

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Implementace řídicí jednotky motokáry s elektrickým  
pohonem**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2018/2019

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

Jméno a příjmení: **Bc. Ondřej SUCHÝ**  
Osobní číslo: **E17N0056P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Dopravní elektroinženýrství a autoelektronika**  
Název tématu: **Implementace řídicí jednotky motokáry s elektrickým  
pohonem**  
Zadávací katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

**Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :**

Cílem práce je navrhnout elektroniku hlavní řídicí jednotky pro elektrickou motokáru. Jednotka bude mít na starosti řízení pohonu (měniče) motokáry, komunikaci s čidly pedálů, komunikaci s bateriemi a zobrazovací jednotkou.

1. Teoreticky zpracujte způsob řízení pro použitý motor motokáry.
2. Zpracujte základní přehled budičů výkonových prvků měničů.
3. Navrhněte schéma a plošný spoj řídicí jednotky motokáry s ohledem na její konstrukční uspořádání.
4. Implementujte řízení použitého motoru a komunikace s externími jednotkami (baterie, displej, pedály).

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

Mann, B.: C pro mikrokontroléry

Vedoucí diplomové práce: Ing. Tomáš Košan, Ph.D.

Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání diplomové práce: 5. října 2018

Termín odevzdání diplomové práce: 30. května 2019

  
Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.  
děkan



  
Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev  
vedoucí katedry

V Plzni dne 5. října 2018

## **Abstrakt**

Předkládaná diplomová práce se zabývá návrhem řídicí jednotky, která bude osazena do motokáry a bude řídit PMSM motor tak i ostatní periférie. V první části práce je teoreticky rozebráno řízení PMSM motoru, a především vektorové řízení používané v tomto projektu. V druhé části jsou popsány budiče výkonových prvků a jejich topologie napájení pro třífázový střídač. V další části je popisován návrh DPS a popis jednotlivých obvodů obsažených na desce. Mezi popisované obvody patří zdroje, výkonové výstupy, čidla, ovládání nabíječky při nabíjení a komunikace. Poslední část se zabývá implementací řídicího algoritmu do mikrokontroléru TMS320F28335 a popisem důležitých částí kódu.

## **Klíčová slova**

Synchronní motor s permanentními magnety, PMSM, TMS320F28335, vektorové řízení, čidlo polohy, budiče výkonových prvků, 3-fázový střídač

**Abstract**

This diploma thesis deals with the design of the control unit, which will be installed in the electric kart and it will control the permanent magnet synchronous motor as well as other peripherals. In the first part of the thesis, the PMSM motor control, and especially the vector control used in this project, is theoretically discussed. The second part describes the power devices drivers and their powering scheme for a three-phase inverter. The next section describes the design of the PCB and the description of the schematic of control unit. The circuits described include power supplies, power outputs, sensors, charger control and communication. The last part deals with the implementation of the control algorithm into microcontroller TMS320F28335 and the description of important parts of code.

**Keywords**

Permanent magnet synchronous motor, PMSM, TMS320F28335, field-oriented control, position sensor, drivers for power transistors, 3-phase inverter

## **Prohlášení**

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 29.5.2019

Ondřej Suchý

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Tomášovi Košanovi, Ph.D. za mnoho cenných profesionálních rad, připomínek, metodické vedení práce a pomoc při oživování řídicí jednotky.

## Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>11</b>
<b>1 ŘÍZENÍ SYNCHRONNÍHO MOTORU S PERMANENTNÍMI MAGNETY</b> .....	<b>13</b>
1.1 MATEMATICKÝ MODEL PMSM MOTORU .....	13
1.2 PRACOVNÍ REŽIMY MOTORU .....	14
1.3 VEKTOROVÉ ŘÍZENÍ.....	14
1.3.1 Transformace Clarkové .....	15
1.3.2 Parkova transformace .....	16
<b>2 BUDIČE VÝKONOVÝCH PRVKŮ</b> .....	<b>17</b>
2.1 TOPOLOGIE ZAPOJENÍ DC-DC MĚNIČŮ PRO BUDIČE VÝKONOVÝCH PRVKŮ .....	17
<b>3 NÁVRH ŘÍDICÍ DESKY</b> .....	<b>19</b>
3.1 VÝBĚR MIKROKONTROLÉRU .....	21
3.2 MIKROKONTROLÉR TMS320F28335 .....	22
3.3 ZDROJE.....	23
3.3.1 Zdroj 12V, 5A .....	23
3.3.2 Zdroje 5V, 3,3V a 1,9V .....	24
3.4 VSTUPNÍ OBVODY.....	25
3.5 BUDIČE VÝKONOVÝCH PRVKŮ .....	26
3.6 ČIDLA.....	30
3.6.1 Měření proudu .....	30
3.6.2 Napěťový senzor .....	32
3.6.3 Čidla teploty .....	32
3.7 VÝKONOVÉ VÝSTUPY .....	33
3.8 OVLÁDÁNÍ NABÍJEČKY .....	35
3.9 KOMUNIKAČNÍ SBĚRNICE .....	36
3.9.1 CAN .....	36
3.9.2 RS-485 .....	37
3.10 URČOVÁNÍ POLOHY ROTORU .....	39



3.10.1	AS5040 .....	39
3.10.2	DPS pro čidlo .....	40
<b>4</b>	<b>IMPLEMENTACE ŘÍDICÍHO ALGORITMU DO TMS320F28335 .....</b>	<b>40</b>
4.1	REGULAČNÍ SCHÉMA VEKTOROVÉHO ŘÍZENÍ .....	40
4.1.1	Transformace zapsané v jazyce C .....	42
4.1.2	PS regulátor .....	42
4.1.3	Zpětná transformace v jazyce C .....	43
4.1.4	Převod veličin pro PWM jednotku .....	44
4.1.5	Časová návaznost v regulační smyčce .....	45
4.1.6	Výpočet polohy .....	46
<b>5</b>	<b>VÝSLEDKY MĚŘENÍ .....</b>	<b>47</b>
<b>6</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>52</b>
	<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ .....</b>	<b>53</b>
	<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>55</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>56</b>

## Úvod

Cílem této práce bylo realizovat řídicí jednotku (dále jen ř. j.), která bude ovládat synchronní motor s permanentními magnety, resp. BLDC se sinusovým indukovaným napětím. Tato kompaktní jednotka (měnič integrovaný s ř.j. do jedné sestavy) bude namontována na elektrickou motokáru, kterou má katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky (KEV) pro propagační účely. Motokára byla do současnosti osazena pouze snižovacím pulzním měničem, který byl řízen mikrokontrolérem Atmer AVR. V současné době je použit stejnosměrný motor s permanentními magnety.

Náhrada stávajícího řešení by měla dosáhnout stejného výkonu, ale s menší hmotností a vyšší účinností. Původní řízení neumožňovalo rekuperaci do baterii což se současným zapojením je již možné. Další novou vlastností je možnost komunikace jak s displejem motokáry, tak i s balancery připojenými na baterie. Kompaktní blok měniče s ř.j. je také navržen s ohledem na vysokou odolnost vůči stříkající vodě. Bude osazen do bedny, která bude kompletně utěsněná proti vniknutí vody. Pro tento účel byly vybrány konektory s krytím minimálně IPx4 a již při samotném návrhu se s tímto požadavkem počítalo.

Tato práce je rozdělena do několika kapitol, kapitola 1 popisuje základní principy funkce synchronního motoru s permanentními magnety a jeho matematický model. V kapitole 2 jsou popsány možnosti připojení DC-DC měničů k budičům výkonových MOS-FET tranzistorů. Třetí část práce obsahuje hardwarovou specifikaci a popis jednotlivých funkčních bloků schématu. Čtvrtá kapitola se věnuje implementaci řídicího algoritmu do mikrokontroléru. V kapitole 5 jsou rozebrány výsledky měření.

Celá práce je zakončena závěrem, kde jsou shrnuty dosažené výsledky z celého návrhu řídicí jednotky.

## Seznam symbolů a zkratek

PMSM.....	Synchronní motor s permanentními magnety
DPS.....	Deska plošných spojů
CAN.....	Controller Area Network, komunikační sběrnice
RS-485.....	Typ sériové komunikace
DC-DC.....	Pulzní měnič
MOS-FET.....	Metal oxide semiconductor field effect transistor
MCU.....	Mikrokontrolér
DSP.....	Digitální signálový procesor (Digital signal processor)
PWM.....	Pulzně šířková modulace
ADC.....	Analogově digitální převodník
eCAP.....	Jednotka pro zachycení impulzů (Enhanced capture modul)
eQEP.....	Kvadrurní enkodér (Enhanced quadrature encoder pulse modul)
GPIO.....	General purpose input output
I2C.....	Inter-Integral circuit sériová sběrnice
SPI.....	Sériová sběrnice (Serial peripheral interface)
IRC.....	Inkrementální čidlo
RSO.....	Informační výstup z budiče (Ready status output)
TOP.....	Horní skupina prvků
BOT.....	Dolní skupina prvků
NTC.....	Termistor s negativním teplotním koeficientem
TBPRD.....	Time-Base Period Register
TBCTR.....	Time-Base Counter Register
SOC.....	Start of conversion
$R_t$ .....	Odpor
$I_{d,q}$ .....	Tokotvorný a momentotvorný proud
$\Psi_d$ .....	Magnetický tok v ose d
$\Psi_q$ .....	Magnetický tok v ose q
$\Psi_{PM}$ .....	Magnetický tok vytvářející permanentní magnety
$p_p$ .....	Počet pólpárů
$L_{d,q}$ .....	Indukčnost

