnosměrný
AC	Alternating current, střídavý
GDT	Gate drive transformer
BEMF	Zpětné indukované napětí
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
Bootstrap	Kondenzátor nábojové pumpy



# 1 Úvod

Tato práce se zabývá kompletním návrhem elektrokoloběžky. Mezi nejdůležitější body práce patří analýza elektrického pohonu elektrokoloběžky, návrh výkonového obvodu s dimenzováním součástek a praktická realizace prototypu koloběžky.

Historie stejnosměrných motorů ze kterého BLDC motor vychází, sahá už k prvním motorům vůbec a tudíž v pohonářské praxi jsou velkou skupinou. Díky svým vlastnostem jsou pro některé aplikace vhodnější než střídavé motory. Jak tomu ale bývá, všechno je vykoupeno určitými nedostatky. Klasické stejnosměrné stroje jsou limitovány svými komutátory a problémy s nimi spojenými. Proto se po dostatečném vývoji spínací elektroniky přešlo na elektricky komutovaný motor. 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 mezeře. U BLDC motoru je magnetické pole lichoběžníkové a u BLAC je sinusové.

## 2 BLDC motor

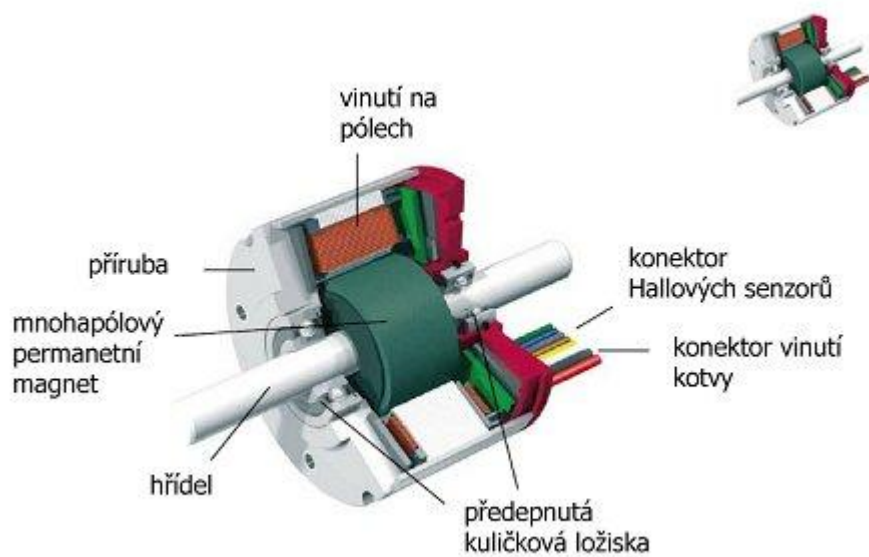
Kartáčový stejnosměrný motor obsahuje grafitové kartáče, které přenášejí proud na rotující komutátor, ze kterého je napájeno rotorové vinutí. Veškerý výkon motoru se tak musí přenést přes kluzný kontakt uhlík – komutátor. Při vysokých proudech dochází k natahování oblouků mezi lamelami komutátoru a tím 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 do ostatních spotřebičů a ovlivňuje tak elektromagnetickou kompatibilitu.

Bezkartáčový stejnosměrný motor je účinnější a bezúdržbovou 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 neodým-železo-bor. Stator je tvořen 3f vinutím, většinou spojeným do hvězdy bez vyvedeného středu. Tím, že se otáčí nenapájená část stroje, se snižuje hluk, který vytváří komutátor a prodlužuje se životnost. BLDC motory se vyrábějí jako dvou a více pólové, podle požadovaných otáček. Komutaci je potřeba zajišťovat elektronicky a to vhodným napájením ze střídače. K tomu je potřeba znát polohu rotoru. Poloha rotoru se zjišťuje dvěma hlavními způsoby. Motory se konstruují buďto jako senzorové nebo bezsenzorové. Senzorové motory mají v sobě zabudovanou trojici Hallových sond, které dávají na svých výstupech informaci o poloze rotoru. Tato konstrukce je dražší, ale přesnější a hlavně dává informaci o poloze rotoru i v případě, že se motor neotáčí. V nízkonákladových aplikacích anebo v aplikacích, kde nejsou kladeny vysoké nároky na pohon, se s výhodou využívají bezsenzorové motory. U takových motorů se využívá tzv. sensorless řízení. Při takovémto řešení je řídicí jednotka doplněna o vhodné měřicí členy a měří se BEMF na volné fázi, která není zrovna připojena ke zdroji.

Mezi další výhody BLDC motoru patří vysoký poměr momentu ku váze stroje a vysoký poměr momentu ku výkonu.

BLDC motor se v posledních letech rozšiřuje do velkého množství aplikací. HVAC využívá tyto motory díky velkému snížení příkonu oproti klasickým střídavým motorům a také díky lepší regulovatelnosti otáček při konstantním momentu. 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.

Hojné využití je i v modelářství, kde se hlavně vsází na nízké hmotnosti motorů a možnost dosahovat velmi vysokých otáček, které jsou potřeba pro vrtulové stroje. Rozsah hmotností BLDC motorů je od jednotek gramů s výkonem v jednotkách wattů až po velké motory s výkonem několik kW. 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.



Obrázek 1 - Řez BLDC motorem [1]

Konstrukční řešení podle obrázku 1 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.

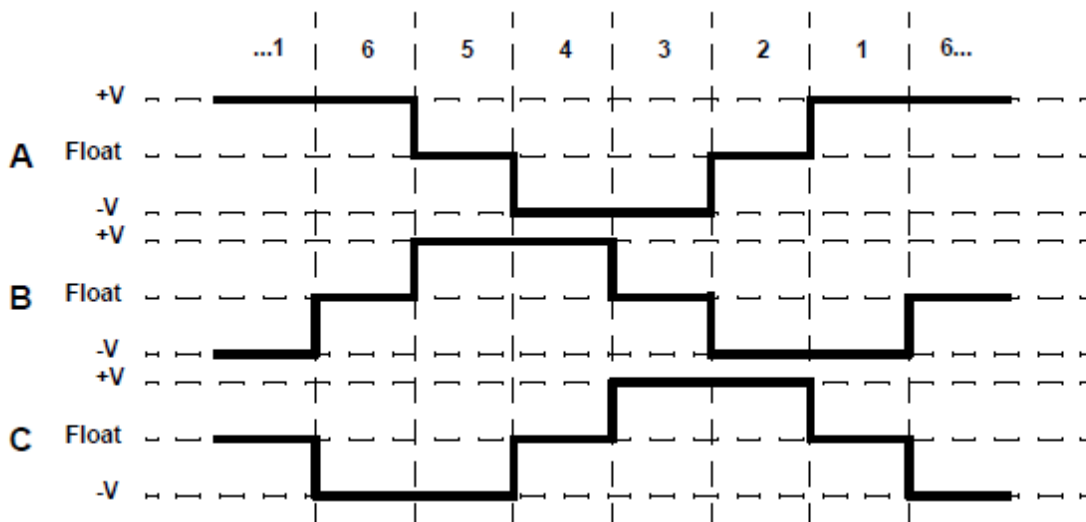
Všechny elektrické stroje potřebují ke své funkci magnetický tok mezi rotorem a státorem ve vzduchové mezeře. Takový tok lze vytvořit budícím vinutím, které ovšem vyžaduje napájení. BLDC motory využívají permanentní magnety, čímž můžeme omezit ztráty. Permanentní magnet je takový materiál, který prošel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

Samarium – Kobalt je slitina vzácných kovů. Tato slitina spojuje výhody dříve vyžívaných 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 nejvyžívanější 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 Dimenzování součástek střídače

Pro správné dimenzování součástek ve střídači a chladiče musíme znát přesné proudové a napěťové poměry. Všechny tranzistory střídače jsou umístěny na společném chladiči a jsou izolovány kaptonovou páskou.



Obrázek 2 - Průběh spínání součástek střídače [2]

Výpočet oteplení a návrh součástek se provede při uvažování řízení střídače six step metodou, kdy jsou ztráty na střídači největší. Z grafu je patrné, že každý tranzistor vede po dobu  $240^\circ$  z celé periody. Napětí baterie je 60V a maximální trvalý proud motorem je 25A. Z důvodu velké tepelné časové konstanty chladiče není třeba uvažovat pro návrh přetížitelnost.

#### Napěťové dimenzování:

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

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

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

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.

$$I_{av} = \frac{1}{T} * \int_0^T i_t dt = \frac{1}{2\pi} * \left[ \int_0^{\frac{3\pi}{2}} I_{dm} dt + \int_{\frac{3\pi}{2}}^{2\pi} 0 dt \right] = \frac{I_{dm}}{2\pi} * \left[ \frac{3\pi}{2} - 0 \right] = \frac{3 * I_{dm}}{4} = \frac{3 * 25}{4} = 18,75A$$

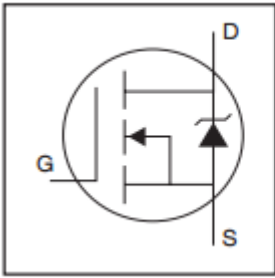
$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} * \int_0^T i_t^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} * \left[ \int_0^{\frac{3\pi}{2}} I_{dm}^2 dt + \int_{\frac{3\pi}{2}}^{2\pi} 0 dt \right]} = \sqrt{\frac{I_{dm}^2}{2\pi} * \left[ \frac{3\pi}{2} - 0 \right]} = \sqrt{\frac{3 * I_{dm}^2}{4}}$$

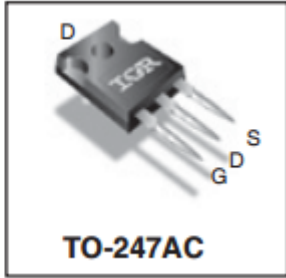
$$= \sqrt{\frac{3 * 25^2}{4}} = 21,65A$$

Podle těchto parametrů byl vybrán vhodný a dostupný tranzistor IRFP4227.

Key Parameters		
$V_{DS}$ max	200	V
$V_{DS}$ (Avalanche) typ.	240	V
$R_{DS(ON)}$ typ. @ 10V	21	mΩ
$I_{RP}$ max @ $T_C = 100^\circ C$	130	A
$T_J$ max	175	°C





**TO-247AC**

Obrázek 3-IRFP4227 parametry [3]

Tranzistor má maximální špičkový proud 130A při teplotě čipu 100°C. To nám dovoluje krátkodobě motor přetěžovat nadproudy, například při rozjezdu nebo při prudkém brždění. TO-247AC pouzdro zajišťuje dobrý tepelný přenos mezi tranzistorem a chladičem.

Propustné ztráty tranzistoru:

$$P_{pr} = R_{ds(ON)} * I_{ef}^2 = 21 * 10^{-3} * 21,65^2 = 10,78W$$

Ztráty při spínání a vypínání tranzistoru při spínací frekvenci 5kHz:

$$P_{sp} = \frac{P * f * (T_{on} + T_{off})}{6} = \frac{60 * 25 * 5000 * (20 + 31) * 10^{-9}}{6} = 0,063W$$

Celkové ztráty:

$$P_{tot} = P_{pr} + P_{sp} = 10,76 + 0,063 = 10,84W$$

Stanovení tepelného odporu čip tranzistoru – chladič:

$$R_{thT} = R_{thJC} + R_{thCS} + R_{thKAP} = 0,45 + 0,5 + 0,88 = 1,83 \text{ K/W}$$

Výpočet tepelného spádu na tranzistoru:

$$\Delta T_t = P_{tot} * R_{thT} = 10,84 * 1,83 = 19,83 \text{ K}$$

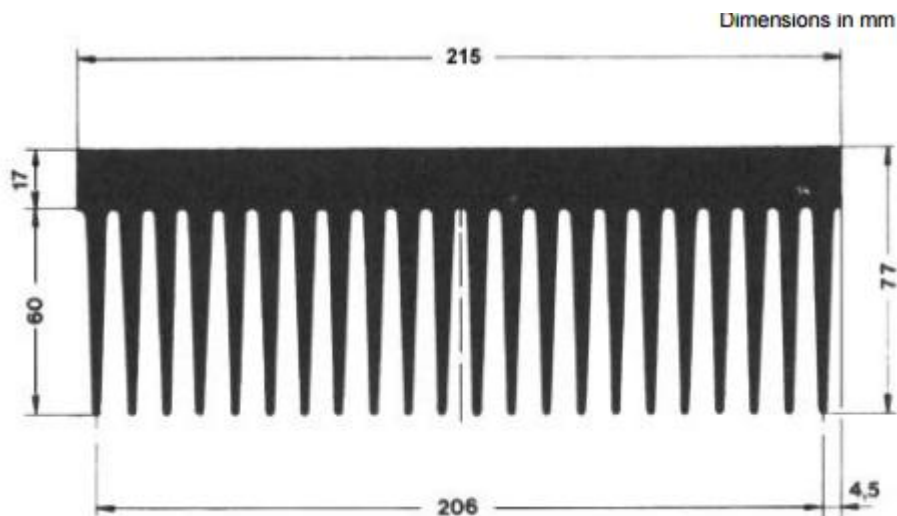
Výpočet maximálního tepelného spádu na chladiči:

$$\Delta T_h = T_{jMAX} - T_a - \Delta T_t = 175 - 50 - 19,83 = 105,17 \text{ °C}$$

Výpočet tepelného odporu chladiče:

$$R_{thr} = \frac{\Delta T_h}{6 * P_{tot}} = \frac{105,17}{6 * 10,84} = 1,617 \text{ K/W}$$

Dle těchto výpočtů musíme zvolit chladič, který bude mít menší tepelný odpor než 1,617 K/W.



Obrázek 4- Zvolený chladič [4]

Byl nám poskytnut chladič z laboratorních zásob KEVU. Tento chladič má stejné rozměry jako chladič nabízený firmou Semicron s typovým označením P16/170. V datasheetu od firmy Semicron pro tento chladič jsme našli jeho parametry.

Parametry chladiče:

$$R_{thr} = 0,06 \text{ K/W pro nucené chlazení}$$

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

$$m_h = 1249 \text{ g}$$

$$C_{thr} = \rho_{cu} * m = 896 * 1,249 = 1119,1 \text{ J/W}$$

Střední teplota čipu tranzistoru:

$$T_{jT} = T_a + P_{tot} * R_{thT} + 6 * P_{tot} * R_{thr} = 50 + 10,84 * 1,83 + 6 * 10,84 * 0,2 = 82,84^{\circ}\text{C}$$

Protože skrz 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. Pro výpočet simulace je v katalogovém listu uvedeno náhradní tepelné schéma součástky, jakožto několik násobný  $\tau$  člunek. Toto náhradní schéma je stanoveno od výrobce, který ho změřil experimentální metodou.

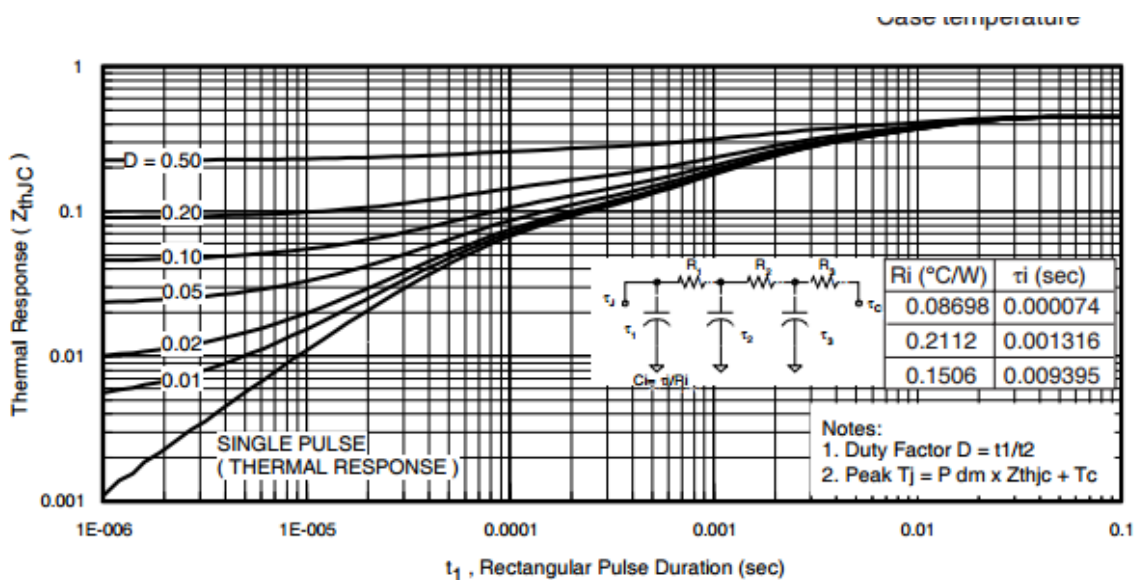


Fig 17. Maximum Effective Transient Thermal Impedance, Junction-to-Case

Obrázek 5 - Teplotní charakteristika IRFP4227 [3]

Výpočet tepelné kapacity kaptonové izolační podložky tranzistoru:

Rozměry podložky (ŠxVxH): 18x22x0,025mm

$$m_{kap} = \rho * V = 1,42 * 1,8 * 2,2 * 2,5 * 10^{-3} = 0,014g$$



Parametry tepelného schéma:

$$R_{th1} = 0,08698 \text{ K/W}$$

$$R_{th2} = 0,2112 \text{ K/W}$$

$$R_{th3} = 0,1506 \text{ K/W}$$

$$R_{thkap} = 0,88 \text{ K/W}$$

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

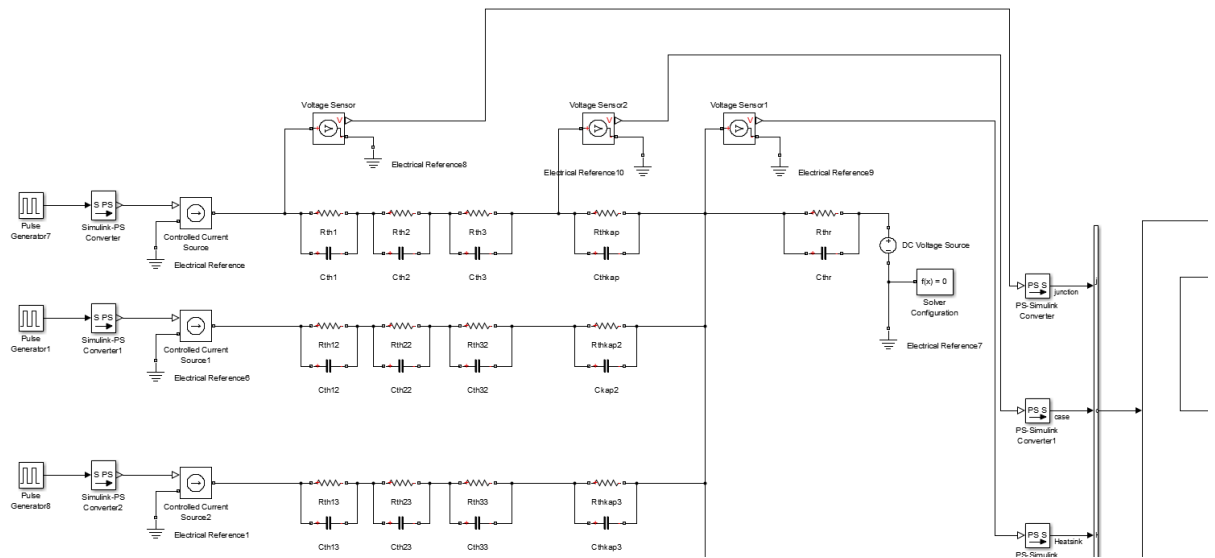
$$C_{th1} = 6,436 * 10^{-6} \text{ J/W}$$

$$C_{th2} = 2,779 * 10^{-4} \text{ J/W}$$

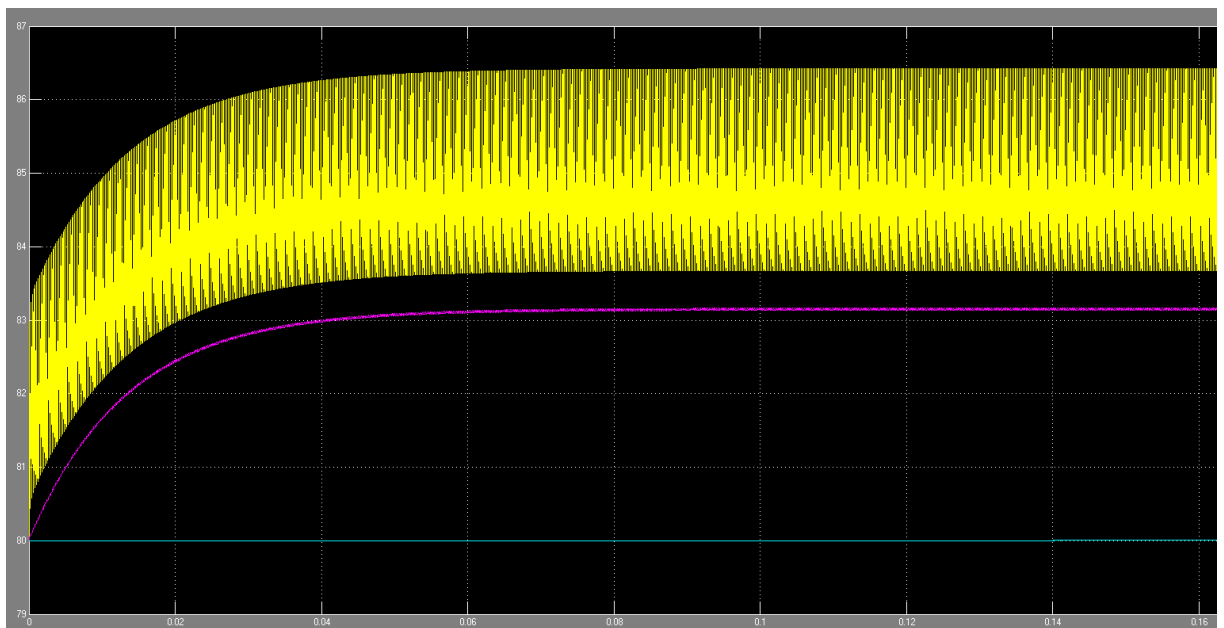
$$C_{th3} = 1,414 * 10^{-3} \text{ J/W}$$