$\omega$ .....	Otáčky
$M$ .....	Moment
$I_{a, b, c}$ .....	Proudy v 3. fázovém systému
$I_{\alpha, \beta}$ .....	Proudy ve stacionárním souřadném systému
$U_{a, b, c}$ .....	Řídicí napětí jednotlivých fází pro PWM jednotku
$U_{\alpha, \beta}$ .....	Řídicí napětí ve stacionárním souřadném systému
$U_{d, q}$ .....	Řídicí napětí v rotujícím souřadném systému
$\vartheta$ .....	Úhel natočení statoru vůči rotoru
$\beta$ .....	Zátěžný úhel
$V_{IN}$ .....	Vstupní napětí
$V_{OUT}$ .....	Výstupní napětí
$V_{FB}$ .....	Napětí ze zpětné vazby
$R_H$ .....	Horní rezistor v odporovém děliči
$R_L$ .....	Dolní rezistor v odporovém děliči
$K_P$ .....	Proporcionální konstanta
$T_R$ .....	Sumační (integrační) konstanta
$\varepsilon(t)$ .....	Regulační odchylka
$\frac{d}{dt}$ .....	Derivace funkce podle času
$\Delta t$ .....	Doba jednoho taktu mikrokontroléru
$T$ .....	Teplota
$t_{on}$ .....	Doba, kdy je PWM signál v sepnutém stavu
$t_p$ .....	Doba periody
$t_{DC}$ .....	Střída signálu PWM
$T_{PWM}$ .....	Perioda spínací frekvence PWM
$T_{CLK}$ .....	Perioda hodin mikrokontroléru

# 1 Řízení synchronního motoru s permanentními magnety

Synchronní motor s permanentními magnety (PMSM) má dvě hlavní části rotor a stator. Stator je složen z plechů a v jeho drážkách jsou umístěny cívky posunutě o  $120^\circ$ . Rotor se skládá z rotorového jádra a permanentních magnetů. Umístění magnetů závisí na konstrukci motoru obvykle jsou přilepeny na povrchu jádra a omotány bandáží [1].

Při napájení statorového vinutí třífázovým zdrojem napětí se ve statoru vytvoří točivé magnetické pole, jehož magnetické účinky jsou obdobné, jako účinky otáčejícího se magnetu. Rychlost otáčení točivého pole je dána frekvencí napájecího napětí statoru a konstrukcí stroje. Póly permanentních magnetů na rotoru jsou vázány silově na točivé magnetické pole statoru, rotor je tedy vlivem magnetických sil unášen a jeho rychlost je s rychlostí točivého pole totožná. Tato vlastnost je pro synchronní motor charakteristická. Z uvedených skutečností potom vyplývá, že rychlost otáčení rotoru synchronního motoru je možno řídit změnou frekvence napájecího napětí statoru [2].

## 1.1 Matematický model PMSM motoru

Matematický model synchronního stroje je odvozen z těchto předpokladů (viz. [3]):

- Třífázová napájecí soustava je souměrná a všechna napětí jsou harmonická
- vinutí jednotlivých fází jsou sinusově rozložena podél vzduchové mezery v drážkách statoru
- indukčnosti a odpory jsou ve fázích shodné
- stroj pracuje v lineární části magnetizační charakteristiky
- ztráty v železe jsou zanedbatelné
- nulový vodič není vyveden

Napětíové rovnice motoru:

$$U_d = R_l \cdot I_d + \frac{d\Psi_d}{dt} - \omega \cdot \Psi_q = R_l \cdot I_d + L_d \frac{dI_d}{dt} - \omega L_q \cdot I_q \quad (1.1)$$

$$U_q = R_l \cdot I_q + \frac{d\Psi_q}{dt} - \omega \cdot \Psi_d = R_l \cdot I_q + L_q \frac{dI_q}{dt} - \omega \cdot (L_d \cdot I_d + \Psi_{PM}) \quad (1.2)$$

Sprážené magnetické toky:

$$\Psi_d = L_d \cdot I_d + \Psi_{PM} \quad (1.3)$$

$$\Psi_q = L_q \cdot I_q \quad (1.4)$$

Elektromagnetický moment:

$$M = \frac{3}{2} \cdot p_p \cdot \Psi_{PM} \cdot I_q \quad (1.5)$$

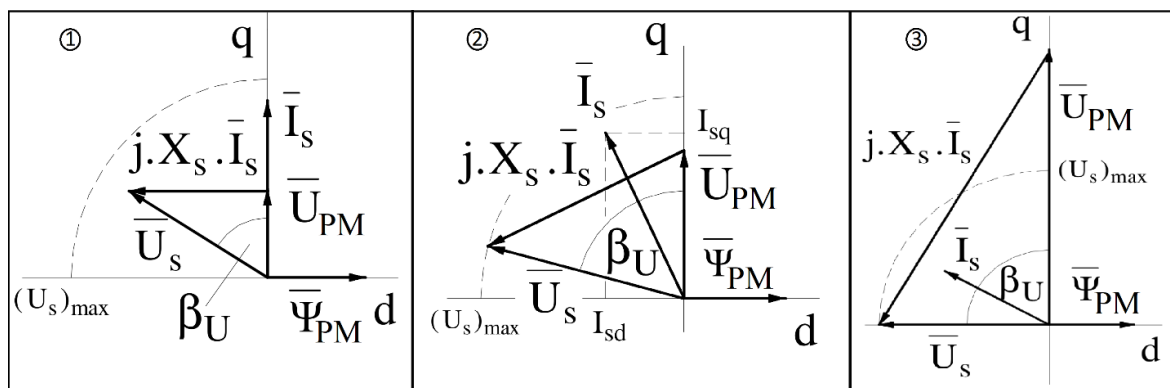
## 1.2 Pracovní režimy motoru

Popisované režimy jsou zobrazeny fázorovými diagramy na obr. 1.

V režimu 1 pracuje motor při nízkých otáčkách. V tomto režimu vytváří motor indukované napětí o velikosti menší, než je maximální napětí střídače a motor se neodbuzuje. Také se udržuje velikost  $I_d = 0$ , což zajistí nejmenší ztráty při daném momentu viz. rovnice (1.5).

V režimu 2 má motor otáčky, které vytváří indukované napětí větší, než je maximální napětí střídače. Z toho důvodu je nutné snižovat satorové napětí  $U_s$ . Snižování se provádí odbuzováním prostřednictvím složky satorového proudu  $I_{sd}$ , který se volí záporný.

V režimu 3 dosahuje zátěžný úhel zatíženého motoru hodnoty  $\beta = 90^\circ$ . Při tomto zátěžném úhlu, jíž dále nemůžeme motor odbuzovat a motor může pracovat jen s jedním vektorem proudu. Tento režim je pro některé typy pohonů velmi výhodný, protože motor pracuje s konstantním výkonem podobně jako stejnosměrný pohon s odbuzeným motorem [4].

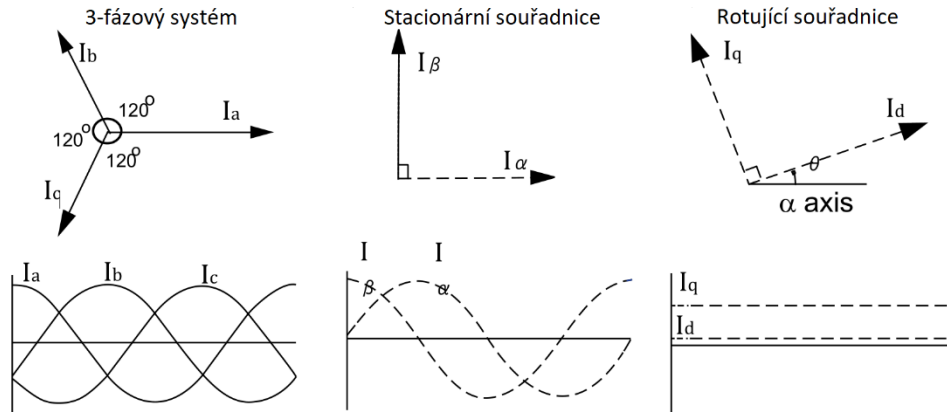


Obrázek 1: Fázorové diagramy PMSM motoru v různých režimech [4]

## 1.3 Vektorové řízení

Vektorové řízení bylo navrženo s ohledem na řízení synchronních a asynchronních motorů podobně jako stejnosměrné motory, tedy mít možnost zadávat moment a magnetický tok odděleně. Podstatou tohoto řízení je rozložení vektoru satorového proudu na

momentotvornou složku  $I_q$  a tokotvornou složku  $I_d$  v souřadném rotujícím systému d, q zobrazeno na obr. 2. Souřadnice d-q jsou svázány s rotorem což vede na výše uvedené chování obdobné jako u ss. motoru, tj. proudy  $I_d$  a  $I_q$  jsou z pohledu regulace stejnosměrné hodnoty. Jednotlivé transformace jsou popsány dále v této kapitole.



Obrázek 2: Přehled jednotlivých souřadných systémů [5]

### 1.3.1 Transformace Clarkové

Transformace Clarkové převádí 3-fázový střídavý systém  $I_a, I_b, I_c$  na 2-fázový (stacionární systém)  $I_\alpha, I_\beta$ , což lze vidět na obr. 3.

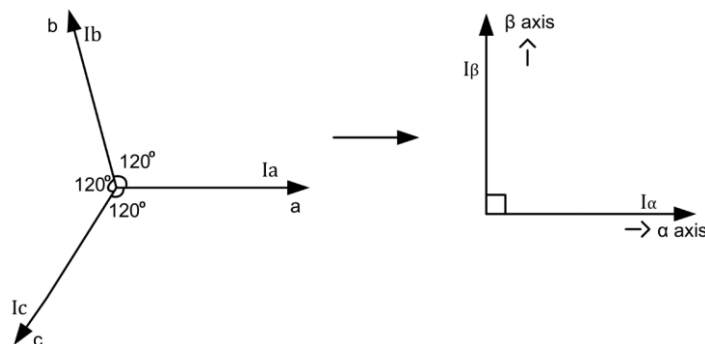
$$I_\alpha = \frac{2}{3}I_a - \frac{1}{3}(I_b - I_c) \quad (1.6)$$

$$I_\beta = \frac{2}{\sqrt{3}}(I_b - I_c) \quad (1.7)$$

Pokud soustava splňuje podmínku  $I_a + I_b + I_c = 0$ , rovnice se nám výrazně zjednoduší na:

$$I_\alpha = I_a \quad (1.8)$$

$$I_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}}(I_a + 2I_b) \quad (1.9)$$



Obrázek 3: 3-fázový systém abc a stacionární systém  $\alpha$ - $\beta$  [5]

Zpětná transformace převádí modulační napětí vystupující z Parkovy zpětné transformace na 3-fázová modulační napětí.

Pro zpětnou transformaci platí vztahy:

$$U_a = U_\alpha \quad (1.10)$$

$$U_b = \frac{-U_\alpha + \sqrt{3} \cdot U_\beta}{2} \quad (1.11)$$

$$U_c = \frac{-U_\alpha - \sqrt{3} \cdot U_\beta}{2} \quad (1.12)$$

kde,

$U_\alpha, U_\beta, U_c$  jsou 3-fázové veličiny

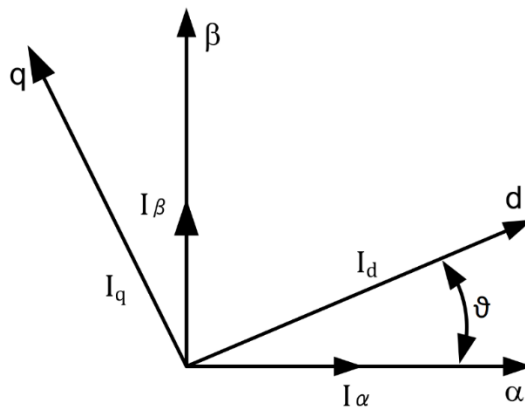
$U_\alpha, U_\beta$  jsou stacionární veličiny.

### 1.3.2 Parkova transformace

Tato transformace popisuje vztah mezi stojícím souřadným systémem  $\alpha, \beta$  a rotujícím souřadným systémem  $d, q$ . Tyto dva systémy jsou mezi sebou posunuty o úhel  $\vartheta$  (viz. obr. 4), který udává vzájemné natočení mezi osou statoru a osou rotoru. Touto transformací získáme následující vztahy:

$$I_d = I_\alpha \cdot \cos(\vartheta) + I_\beta \cdot \sin(\vartheta) \quad (1.13)$$

$$I_q = I_\beta \cdot \cos(\vartheta) - I_\alpha \cdot \sin(\vartheta) \quad (1.14)$$



Obrázek 4: Rotující souřadný systém [5]

Zpětná transformace převádí modulační napětí vystupující z regulátorů na stacionární modulační napětí.

Pro zpětnou transformaci platí:

$$U_\alpha = U_d \cdot \cos(\vartheta) - U_q \cdot \sin(\vartheta) \quad (1.15)$$

$$U_\beta = U_q \cdot \cos(\vartheta) + U_d \cdot \sin(\vartheta) \quad (1.16)$$



## 2 Budiče výkonových prvků

Budiče slouží jako rozhraní mezi řídicími obvody a výkonovými prvky typu MOS-FET. Zajišťují především správné spínání a vypínání součástky se správnými napěťovými a proudovými úrovněmi a strmostmi vhodné pro daný typ výkonového prvku. Budiče jsou většinou konstruovány tak, že zajišťují galvanické oddělení mezi řídicí elektronikou a výkonovou částí obvodu.

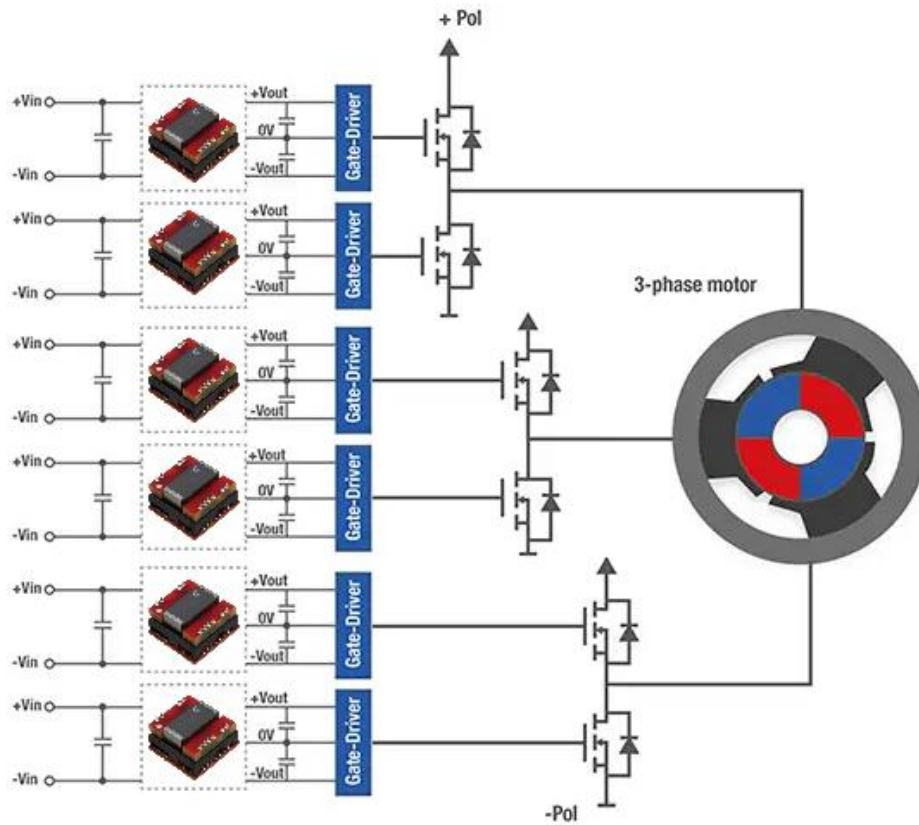
V současnosti již také budiče obsahují mnoho ochranných prvků mezi ně patří například desaturační ochrana, podpětová ochrana a miller clamp, která se využívá tam kde není k dispozici záporné napětí pro vypínání prvku.

### 2.1 Topologie zapojení DC-DC měničů pro budiče výkonových prvků

Obecně lze rozdělit prvky na dvě skupiny: horní a dolní prvky. Ovládání dolních prvků na střídači je vcelku bezproblémové, jelikož je jejich řídicí napětí vztažené vůči zápornému pólu ss. meziobvodu. Na rozdíl od horní skupiny tranzistorů, které jsou opřeny proti plovoucímu napětí (mají potenciál fázového napětí měniče) a k jejich ovládání jsou potřeba pomocné obvody. Existují různé možnosti připojení DC-DC měničů, některé z nich jsou popsány v této kapitole.

#### 1) Každý prvek má svůj vlastní DC-DC měnič.

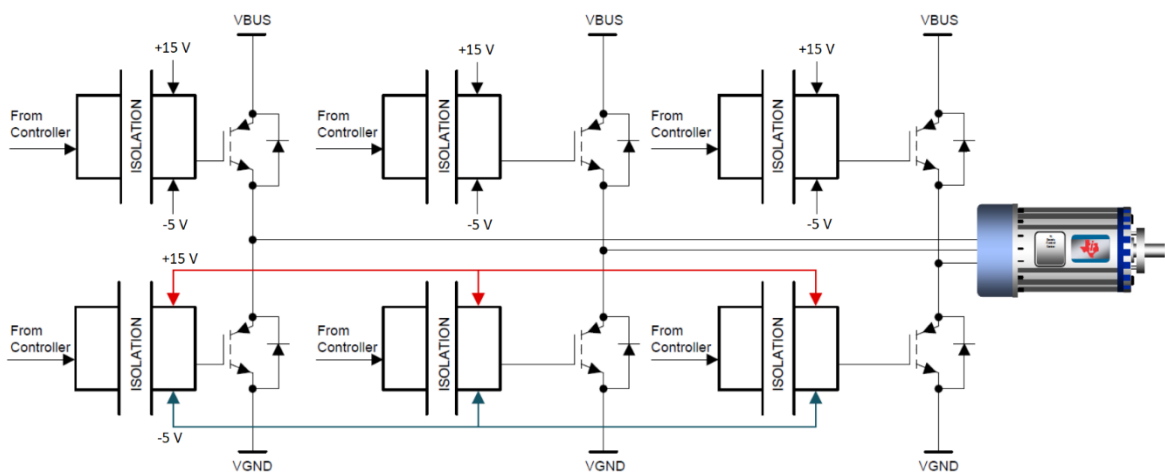
Tento typ zapojení je vhodný tam kde je potřeba budiče a DC-DC měniče rozmístit na různá místa na DPS. Tento typ zapojení je zobrazen na obr.5.