$$C_{thkap} = 0,01526 \text{ J/W}$$

$$C_{thkap} = 1119,1 \text{ J/W}$$



Obrázek 6 - Simulační schéma oteplení střídače



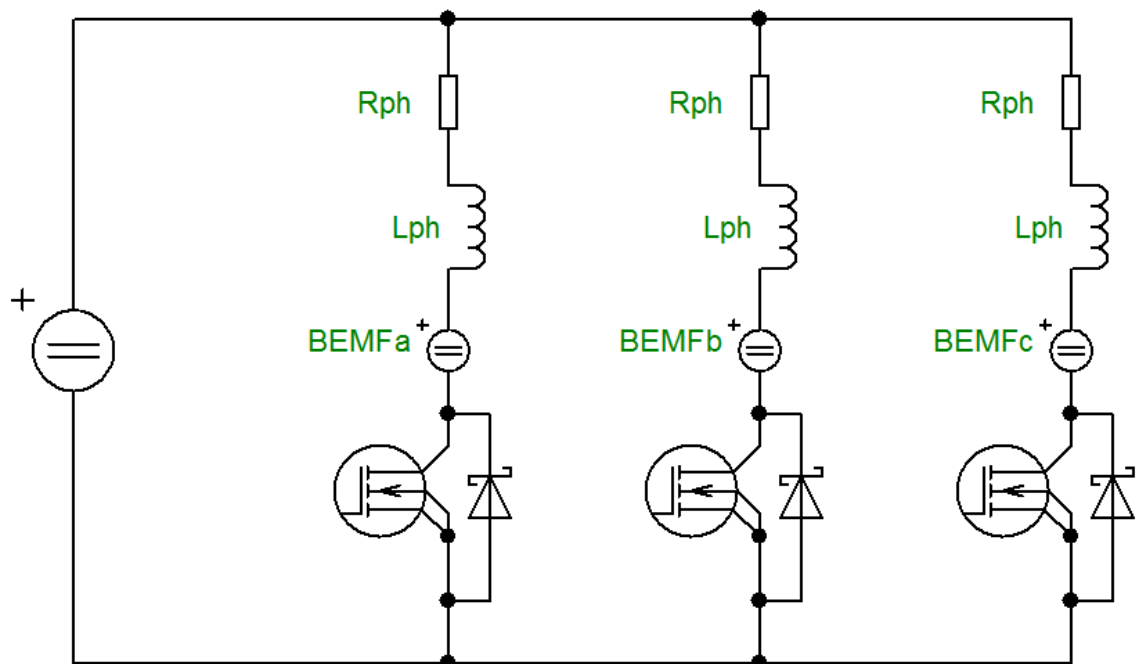
Obrázek 7- Průběh teploty na tranzistoru při spínání

## 4 Návrh střídače

### 4.1 Polomůstek

Topologie polomostu je znázorněna na obrázku 8. Toto je nejjednodušší zapojení pro řízení BLDC motoru. Jak je vidět z obrázku tak pokud sepneme tranzistor, proud může téci ze zdroje skrz příslušnou fázi zpátky do zdroje. Toto zapojení dovoluje, aby tekla proud pouze v kladném směru. To má za následek, že pouze kladná půl vlna BEMF se může podílet na tvoření momentu v motoru. Jednoduchost tohoto zapojení jde ruku v ruce se špatným výkonem zapojení. Polovina momentu, který může motor produkovat, je ztracena tím, že není možné, aby procházel proud zápornou půl vlnou.

Toto zapojení je typicky využíváno pouze v nízko výkonových aplikacích, kde se snažíme mít co nejnižší množství tranzistorů a tím i co nejnižší cenu. Využívají se pouze v aplikacích, kde není třeba vysoký točivý moment a nevádí pulzace momentu.<sup>1</sup>

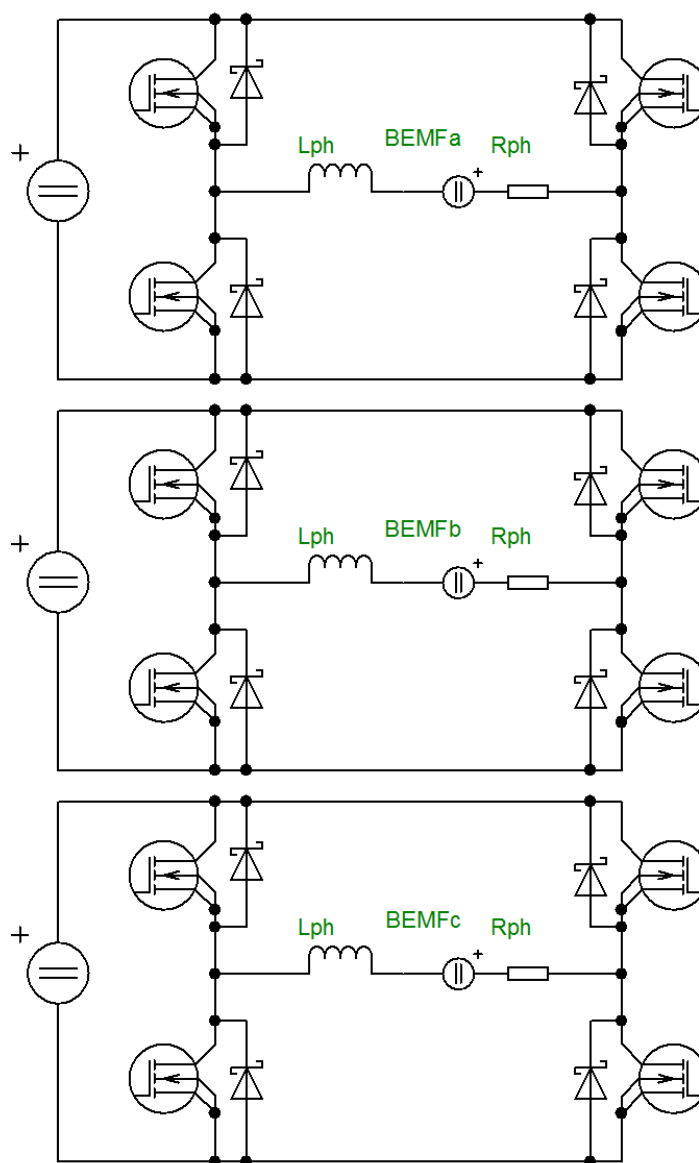


Obrázek 8 - Driver v topologii polomost

<sup>1</sup> HANSELMAN, Duane C. Brushless permanent magnet motor design. 2nd ed. Cranston: <<The>> Writers' Collective, ©2003. xvi, 196 s. ISBN 1-932133-63-1. [7]

## 4.2 H-most

Topologie plného mostu je znázorněna na obrázku 9. Na rozdíl od polomostu jsou k řízení jedné fáze motoru potřeba čtyři tranzistory. Pokud sepne jeden horní tranzistor na začátku vinutí a na konci sepne spodní tranzistor, teče proud skrz vinutí v kladném směru, pokud sepne opačnou dvojici tranzistorů, poteče proud skrz vinutí v záporném směru. Proto toto zapojení podporuje bipolární směr tečení proudu. Vzhledem k potřebě dvanácti tranzistorů pro ovládání tří fází motoru je toto zapojení značně dražší než polomost. Výhodou tohoto zapojení je, že můžeme řídit směr a velikost proudu v jednotlivých fázích nezávisle na zbylých dvou fázích motoru.



Obrázek 9 - Topologie H-most

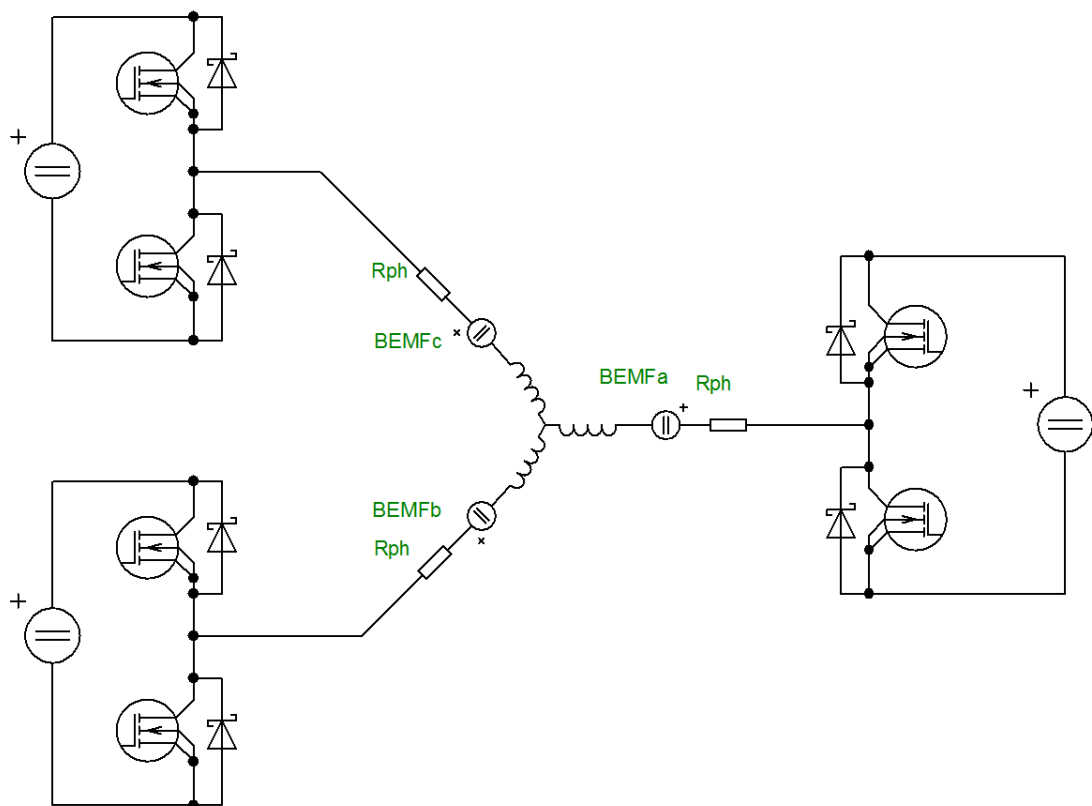
### 4.3 Zapojení do hvězdy

Většina motorů nemá vyvedeno všech šest konců vinutí a jsou uvnitř nějak pospojované. Zapojení motoru do hvězdy je znázorněno na obrázku 10. Toto zapojení je nejčastější, potřebuje dvakrát více tranzistorů než polomost, ale jen polovinu toho co H-most. Proud jedním směrem se realizuje sepnutím jednoho horního tranzistoru v příslušné fázi a sepnutí jednoho nebo dvou tranzistorů ve zbylých fázích. Proud opačně se realizuje podobným způsobem. Protože uzel vinutí není vyveden ven, musí zde platit Kirchhoffův zákon a součet všech harmonických proudů v uzlu musí být roven nule. Proto jsou proudy v jednotlivých fázích na sobě závislé.