Obrázek 5: Zapojení DC-DC měničů pro každý budič zvlášť [6]

## 2) Horní prvky oddělené, spodní prvky jeden společný měnič

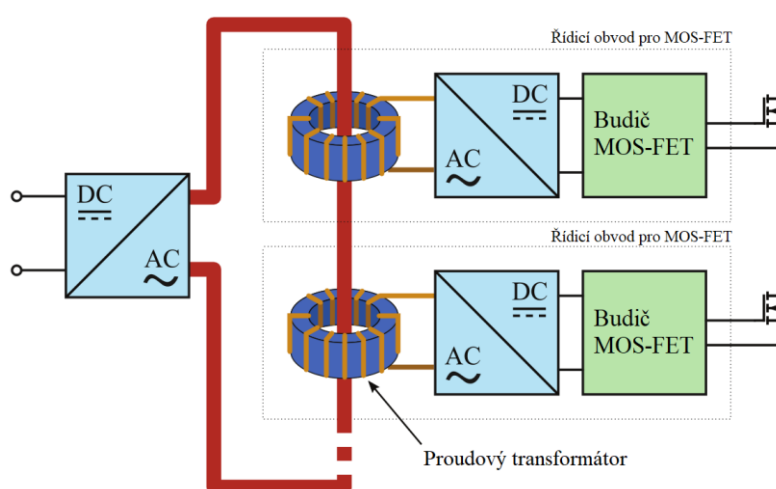
Každý horní prvek má svůj vlastní DC-DC měnič a spodní prvky mají jeden společný, to je možné vidět na obr. 6. Spodní DC-DC měnič musí být dimenzovaný na výkon potřebný pro zapínání/vypínání všech spodních prvků. Výhodou tohoto zapojení je menší počet DC-DC měničů a tím i menší zastavěná plocha na DPS.



Obrázek 6: Zapojení DC-DC měničů pro horní budiče zvlášť a spodní společně [7]

### 3) DC-DC s jedním primárním vinutím

Speciální typ měniče používá na vstupní straně střídavý proudový zdroj (viz. obr. 7). Tento zdroj se používá pro napájení řídicího obvodu (budiče) pro MOS-FET. Přivedení napájení z proudového zdroje pro jednotlivé budiče je zajištěno přes izolovaný vodič. Vodič prochází skrz toroidní jádra, na kterých jsou namotané cívky. V každé z cívek se indukuje napětí, které je poté usměrněno a toto napětí je využito k napájení zapínacích a vypínacích obvodů polovodičové součástky. Tento způsob napájení zaručuje bezpečné, variabilní připojení galvanicky oddělené od vstupního zdroje. Nevýhodou tohoto zapojení je potřeba proudového zdroje o výkonu, který bude schopen napájet veškeré řídicí obvody.



Obrázek 7: Speciální typ zdroje pro budiče [8]

## 3 Návrh řídicí desky

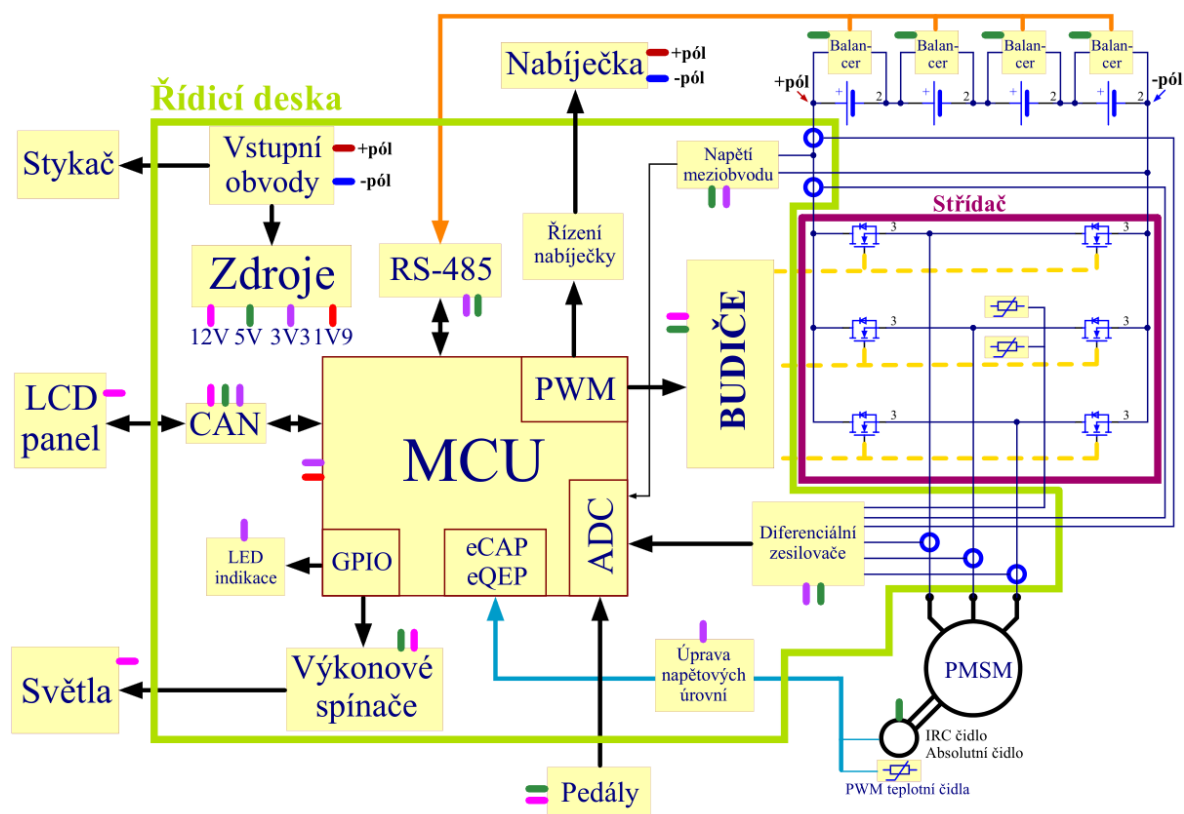
Pro návrh řídicí desky byl využit program Altium Designer 17. Tento program v sobě sdružuje veškeré funkce, které jsou spojené s návrhem elektroniky od schématu přes plošný spoj až po výrobní a servisní dokumentaci.

### Požadavky na řídicí desku pro elektrickou motokáru:

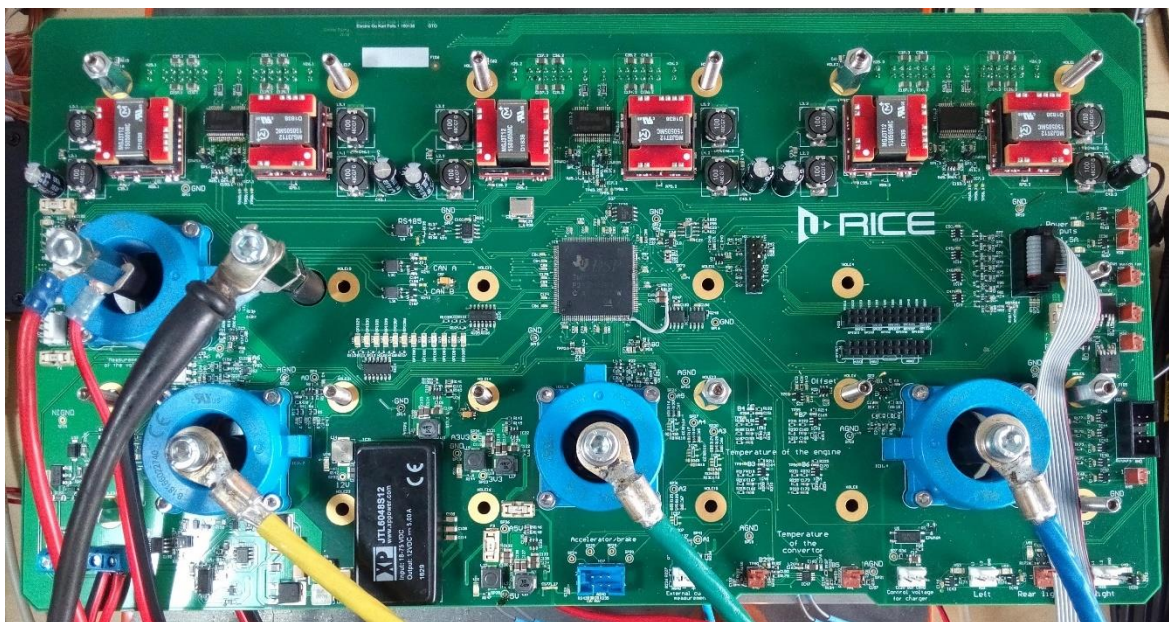
- Napájecí napětí 35 – 65V, meziobvod i řídicí jednotka
- Galvanické oddělení desky od baterie
- Napájení obvodů mimo řídicí desku s ochrannými pojistkami (balancery atp.)
- Musí poskytovat sběrnice komunikace typu CAN a RS485
- Na desce budou budiče pro MOS-FET tranzistory s ochrannými obvody

- Výkonové výstupy pro napájení světel
- Měření napětí pro vyhodnocování napětí baterii
- Ovládací obvody pro nabíječku baterií
- Proudové senzory přímo na desce
- Externí měření nabíjecího proudu baterie mimo desku
- Ovládací obvody pro stykač
- Obvody pro vyhodnocování teplot na chladiči střídače a PMSM motoru
- Obvody pro vyhodnocování polohy pedálů brzdy a plynu
- Vizuální signalizaci stavu výkonových výstupů, funkčnosti zdrojů a dalších režimů
- Bezpečnostní zapínání napájení ke kontrole veškerých vstupních veličin důležitých pro motokáru

Dále v této kapitole budou postupně popsány jednotlivé bloky, které jsou na obr. 8. Hotová deska, která bude osazena do motokáry je na obr. 9.



Obrázek 8: Blokové schéma řídicí desky elektrické motokáry



Obrázek 9: Osazená řídicí jednotka s připojeným PMSM motorem

### 3.1 Výběr mikrokontroléru

K řízení měniče motokáry bylo potřeba vybrat mikrokontrolér, který dokáže nejen řídit PMSM motor, ale bude mít i dostatek periférií pro ovládání veškerých využívaných zařízení na motokáře. Mezi hlavní kritéria pro výběr patřily A/D převodníky pro možnost analýzy veškerých měřených veličin. Dalším důležitým kritériem byly PWM výstupy, zde byl kladen důraz na možnosti jejich nastavení, počet výstupů a zda obsahují nějakou formu fault vstupu. Např. U 28335 jsou to tzv. trip zone, což jsou GPIO vstupy, které jsou nezávislé na hodinovém kmitočtu mikrokontroléru, jsou schopny vypnout PWM výstupy i v případě selhání hodin MCU. Posledním kritériem byl počet GPIO výstupů k ovládání stykače, světel a dalších obvodů zapojených na motokáře.

V tab. 1 je porovnání tří mikrokontrolérů od Texas Instruments, NXP USA a STMicroelectronics mezi nimiž bylo vybíráno.

Tabulka 1: Porovnání tří typů mikrokontrolérů od různých výrobců

Výrobce a typ	Texas Instruments	NXP USA	STMicroelectronics
	TMS320F28335 [24]	LPC1833FET256,551 [22]	SPC564A80L7CFAR [23]
Série	C2000 Delfino	LPC18xx	AEC - Q100
Jádro procesoru	C28x	ARM Cortex M3	e200z4
Velikost jádra	32-bit	32-bit	32-bit
Rychlost	150MHz	150MHz	150MHz
Počet I/O	88	80	118

Velikost programová paměť	512kB (256K x 16)	512kB (512K x 8)	4M (4M x 8)
Typ programové paměti	FLASH	FLASH	FLASH
Velikost RAM	34K x 16	136K x 8	192K x 8
Napájecí napětí	1,805 - 1,995V	2 - 3,6V	1,14 - 1,32V
Typ oscilátoru	Vnitřní	Vnitřní	Vnitřní
A/D převodníky	16 x 12b	16 x 10b	34 x 12b
D/A převodníky	0	1 x 10b	0
Periférie	PWM, DMA, WDT, POR	PWM, DMA, POR, WDT, I2C	PWM, DMA, WDT, POR
Připojení	CANbus, McBSP, SCI, SPI, UART, EBI	CANbus, I2C, SPI, SSI, SSP, USB OTG	CANbus, LINbus, SCI, SPI
Teplotní rozsah	-40°C ~ 85°C	-40°C ~ 85°C	-40°C ~ 85°C

Nakonec byl vybrán procesor od firmy Texas instrument z řady mikrokontrolérů Delfino C2000 typ TMS320F28335. Protože má lépe řešené periférie určené přímo pro výkonovou elektroniku a má rozsáhlé příklady kódů pro nastavování periférii. Též byla na tomto MCU, dělána semestrální práce z předmětu MRP, ze které bylo možné použít nastavení některých používaných periférii.

### 3.2 Mikrokontrolér TMS320F28335

- Napájení 1,9V jádro, 3,3V I/O piny
- Hodinový kmitočet jádra až 150MHz
- Paměť 256K × 16 Flash, 34K × 16 SARAM
- 18 PWM výstupů, 6 HRPWM výstupů, 6 event capture inputs
- 8x 32-bit časovačů (6 pro eCAP a 2 pro eQEP)
- 9x 16-bit časovačů (6 pro ePWM a 3 pro XINTCTR)
- 12-bit ADC, 16 kanálů (2x8), 2x sample/hold jednotky, rozsah 0 – 3V
- 88 multiplexovaných GPIO pinů se vstupním filtrem
- 2x CAN, 3x SCI, 2x McBSP, SPI, I2C

### 3.3 Zdroje

#### 3.3.1 Zdroj 12V, 5A

V požadavcích na řídicí jednotku je vstupní rozsah napětí 35 – 65V pro jmenovitou hodnotu 48V. V celém tomto rozsahu musí být spolehlivě zajištěno napájení celé řídicí jednotky. Vstupní snižovací měnič má za úkol převádět napětí baterie na 12V, ze kterého jsou napájeny DC-DC měniče pro střídač, výkonové výstupy, světla, CAN konektor a slouží také jako napájení pro zdroje nižších napětí.

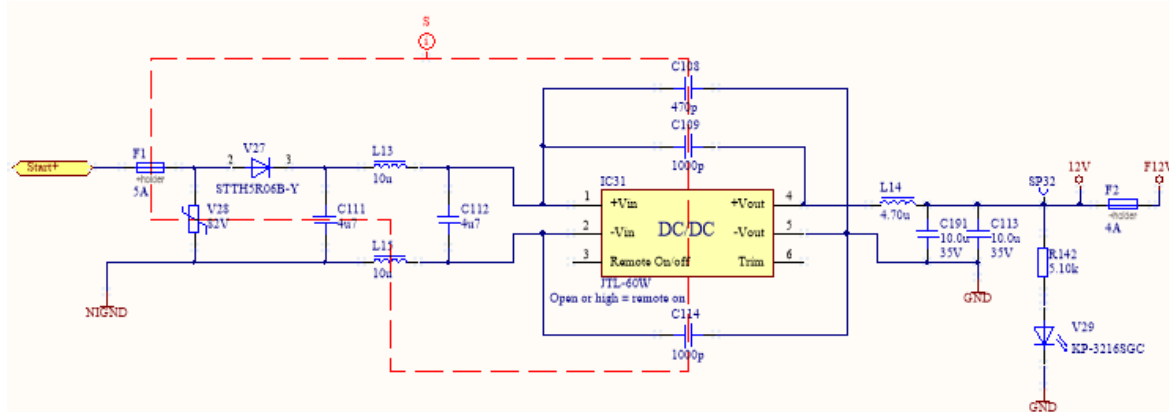
Největší odběr má osvětlení motokáry, hlavně přední LED světla. Obě přední světla mají dohromady odběr 2A. Tři zadní světla mají odběr každé 200mA. Dalším velkým odběrem jsou DC-DC měniče, které mají každý odběr 310mA při jmenovité zátěži. Celkový odběr všech periférií byl sečten a s ponecháním určité rezervy stanoven na 5A.

Při výběru bylo uvažováno nad dvěma variantami: 1) využít integrovaný obvod od Texas instrument LM a připojit k němu pomocné obvody nutné pro jeho funkci nebo 2) využít již hotový zdroj od firmy XP Power. Jelikož byl požadovaný integrovaný obvod pro daný rozsah napětí v době návrhu velmi těžko dostupný a neměl galvanické oddělení od napájení, byl proto zvolen zdroj XP power JTL6048S12 [10], který je galvanicky oddělen, jeho průrazné napětí je 1,6kV DC a jeho účinnost je i při malém odběru velmi dobrá, jeho parametry jsou uvedeny v tab. 2. Účinnost zdroje byl důležitý parametr z důvodu napájení z baterií, kde je vždy snaha dosahovat malých ztrát.

Tabulka 2: Parametry zdroje JTL6048S12

Vstupní napětí	Vstupní proud		Výstupní napětí	Výkon	Účinnost	Zapínací čas	Provozní teplota	ESD odolnost	
	Bez zátěže	Max. zátěž						Dotykový výboj	Vzdušný výboj
18 - 75V	25mA	1350mA	12V	50W	92%	60ms	-40 až +85°C	±6kV	±8kV

Zdroj má na vstupu ochranné obvody proti proudovému přetížení je zapojena 5A pojistka F1, proti přepětí je paralelně zapojen varistor V28 a také je zapojena dioda V27 proti přepólování (viz. obr. 10). Kapacity C111, C112 a indukčnosti L13, L15 slouží jako vstupní filtr pro měnič IC31. Na výstupní straně je filtr typu dolní propust (L14, C113 a C191) pro vyhlazení napětí využívaného dalšími obvody na řídicí desce ale i mimo ní (napájení zobrazovací jednotky). Za pojistku F2 jsou připojeny výkonové výstupy na 12V a napájení světel, jejich ovládání je popsáno v kapitole 3.7.



Obrázek 10: Schéma zapojení zdroje 12V, 5A

### 3.3.2 Zdroje 5V, 3,3V a 1,9V

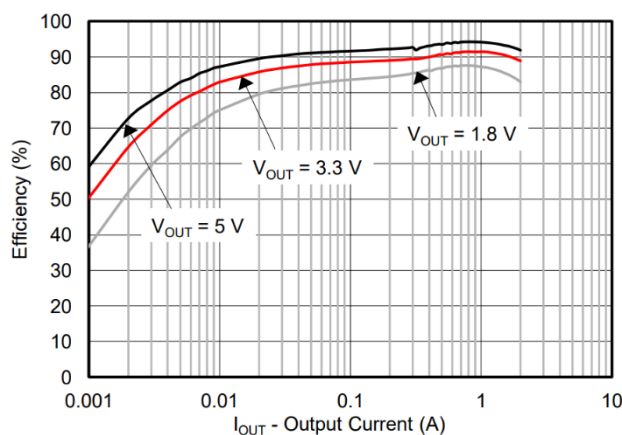
MCU, snímače a další obvody potřebují napájení menší než 12V, pro tyto obvody jsou na řídicí desce osazeny zdroje, které na svém výstupu mají požadované napětí pro danou periférii. Tyto zdroje využívají snižovací měnič založený na obvodu TPS562200 [11]. Tento snižovací měnič byl vybrán, jelikož pro svojí funkci potřebuje jen velmi malý počet součástek. Hlavní parametry snižovacího měniče jsou uvedeny v tab. 3. Měnič má v sobě zabudovány ochrany proti přepětí, podpětí, proudovému přetížení a teplotní ochranu. Účinnost měniče je závislá na velikosti odebíraného proudu a výstupního napětí. Přesnou velikost účinnosti lze vidět z obr. 11.