$$i_a(\theta) + i_b(\theta) + i_c(\theta) = 0$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} I_{a(n)} e^{jn\theta} + \sum_{n=0}^{\infty} I_{b(n)} e^{jn\theta} + \sum_{n=0}^{\infty} I_{c(n)} e^{jn\theta}$$

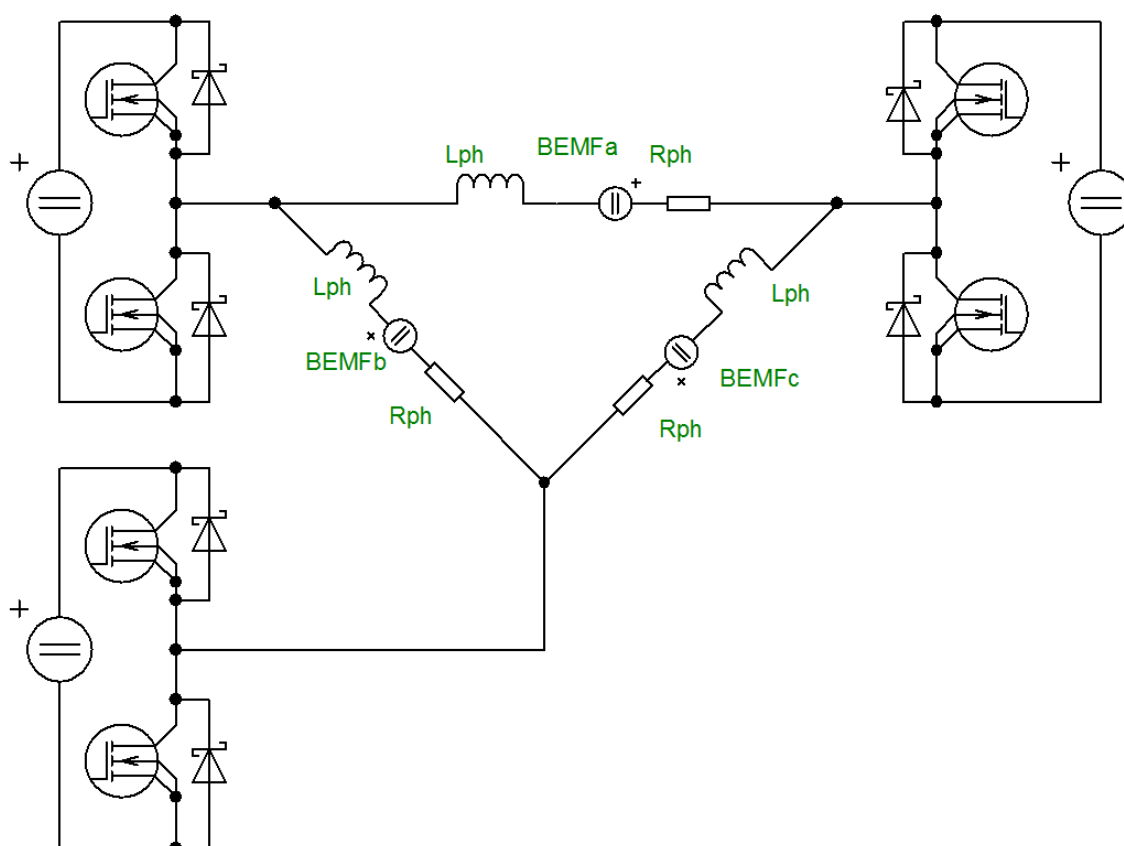
Tento součet není nulový pouze v případě, pokud se jedná o třetí harmonickou nebo její násobky.



Obrázek 10 - Zapojení do hvězdy

#### 4.4 Zapojení do trojúhelníka

Druhý způsob zapojení motoru je do trojúhelníka. Zapojení je znázorněno na obrázku 11. Vinutí je zapojeno do smyčky a proud se zde tvoří sepnutím horního tranzistoru v jedné fázi kontroleru a spodního tranzistoru v jiné fázi. V praxi se toto zapojení využívá jen zřídka, protože dovoluje cirkulování proudu smyčkou v případě, že jsou všechny tranzistory vypnuty.



Obrázek 11 - Zapojení do trojúhelníka

Pokud budeme ignorovat spínání tranzistorů, okruhový proud trojúhelníkem je vytvářen součtem BEMF jednotlivých vinutí. BEMF je popsáno Fourierovým rozvojem znázorněným v následující rovnici.

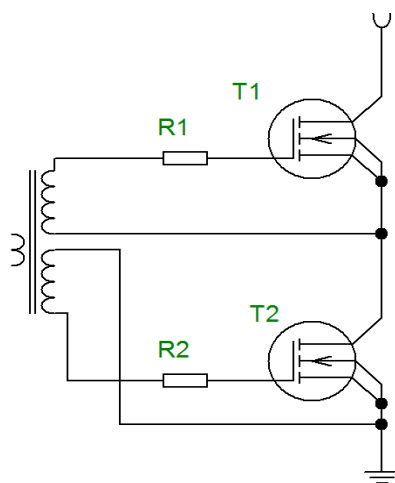
$$\sum_{n=0}^{\infty} K_{(n)} \left[ 1 + 2\cos\left(\frac{2\pi n}{3}\right) \right] e^{jn\theta}$$

Pokud je tento součet nulový, žádný proud nemůže procházet. Problém nastává, pokud je  $n$  rovno třem, nebo násobku tří. Pro násobky třetí harmonické proudu není tento součet nulový a prochází okruhový proud skrz vinutí. Toto vinutí tvoří ohmický úbytek na odporech,

zvýšuje tak oteplení motoru, ale nepodílí se na vytváření točivého momentu. Střídavé synchronní motory s permanentními magnety nejsou tímto zasaženy, neboť v sinusovém BEMF nejsou složky třetích harmonických obsaženy. Na druhou stranu BLDC motory s lichoběžníkovým BEMF mají třetí harmonickou o velikosti přibližně 22% a tak se může tvořit okruhový proud, který tvoří tepelné ztráty ve vinutí motoru. V praxi se zapojení do trojúhelníka používá jen v nízko výkonových aplikacích, kde jsou přídatné ztráty okruhovými proudy zanedbatelné.

## 4.5 Budič polomostů střídače

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 12V 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 12V. Existuje několik variant, které se liší komplikovaností zapojení a svými vlastnostmi.



Obrázek 12 - Zapojení s GDT

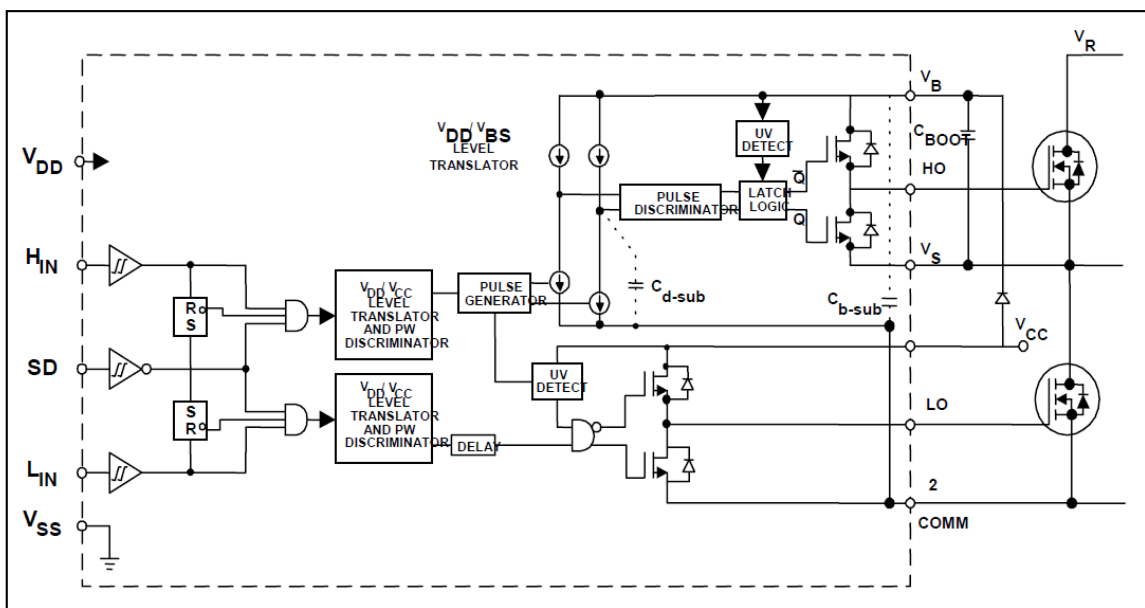
Sekundární vinutí pro vrchní tranzistor je jedním koncem připojeno ke středu polomostu. To tvoří plovoucí zem pro napájení gate tranzistoru. K tomuto napětí se v případě potřeby otevřít vrchní tranzistor superponuje naindukované napětí přes GDT a tranzistor se otevře.

Jedno z řešení je využít tzv. GDT, toto zapojení ze znázorněno na obrázku 12. Primární vinutí se připojuje podle potřeby spínat tranzistory k 12V napětí. Dle toho jaký tranzistor potřebujeme otevřít, spínáme primární vinutí v kladné polaritě nebo v záporné polaritě. Toto napětí se transformuje skrze feritové jádro do dvou sekundárních vinutí pro každý tranzistor zvlášť. Smysly vinutí jsou otočeny, čímž je zajištěno blokování jednoho tranzistoru, pokud je druhý otevřen.