Tabulka 3: Hlavní parametry zdroje TMS562200

Vstupní napětí		Výstupní napětí		Výstupní proud	Spínací frekvence	Pouzdro
Min	Max	Min	Max			
4,5V	17V	0,76V	7V	2A	650 kHz	SOT-6

Na vstupní straně měniče jsou zapojeny oddělovací a filtrační kondenzátory. Oddělovací kondenzátor má velikost 10µF. Filtrační kondenzátor slouží ke snížení vysokofrekvenčního rušení a má velikost 100nF. Pin EN slouží k zapnutí snižovacího měniče toho lze využít např. pro kontrolovaný náběh napájecích napětí (ve smyslu jejich pořadí). V případě řídicí desky je pin připojen přímo na  $V_{IN}$  a je tedy zapnut, jakmile je na jeho vstupu napájení. Na výstupu SW je připojena cívka L17, která má za úkol vyhladit výstupní proud a kondenzátory C116, C117 a C118 vyhlazují napětí. Odporový dělič je zapojen v místě kde již je vyhlazeno napětí a správným poměrem odporů určujeme velikost výstupního napětí uvedené v tab. 4. K okamžité indikaci, zda je na výstupu napětí je zapojena LED dioda.

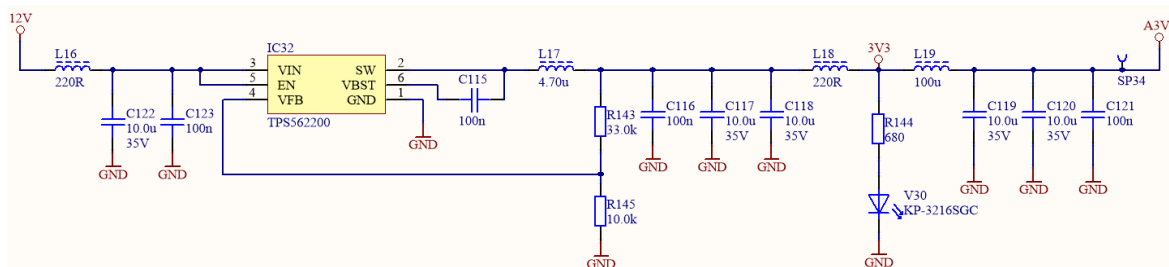




Tabulka 4: Velikosti odporů  $R_H$ ,  $R_L$  pro vstupní pin  $V_{FB}$

$V_{OUT}$	1,9V	3,3V	5V
$R_H$	15k	33k	56k
$R_L$	10k	10k	10k

Obrázek 11: Účinnost snižovacího měniče [11]



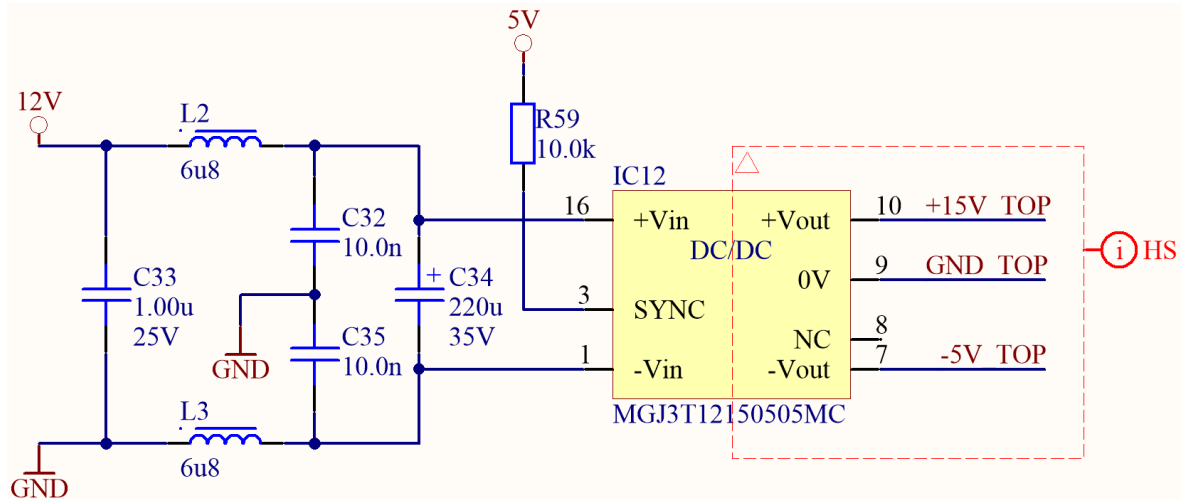
Obrázek 12: Schéma zapojení zdroje 3V3

### 3.4 Vstupní obvody

Dokud nedojde k zapnutí klíčku je celá motokára odpojena od napájení z baterii. Při zapnutí napájení klíčkem je napájení přivedeno do řídicí desky, kde dojde k analyzování vstupního napětí napěťovým senzorem a podle této informace se rozhodne o trvalém připojení napájení.

Vstupní obvody zobrazené na obr. 13, zajišťují možnost odpojení řídicí jednotky od baterie při nedostatečném napětí. Baterie je tak chráněna proti úplnému vybití. Vstupní napětí vstupuje vodičem označeným key z tohoto vodiče je napájen snižovací měnič LM5019 [25] s velmi malým klidovým odběrem, který zajišťuje napájení pro TLC555 [12]. TLC555 je zapojena jako obvod pro zpožděné vypnutí. To znamená, že jakmile se na napájecích svorkách objeví dostatečně velké napětí je výstup okamžitě sepnut a setrvá tak po dobu danou (3.1). Po uplynutí této doby dojde k odpojení tranzistoru Q8. Během této doby by měl mít mikrokontrolér již změřeno napětí na vstupu a vyhodnocenu jeho dostatečnou velikost pro provoz motokáry. Pokud je napětí dostatečné je na vodič ON\_signal přivedena log. „1“ a přes optočlen se udržuje zapnutý tranzistor Q8, který do té doby udržoval obvod s TLC555. Tranzistor Q8 zapíná výkonový tranzistor Q4, který přivádí napájení do celé řídicí desky.

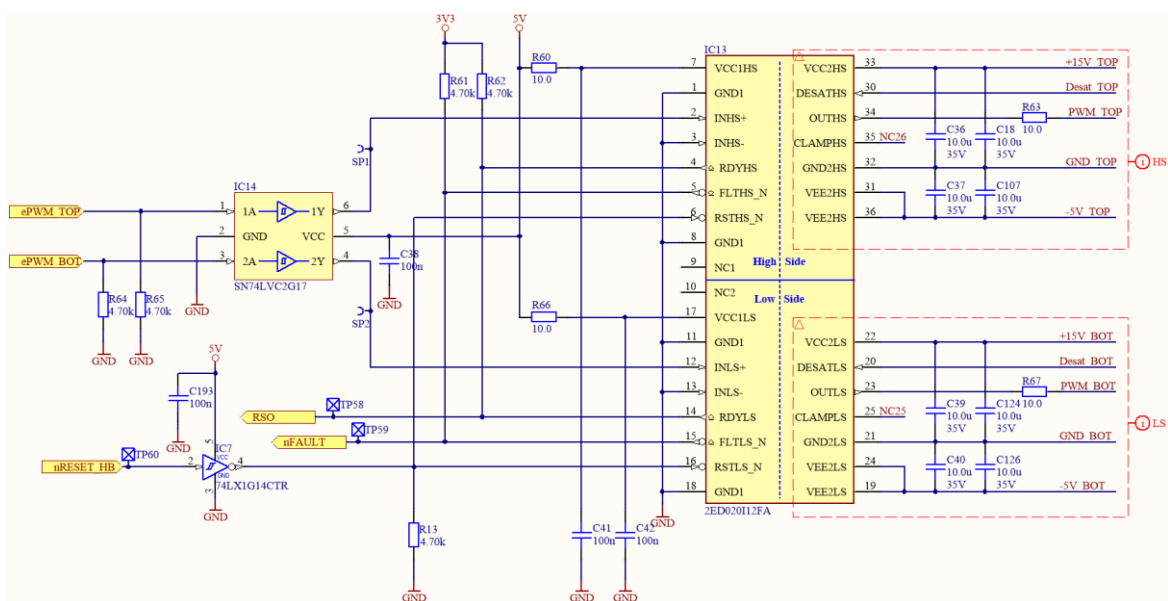




Obrázek 14: Schéma zapojení DC-DC měniče MGJ3T12150505MC

Tabulka 5: Parametry DC/DC měniče Murata MGJ3T12150505MC

Rozsah vstupního napětí	Typické použití	Výstup 1			Výstup 2		
		Výstupní napětí	Výstupní proud	Výstupní výkon	Výstupní napětí	Výstupní proud	Výstupní výkon
9-18V	MOSFET	+15V	150mA	2,25W	-5V	150mA	0,75W