Toto zapojení má výhodu v tom, že nepotřebujeme speciální zdroje pro vrchní tranzistory a vystačí si s klasickým zdrojem 12V, který je společný pro celý driver. Jeho nevýhoda spočívá v tom, že transformátor nedokáže přenést stejnosměrnou složku napětí, což je problém při rozjezdech motoru, kde ke spínání součástek dochází s dlouhou periodou. To by mohlo zapříčinit nedokonalého sepnutí tranzistoru a jeho destrukci. Vzhledem k velikosti GDT je také problém, že bychom pro 3f polomost potřebovali tři tyto transformátory.

Dalším způsobem buzení vrchních tranzistorů je sestavit tři izolované zdroje, které budou mít svojí zápornou svorku spojenou s jednotlivými středy polomostů. Toto zapojení je podobné zapojení s GDT. Výhoda je, že zdroj nekáže budit tranzistor stejnosměrným proudem a může držet tranzistor otevřený, jak jen dlouho budeme chtít. Nevýhoda je zde opět v nutnosti mít tři izolované zdroje, které budou značně finančně a prostorově náročné.

Námi zvolený postup je s využitím speciálního integrovaného obvodu, který je pro buzení tranzistorů v polomostu přímo konstruován. Logika pro napájení vrchního tranzistoru jde zde galvanicky oddělena od vstupních obvodů a napájení je zde řešeno nábojovou pumpou.



Obrázek 13 - Blokové schéma IR2110 [5]

Integrovaný obvod IR2110 se jeví jako ideální řešení problému spínání vrchního tranzistoru. Integrovaný obvod IR2110 je vysokonapěťový, vysokorychlostní MOSFET a IGBT driver s implementovaným budičem pro vrchní a spodní tranzistor. Logické vstupy jsou kompatibilní s úrovněmi od CMOS až po 3,3V logiku. Výstupní kanál je designován pro

velké špičkové proudy, které jsou nutné k nabíjení vstupních kapacit MOSFET a IGBT tranzistorů. Plovoucí kanál může být využit pro buzení MOSFET a IGBT tranzistorů s N kanálem až do napětí 500V.

Pro návrh schématu s IR2110 je potřeba předem stanovit několik součástek, které jsou kritické pro správnou funkci střídače. Jako první je třeba určit minimální velikost bootstrap kondenzátoru, který je kapacitou nábojové pumpy a obstarává tak napájení gatu vrchního tranzistoru. V application notes je vzorec pro zjištění nejmenší hodnoty tohoto kondenzátoru. Nicméně nedoporučuje se použít co nejnižší hodnotu kondenzátoru, protože kondenzátory mají určitou toleranci a také stářím dochází k jejich degradaci a snižování kapacity. Protože je kondenzátor namáhán hlavně špičkově, při nabíjení kapacity gatu, je elektrolytický kondenzátor ještě blokován svitkovým kondenzátorem, který má mnohem lepší pulzní vlastnosti.

$$\begin{aligned}
 C_{bs} &\geq \frac{2 * \left[ 2 * Q_g + \frac{I_{qbs(max)}}{f} + Q_{ls} + \frac{I_{Cbs(leak)}}{f} \right]}{V_{cc} - V_f - V_{LS} - V_{min}} \\
 &= \frac{2 * \left[ 2 * 98 * 10^{-9} + \frac{125 * 10^{-6}}{2000} + 5 * 10^{-9} + \frac{0,22 * 10^{-6}}{2000} \right]}{18 - 0,7 - 0,63 - 15} \\
 &= \frac{5,27 * 10^{-7}}{1,67} = 315nF
 \end{aligned}$$

$Q_g$  = Gate charge of high-side FET

$f$  = frequency of operation

$I_{Cbs(leak)}$  = bootstrap capacitor leakage current

$I_{qbs(max)}$  = Maximum  $V_{BS}$  quiescent current

$V_{CC}$  = Logic section voltage source

$V_f$  = Forward voltage drop across the bootstrap diode

$V_{LS}$  = Voltage drop across the low-side FET or load

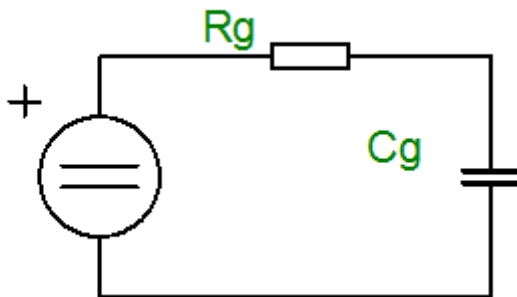
$V_{Min}$  = Minimum voltage between  $V_B$  and  $V_S$ .

$Q_{ls}$  = level shift charge required per cycle



Jako další je nutné spočítat gatový odpor. Maximální špičkový proud, který dokáže dodat nebo z hradla odebrat IR2110 je 2A. Tuto hodnotu nesmíme překročit, protože bychom přetěžovali výstupní tranzistory v IO a došlo by tak k destrukci. Napájecí napětí  $V_{CC}$  pro gaty

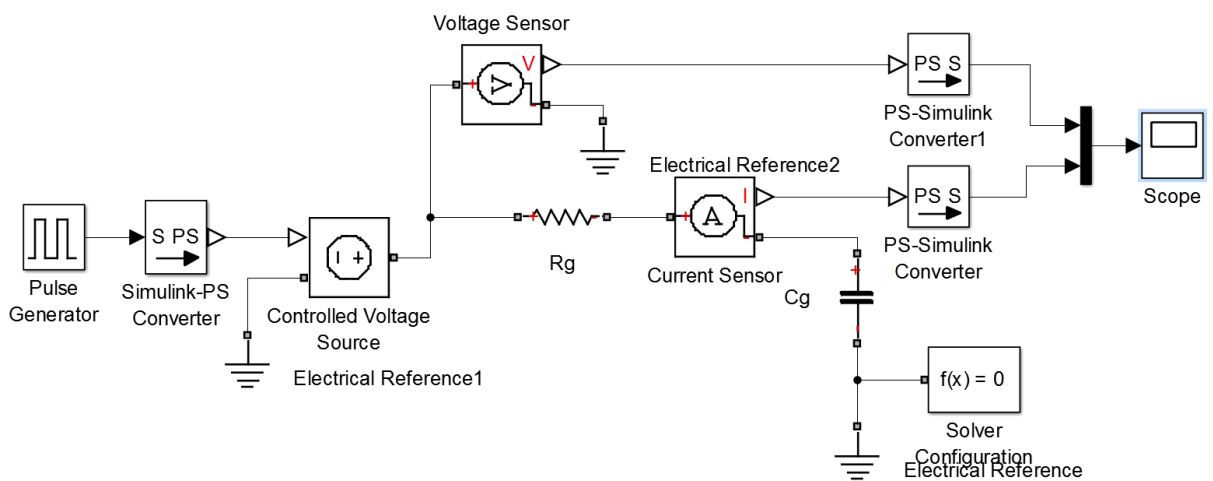
MOSFETů je 18V. Na toto napětí musíme stavět. Gate tranzistoru, při zanedbání určité nelinearity při nabíjení, se chová téměř jako kondenzátor a proto můžeme sestavit jednoduchou rovnici dle náhradního schématu. Jako maximální nabíjecí proud jsme zvolili 1,8A, aby integrovaný obvod měl ještě nějakou výkonovou rezervu.



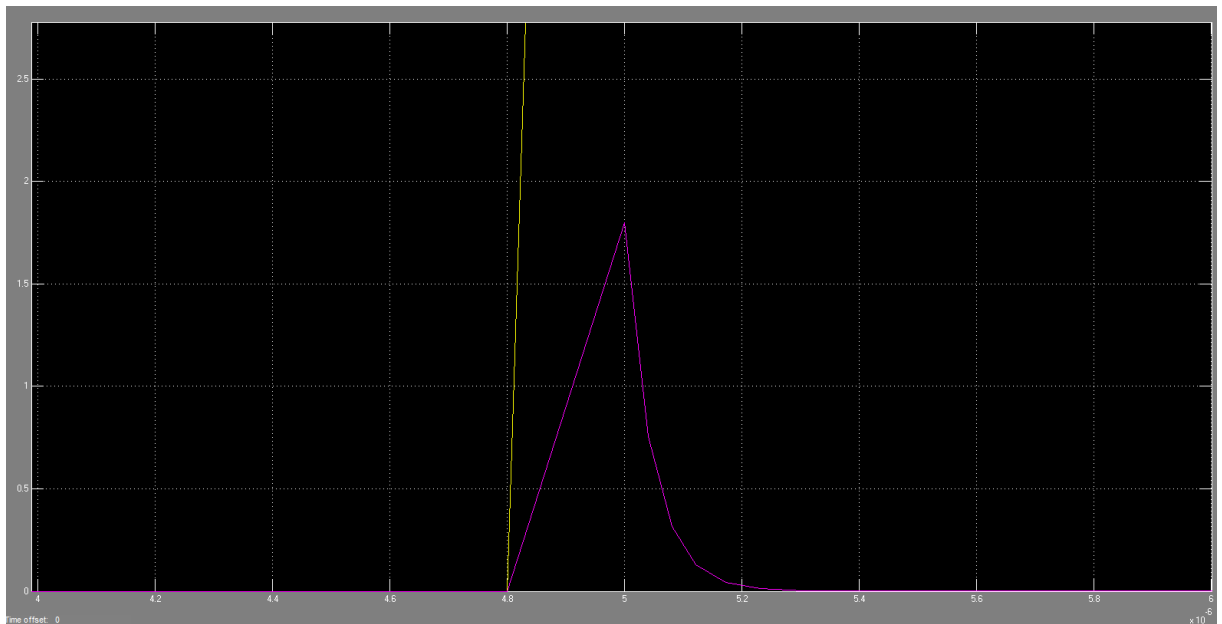
Obrázek 14 - Náhradní schéma nabíjení gatu

$$U_{CC} = U_{Rg} + U_{Cg(0+)} = R_g * I_g + 0$$

$$R_g = \frac{U_{CC}}{I_g} = \frac{18}{1,8} = 10\Omega$$



Obrázek 15 - Schéma simulace nabíjení gatu

Obrázek 16 - Časový průběh proudu  $I_g$ 

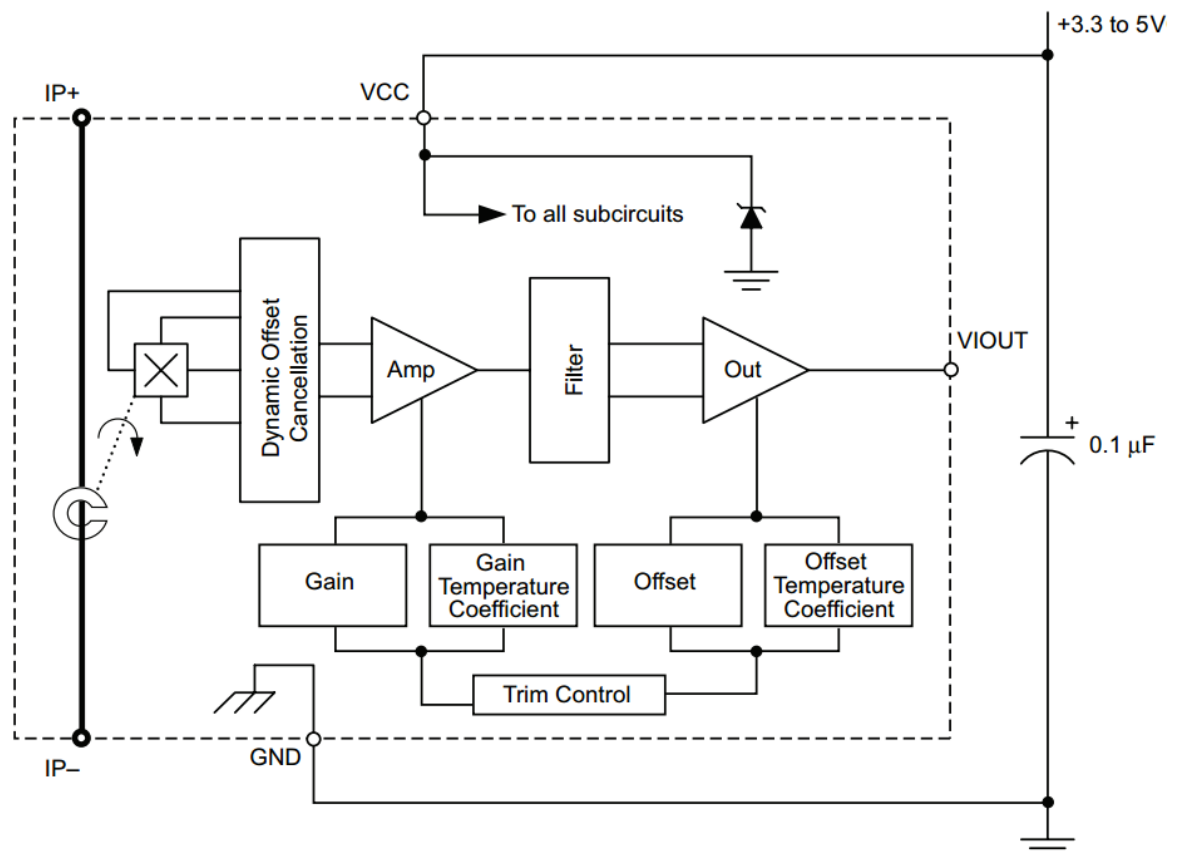
## 4.6 Proudové čidla

Pro správné řízení momentu motoru potřebujeme znát přesnou okamžitou hodnotu proudu jednotlivými fázemi motoru. Pro toto připadá několik možných metod, jak tento proud měřit. Můžeme do cesty proudu zařadit snímací odpor, na kterém bychom měřili 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 při plném zatížení na něm velký úbytek napětí a snižoval tak výkon motoru. Pokud naopak bude odpor malý, aby na něj 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.

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  $100 \mu\Omega$ .

Firma Allegro Microsystems vyrábí vhodná čidla z rodiny ACS758xCB. Tyto čidla jsou přímo konstruované pro měření proudu ve střídačích ovládaných mikroprocesorem. 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. Námi zvolené čidlo ACS758LCB-050B-PFF-T podporuje bipolární směr proudu až do hodnoty  $\pm 50A$ . Citlivost čidla je  $40mV/A$  vzhledem k bipolárnímu směru proudu, nulový proud tekoucí skrz čidlo je prezentován napětím  $U_{cc}/2$  na výstupu.



Obrázek 17 - Blokové schéma čidla proudu [6]

## 4.7 Napájecí zdroje

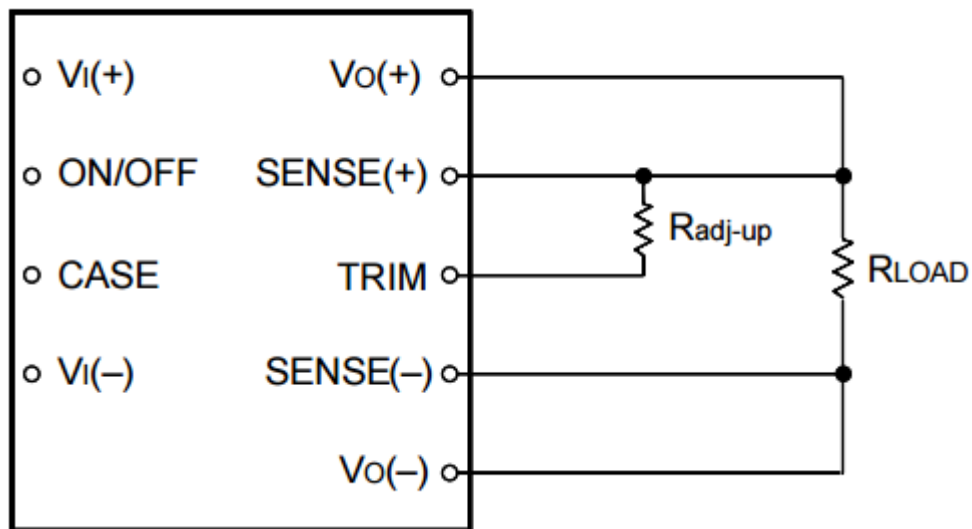
Jako primární zdroj napětí na koloběžce je  $LiFePO_4$  baterie o napětí 60V. Toto napětí je samozřejmě vhodné pouze pro trakční použití a pro napájení mikro procesoru a dalších elektronických částí je třeba toto napětí upravit na odpovídající úroveň.

Jako hlavní napájecí zdroj je použit integrovaný DC/DC konvertor od firmy Tyco Electronics JW030C-M. Jeho vstupní napětí je v rozmezí 36-75V a je tak vhodný k použití

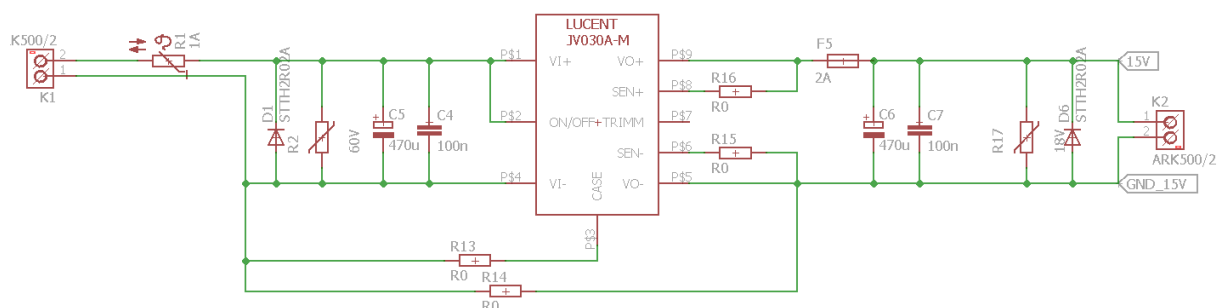
pro obě naše zamýšlené baterie. Jeho výstupní napětí je 15V. Pro další zdroje je potřeba minimální napětí 18V, proto je nutné spočítat nastavovací odpor a zvýšit tak výstupní napětí zdroje Tyco. Zvýšení výstupního napětí se provede zapojením vyobrazeným na obrázku 18 a velikost odporu se spočítá z následujících dvou rovnic.

$$\% \Delta = \frac{U_{poz}}{U_{nom}} - 1 = \frac{18}{15} - 1 = 0,2\%$$

$$R_{adj-up} = \left( \frac{V_{onnom}}{2,5} - 1 \right) * \left( \frac{1 + \% \Delta}{\% \Delta} \right) * 10\,000 = \left( \frac{15}{2,5} - 1 \right) * \left( \frac{1 + 0,2}{0,2} \right) * 10\,000 = 300k\Omega$$

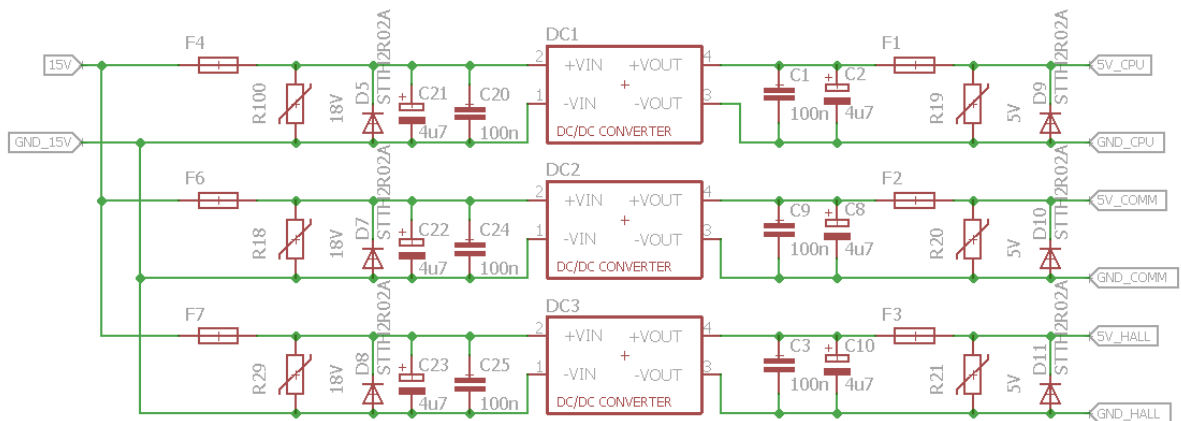


Obrázek 18 - Zvýšení výstupního napětí Tyco zdroje [6]



Obrázek 19 - Schéma 15V napájecí části

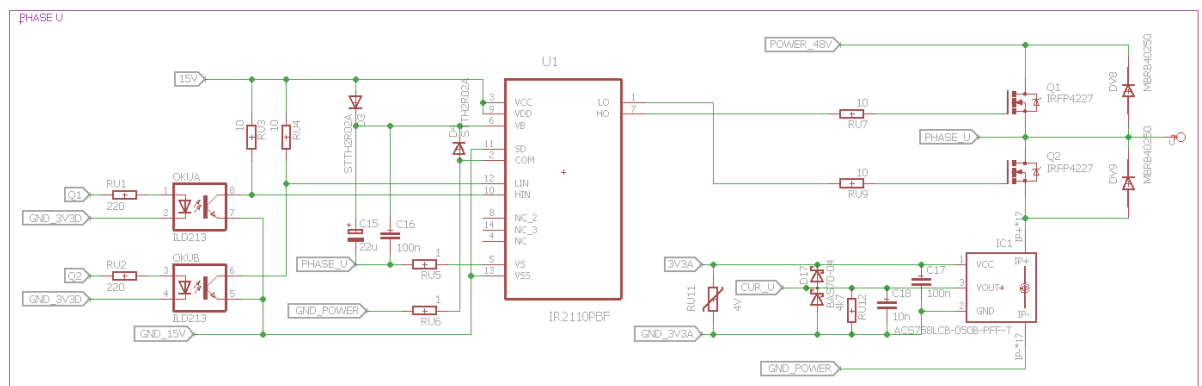
Pro napájení mikroprocesoru, čidel a dalších periférií je zapotřebí nižší napájecí hladiny, které od sebe budou izolované. K tomuto slouží další DC/DC konvertory napájené z 18V větve. Byl vybrán nízko příkonový konvertor od firmy Traco Power s označením 2405S. Výstupní napětí je 5V a 200mA s účinností okolo 70%. Napájecí větve pro procesor, komunikaci a Hallovi senzory jsou oddělené a pro každou větev je použit samostatný inverter.