Obrázek 15: Schéma zapojení driveru 2ED020112FA

Tabulka 6: Popis jednotlivých pinů na vstupní straně driveru

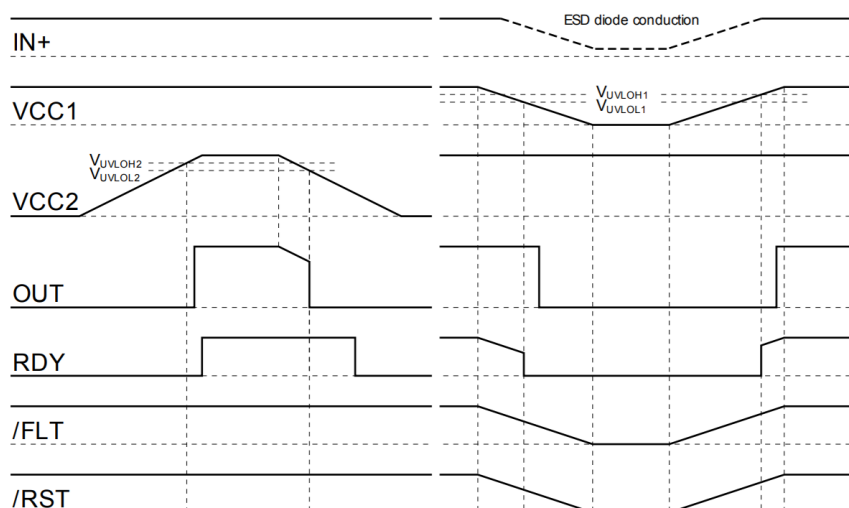
ePWM_TOP	PWM signál z mikrokontroléru pro horní prvek
ePWM_BOT	PWM signál z mikrokontroléru pro dolní prvek
RSO	Dává informaci o správné funkčnosti zařízení ("high" když napájecí napětí je nad min. hodnotou UVLO a vnitřní obvody nehlásí chybu) (UVLOH1 = 4,1V UVLOL1 = 3,8V)
nFAULT	Dává informaci o zareagování desaturační ochrany ("low" když ochrana zareaguje)
nReset_HB	Má dvě funkce:1) zapnutí/vypnutí čipu (/RST = "low" pro vypnutí) 2) Reset při desaturační chybě (/RST = "low" po dobu Trst > 800ns)

Tabulka 7: Popis jednotlivých pinů na výstupní straně driveru

+15V_TOP	Napájení horního prvku
Desat_TOP	Desaturační ochrana od horního prvku
PWM_TOP	PWM signál jdoucí do gatu horního prvku
GND_TOP	Plovoucí zem
-5V_TOP	Záporné napájení horního prvku
+15V_BOT	Napájení dolního prvku
Desat_BOT	Desaturační ochrana od dolního prvku
PWM_BOT	PWM signál jdoucí do gatu dolního prvku
GND_BOT	Zem
-5V_BOT	Záporné napájení dolního prvku

### **Podpět'ová ochrana**

Aby bylo zajištěno správné spínání MOS-FET tranzistorů je driver vybaven podpět'ovou ochranou pro vstupy tak i výstupy. Pokud napájecí napětí vstupní sekce Vcc1-2 klesne pod úroveň UVLOL1-2 dojde k vypnutí. Signály INxx+ jsou ignorovány do doby, než se napájecí napětí zvýší nad UVLO1-2 (viz. obr. 16).



Obrázek 16: Časový diagram podpět'ové ochrany budiče [13]

### Ready status output (RSO)

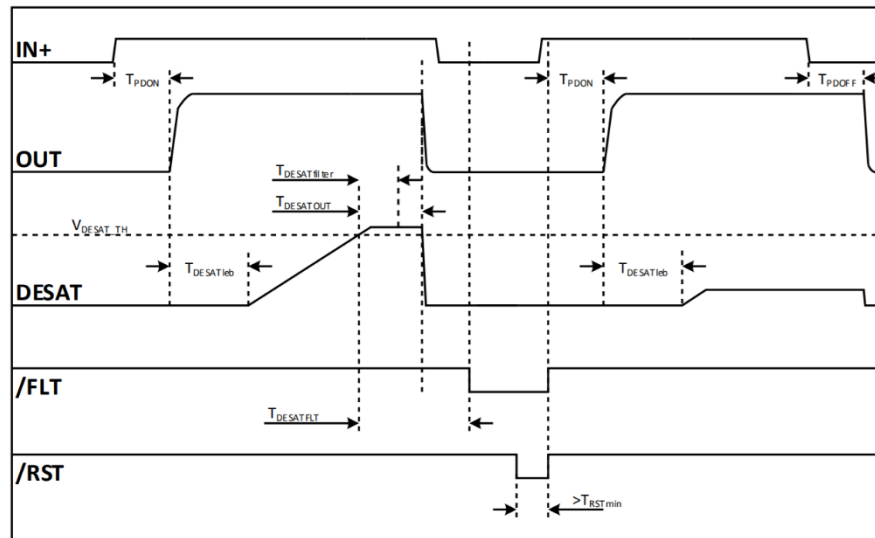
Pin READY zobrazuje stav tří funkcí vnitřní ochrany:

- UVLO vstupního čipu
- UVLO výstupního čipu po krátkém zpoždění
- Interní přenos signálu po krátkém zpoždění

### Desaturační ochrana

Desaturační ochrana zajišťuje ochranu tranzistorů MOS-FET proti zkratu při jejich zapínání. Když napětí DESAT stoupne nad  $V_{DESAT\_TH}$  je výstup OUT nastaven na "Low" a je aktivován FAULT výstup (viz. obr. 17).

Vychází z předpokladu, že v sepnutém stavu je při průchodu jmenovitého proudu  $I_d$  na tranzistoru úbytek napětí  $U_{ds}$  zhruba do 2,5V. Avšak v případě, že tranzistorem začne procházet zkratový proud řádově vyšší než jmenovitý, napětí  $U_{ds}$  vzroste. Toto napětí porovnává komparátor uvnitř budiče s referenčním napětím, a pokud překročí hodnotu 9V, dochází k odstavení budiče a signalizaci chyby (FAULT). Takto je to pro IGBT tranzistory. MOS-FET tranzistory mají úbytek napětí  $U_{ds}$  velmi malý a proto se do zapojení přidávají zenerovy diody, které navyšují úbytek napětí měřený budičem výkonových prvků. Ten je potom schopen správně vyhodnotit zkrat.



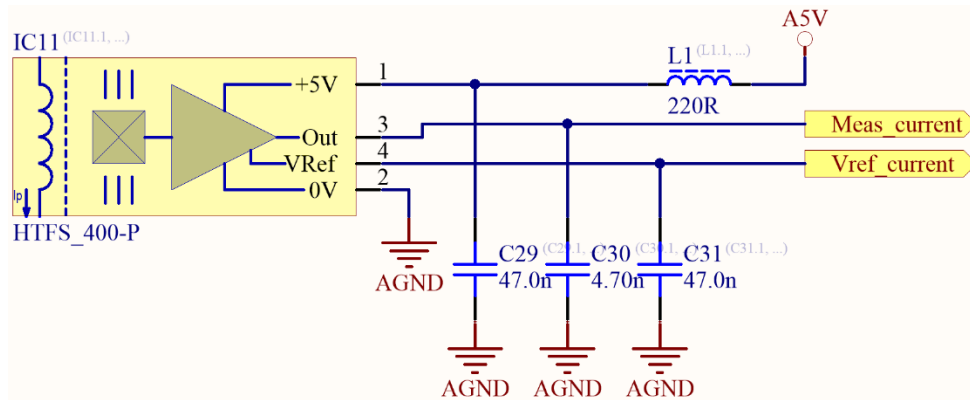
Obrázek 17: Časový diagram funkce desaturační ochrany budiče [13]

### 3.6 Čidla

Nedílnou součástí každého lepšího řídicího systému jsou čidla. Tato čidla podle aplikace a řídicího systému dávají informaci o skutečných hodnotách řízených veličin a obvykle také slouží jako určitý druh ochrany. V této podkapitole jsou popsána čidla, která obsahuje navržená řídicí jednotka elektrické motokáry. Mezi ně patří proudová sonda, NTC čidla teploty a napěťový senzor, hlídající celkové napětí baterií.

#### 3.6.1 Měření proudu

Proudy tekoucí do motoru jsou měřeny proudovými čidly HTFS-400P [27]. Tyto čidla pracují na principu Hallova jevu. A je možné jimi měřit obě polaritu proudu. K zajištění správné funkčnosti čidla jsou na jeho vývody připojeny kondenzátory dle doporučených hodnot daných výrobcem viz. obr. 18. Čidla generují referenční napětí, toto napětí je upraveno a použito v diferenciálním zesilovači popsaném dále v této kapitole. Výstupem z čidla je analogový signál v rozsahu 0 až 5V, který je upraven diferenciálním zesilovačem pro měřicí rozsah A/D převodníku v MCU.



Obrázek 18: Proudová sonda

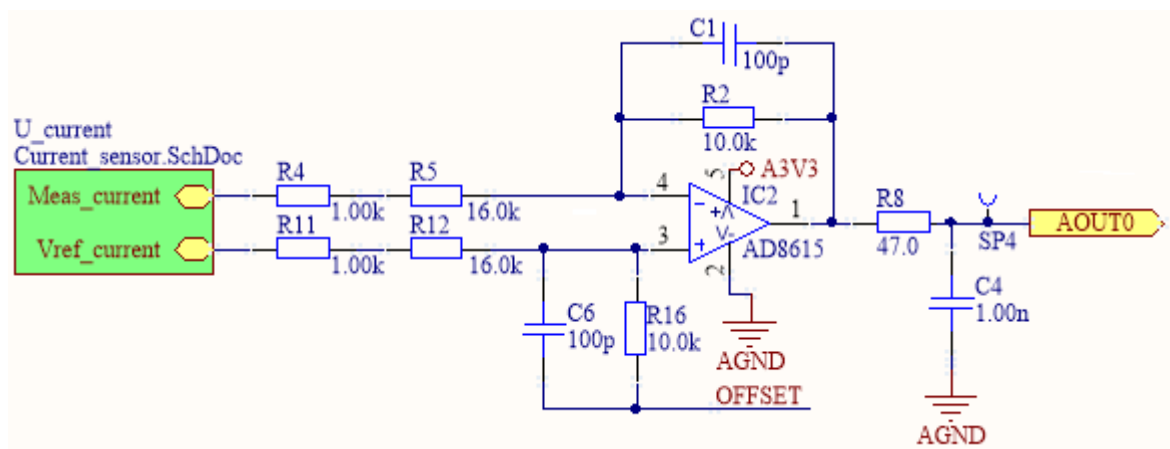
Na obr. 19 je jeden z diferenciálních zesilovačů v zapojení určeném pro čidla měřící proudy. Účelem navrženého zapojení je eliminovat: 1) souhlasné rušení, 2) kompenzovat teplotní drift reference čidla a 3) přizpůsobit úrovně z čidla pro měření v MCU.