Obrázek 20 - Schéma napájecí části s Traco Power

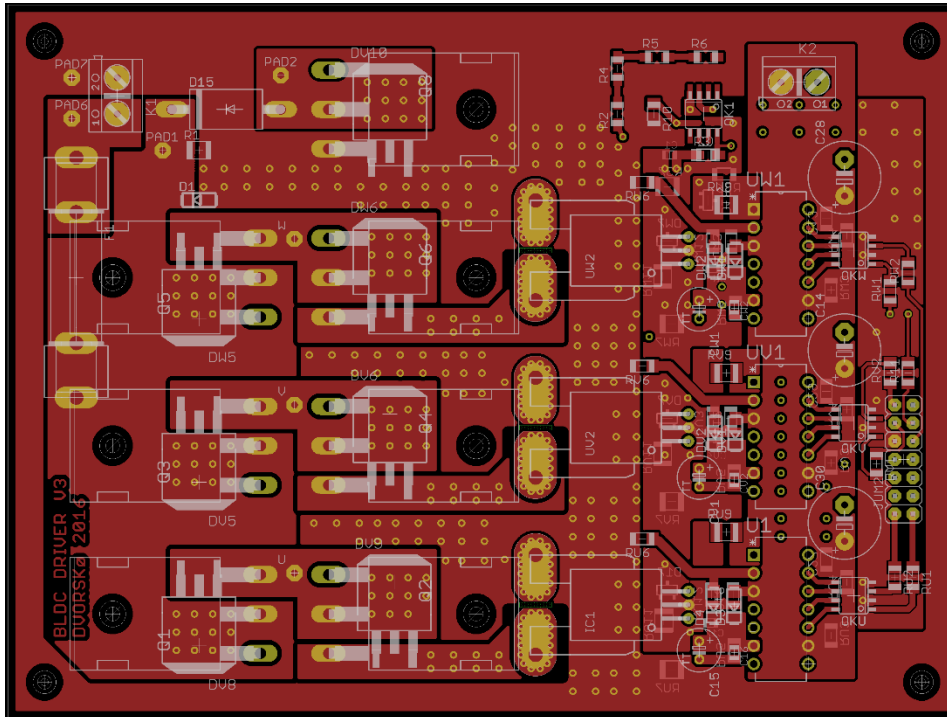
## 4.8 Střídač

Střídač byl navrhnout tak, aby se vešel do námi zvolené krabice, která měla sloužit i jako chladič a vodotěsný obal pro celé řízení motoru. Pro buzení MOSFET tranzistorů bylo zvoleno téměř katalogové zapojení integrovaného obvodu IR2110, doplněného o galvanické oddělení řídicích pinů optočleny. Celé schéma je tvořeno tak, aby silová část a nízko napěťová část procesoru byla oddělena a nebyla možnost, vniknutí vysokonapěťové špičky generované při spínání indukčnosti motoru do mikro procesoru.

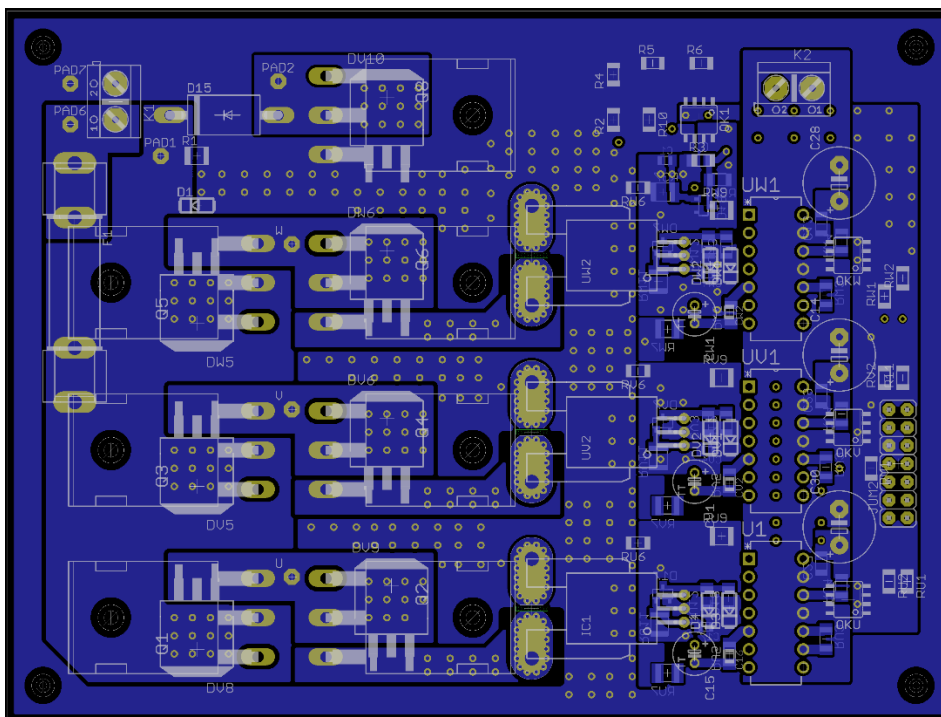


Obrázek 21 - Schéma jedné fáze střídače

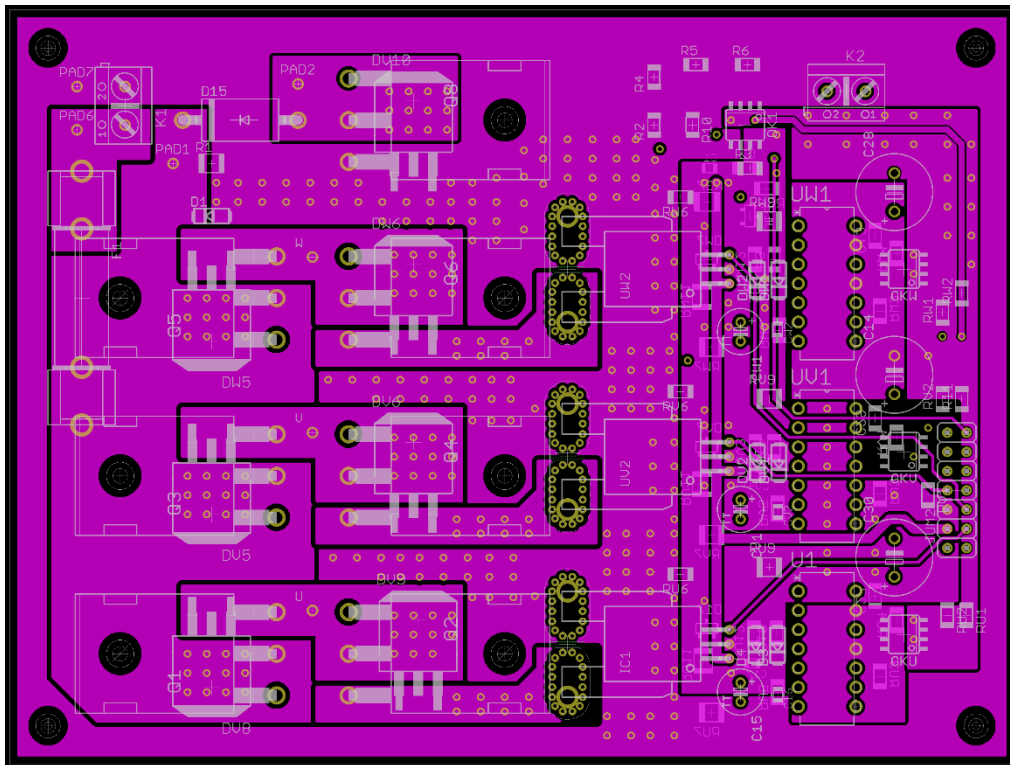
Plošný spoj je navržen tak, aby zde byly minimalizovány parazitní vlivy indukčností a kapacity mezi cestami. Byla zvolena 4 vrstvá technologie plošného spoje, tak aby bylo silové vedení co nejkratší. Z důvodu vysokých proudových zatížitelností střídače byla deska vyvedena se zesílenou 70 $\mu$ m mědí, tak aby dobře snášela proudové špičky, které budou ve střídači vznikat při spínání.



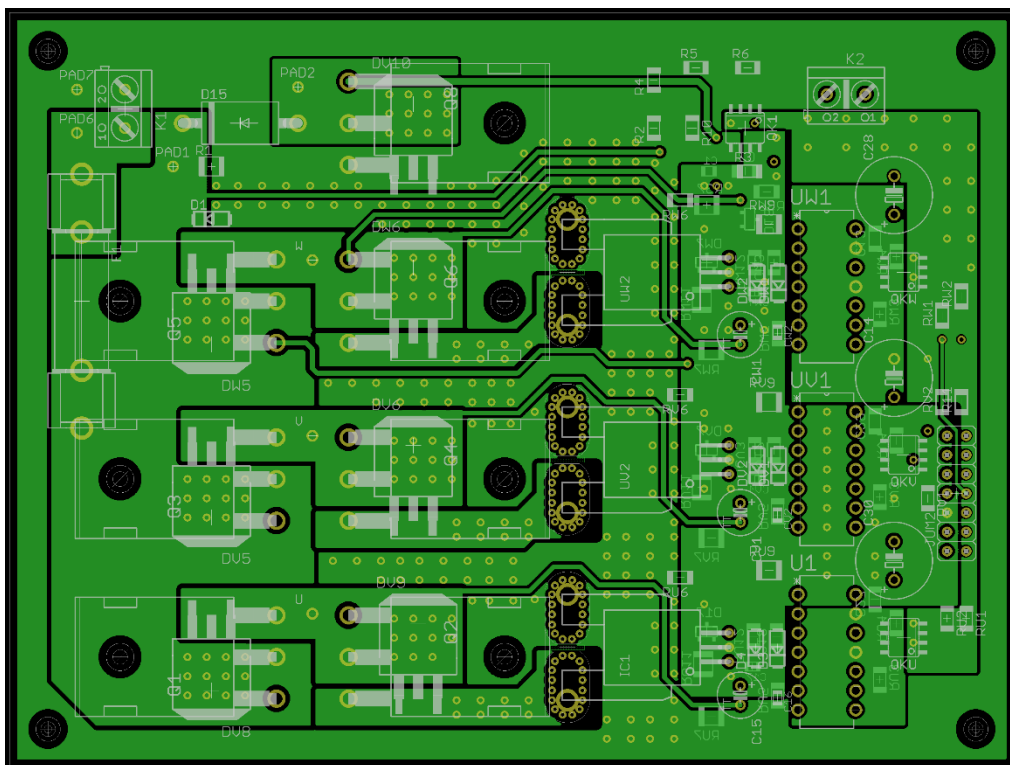
Obrázek 22 - TOP vrstva desky střídače



Obrázek 23 - Bottom vrstva desky střídače



Obrázek 24 – Route2, vnitřní vrstva střídače

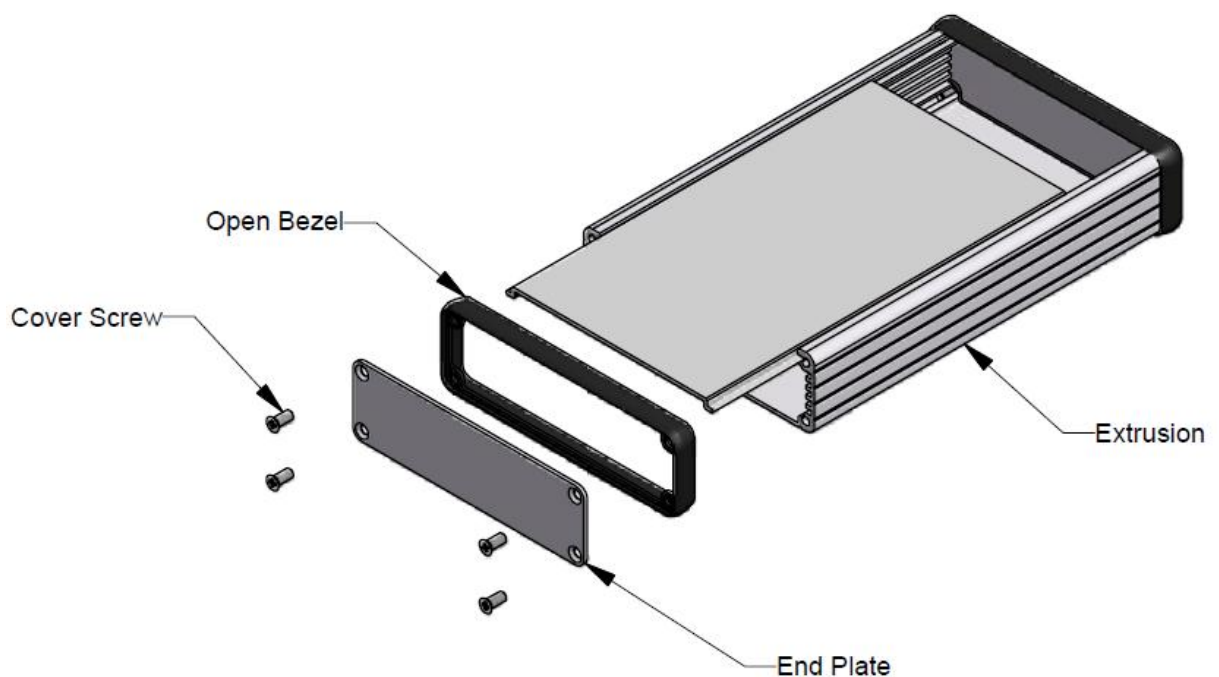


Obrázek 25 – Route3, vnitřní vrstva desky střídače

## 4.9 Zástavbová krabice

Pro namontování driveru, se všemi ostatními věcmi potřebnými k řízení motoru na koloběžku, byla zvolena hliníková krabice od firmy Hammond manufacturing™. Krabice má v sobě drážky kam se zasune deska střídače, tak aby byla zajištěna proti posunu. Na spodní desce krabice jsou přišroubovány výkonové tranzistory střídače a krabice tak obstarává jeho chlazení. Pro dokonalou vodotěsnost, po finálních úpravách na střídači, se všechny spoje přelepí silikonem. Finálně bude krabice s driverem umístěna vedle zadního kola, tak aby byla co nejbližší motoru. Krabice má rozměry 100x160x30mm

# 1455L1601



Obrázek 26 - Zástavbová krabice



## 5 Závěr

Tato práce se zabývala návrhem a konstrukcí střídače pro bezkartáčový stejnosměrný motor. Viděli jsme zde postup návrhu součástek, zvolení čidel, pomocných zdrojů, několik tepelných simulací střídače a nakonec návrh plošného spoje.

Při návrhu plošného spoje i přes mnohé kontrolování se objevilo několik chyb, které se musely operativně vyřešit. Jako první zásadní chyba po oživení se objevilo nevhodné zvolení zapojení optočlenů, které měly výstupy typu open collector, ale zapojení tomu neodpovídalo. Tato chyba se jednoduše vyřešila připojením odporu mezi napájení 5V a kolektor daného optočlenu.

Zásadnější problém nastal při snaze roztočit motor. Pokud se motor přestal točit, vždy se zničil obvod IR2110. V něm se pokaždé zničil vrchní tranzistor obstarávající spínání vrchního tranzistoru v polomostu. Díky konzultaci s panem doktorem Jiřím Fořtem jsme přišli na problém, že pro správnou funkci nábojové pumpy se musí periodicky spínat horní a spodní tranzistor. Aby se nabil bootstrap kondenzátor musí se otevřít spodní tranzistor, skrz který se tato kapacita nabije. Zvolený 22 $\mu$ F kondenzátor dokáže zásobovat nábojovou pumpu energií po zhruba 3s. Po této době se zmenší napětí na kondenzátoru na takovou úroveň, která již nestačí pro sepnutí vrchního tranzistoru v IR2110. Ten se neotevře do plné saturace, zůstane v lineárním režimu a proud tekoucí do hradla výkonového MOSFET tranzistoru tento tranzistor v obvodu IR2110 zničí. Tento problém nehrozí, pokud se motor točí. Díky tomu, že má motor 24 pól párů, spínání jednotlivých fází je natolik rychlé, že se kapacita nestihne vybit. Problém by nastal, kdybychom motor mechanicky zastavili. Z tohoto důvodu kolega bc. Jan Dvorský implementoval do programu rutinu, která cyklicky nabíjí bootstrap kapacity.

Po odstranění těchto zásadních problémů začal střídač fungovat dle předpokladů. Přestože se deska zadala do výroby začátkem roku, tak dlouhá výrobní doba a následné problémy s nalezením problému ohledně odcházejících IR2110 nás dostala do fáze, že jsme střídač nestihli řádně otestovat na koloběžce. Sestavený střídač se zdá být funkční a na záložním motoru jsme si otestovali jeho schopnost točit motorem a řídit jeho rychlost. Bohužel z důvodu časové náročnosti celého projektu není střídač implementován do krabice a namontován na koloběžku.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] [http://www.techpark.sk/application\\_data/techpark/uploads/Image/technika\\_9\\_2009/8.jpg](http://www.techpark.sk/application_data/techpark/uploads/Image/technika_9_2009/8.jpg), květen, 2016
- [2] <http://3.bp.blogspot.com/-Gq2xT7ZjPKs/VM92FABJ4-I/AAAAAAAAAJ8/y4PDHx2yyLo/s1600/SENSORS.png>, květen, 2016
- [3] <http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irfp4227pbf.pdf>, květen, 2016
- [4] <https://www.semikron.com/dl/service-support/downloads/download/semikron-datasheet-p-16-pm139410>, květen, 2016
- [5] <http://www.infineon.com/dgdl/an-978.pdf?fileId=5546d462533600a40153559f7cf21200>, květen, 2016
- [6] <http://www.allegromicro.com/~media/Files/Datasheets/ACS758-Datasheet.ashx>, květen, 2016
- [7] HANSELMAN, Duane C. Brushless permanent magnet motor design. 2nd ed. Cranston: <<The>> Writers' Collective, ©2003. xvi, 196 s. ISBN 1-932133-63-1

## Seznam obrázků a tabulek

OBRÁZEK 1 - ŘEZ BLDC MOTOREM [1].....	11
OBRÁZEK 2 - PRŮBĚH SPÍNÁNÍ SOUČÁSTEK STŘÍDAČE [2].....	13
OBRÁZEK 3-IRFP4227 PARAMETRY [3].....	14
OBRÁZEK 4- ZVOLENÝ CHLADIČ [4] .....	15
OBRÁZEK 5 - TEPLTNÍ CHARAKTERISTIKA IRFP4227 [3] .....	16
OBRÁZEK 6 - SIMULAČNÍ SCHÉMA OTEPLENÍ STŘÍDAČE.....	17
OBRÁZEK 7- PRŮBĚH TEPLoty NA TRANZISTORU PŘI SPÍNÁNÍ .....	17
OBRÁZEK 8 - DRIVER V TOPOLOGII POLOMOST.....	18
OBRÁZEK 9 - TOPOLOGIE H-MOST.....	19
OBRÁZEK 10 - ZAPOJENÍ DO HVĚZDY.....	20
OBRÁZEK 11 - ZAPOJENÍ DO TROJÚHELNÍKA .....	21
OBRÁZEK 12 - ZAPOJENÍ S GDT .....	22
OBRÁZEK 13 - BLOKOVÉ SCHÉMA IR2110 [5].....	23
OBRÁZEK 14 - NÁHRADNÍ SCHÉMA NABÍJENÍ GATU .....	25
OBRÁZEK 15 - SCHÉMA SIMULACE NABÍJENÍ GATU .....	25
OBRÁZEK 16 - ČASOVÝ PRŮBĚH PROUDU IG .....	26
OBRÁZEK 17 - BLOKOVÉ SCHÉMA ČIDLA PROUDU [6] .....	27
OBRÁZEK 18 - ZVÝŠENÍ VÝSTUPNÍHO NAPĚTÍ TYCO ZDROJE [6] .....	28
OBRÁZEK 19 - SCHÉMA 15V NAPÁJECÍ ČÁSTI .....	28
OBRÁZEK 20 - SCHÉMA NAPÁJECÍ ČÁSTI S TRACO POWER.....	29
OBRÁZEK 21 - SCHÉMA JEDNÉ FÁZE STŘÍDAČE.....	29
OBRÁZEK 22 - TOP VRSTVA DESKY STŘÍDAČE.....	30
OBRÁZEK 23 - BOTTOM VRSTVA DESKY STŘÍDAČE .....	30
OBRÁZEK 24 – ROUTE2, VNITŘNÍ VRSTVA STŘÍDAČE .....	31
OBRÁZEK 25 – ROUTE3, VNITŘNÍ VRSTVA DESKY STŘÍDAČE .....	31
OBRÁZEK 26 - ZÁSTAVBOVÁ KRABICE.....	32