Jako zdroj referenčního napětí pro offset a AD převodník je použit ADR3430 [28], který má přesný 3V výstup. Odporovým děličem je zmenšen na 1,5V. Toto napětí jde do napěťového sledovače a z něj je potom offset rozveden do všech obvodů, které jej potřebují.

Poměrem odporů R4, R5, R2 a R11, R12, R16 se nastavuje zesílení vstupních signálů (3.2). Odpory doplněné kondenzátory vytváří dohromady dolní propust nastavenou na odfiltrování vysokofrekvenčního rušení. Stejný efekt mají i R8 a C4, které vyhlazují výstupní napětí a navíc C4 slouží jako kapacitní banka pro kompenzaci kapacity S/H obvodu v MCU.

$$A = \frac{R2}{R4+R5} = \frac{R16}{R11+R12} \quad (3.2)$$

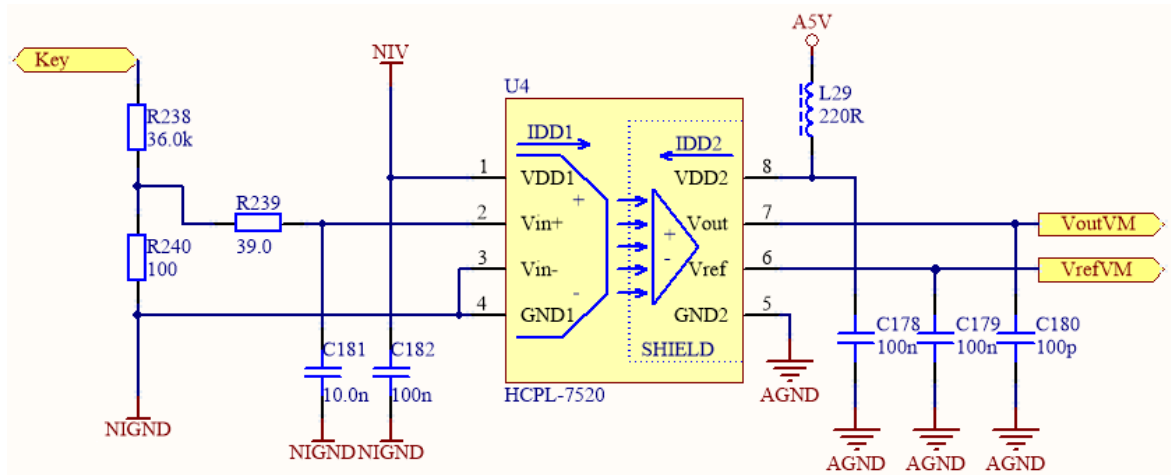
$$U_{OUT} = (U_{Vref} - U_{meas\_current}) \cdot \frac{R2}{R4+R5} \quad (3.3)$$



Obrázek 19: Diferenciální zesilovač

### 3.6.2 Napěťový senzor

Napětí v meziobvodu je měřeno čidlem HCPL-7520 [29]. Toto čidlo je primárně určeno k měření proudu, ale lze ho také zapojit pro měření napětí viz. obr. 20. Čidlo má měřicí vstupy galvanicky oddělené od baterie to byl také hlavní důvod použití tohoto obvodu. Maximální měřitelné napětí na vstupu  $V_{IN+}$  je pouze 200mV pro zajištění tohoto rozsahu je použit odporový dělič z odporů R238 a R240. Dolní propust z R239 a C181 odfiltruje vysokofrekvenční rušení od spínání prvků střídače.

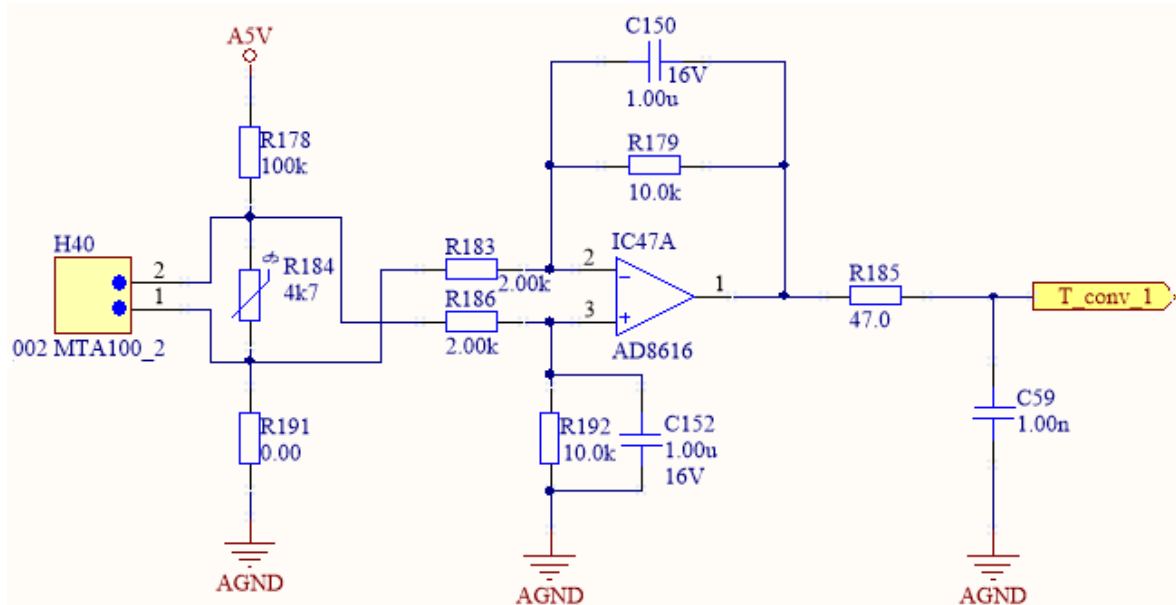


Obrázek 20: Schéma zapojení napěťového senzoru HCPL-7520

### 3.6.3 Čidla teploty

Informace o teplotě chladiče, na kterém je přimontovaný střídač zajišťují dvě NTC čidla. Ty jsou připojena na vstup neinvertujícího zesilovače. Při zvýšení teploty chladiče dojde k oteplení NTC článku, u kterého se sníží velikost odporu. NTC článek je připojen k odporu R178 se kterým tvoří odporový dělič. Při změně odporu dojde ke změně napětí vstupujícího do operačního zesilovače. Ten slouží k napěťovému přizpůsobení výstupního signálu pro potřeby interního A/D převodníku MCU. Toto napěťové přizpůsobení je dáno velikostí odporů R183, R179 a R186, R192. Celé schéma zapojení je na obr. 21.





Obrázek 21: Schéma zapojení měření teploty z NTC čidla

Měření teploty motoru je prováděno PWM teplotními čidly SMT172 [21]. Tato čidla mají na svém výstupu PWM signál, jehož střída po přepočtení (3.5) odpovídá teplotě. PWM signály z teplotních čidel jsou zapojeny na GPIO piny, na kterých je zvolen režim eCAP jednotky. Princip měření je vysvětlen v kapitole 4.1.6.

$$t_{DC} = \frac{t_{on}}{t_p} \quad (3.4)$$

$$T = \frac{t_{DC}^{-0,32}}{0,0047} = 212,77 \cdot t_{DC} - 68,085 \quad (3.5)$$

kde:

T .... Teplota [°C]

$t_{DC}$  ... střída PWM signálu

$t_{on}$  ... doba, po kterou je PWM signál v log "1" [s]

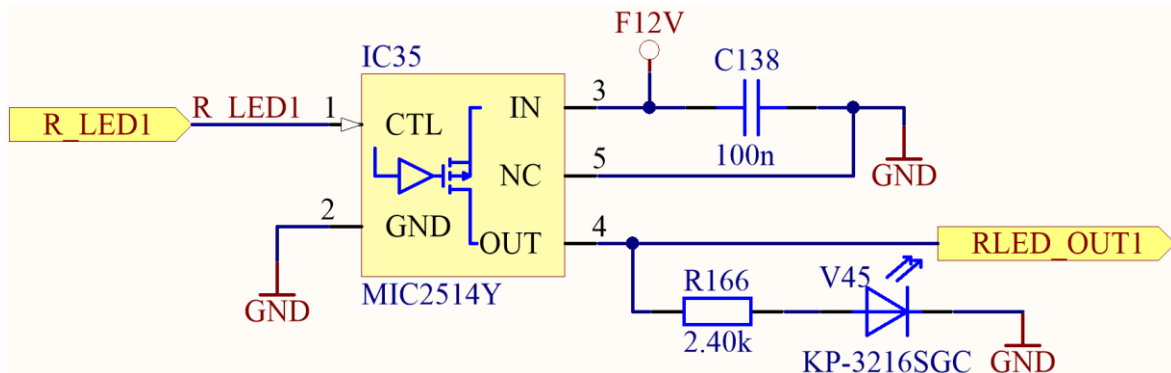
$t_p$  ... doba periody [s]

### 3.7 Výkonové výstupy

Na motokáře jsou namontovaná světla, která jsou ovládána z řídicí desky. Pro jejich ovládání jsou použity high-side výkonové spínače MIC2514 (obr. 22), hlavní parametry jsou uvedeny v tab. 8. Tyto spínače obsahují proudovou ochranu, teplotní pojistku, pomalé zapnutí zátěže a vstup je kompatibilní s LVTTL logikou.

Tabulka 8: Hlavní parametry high-side spínače MIC2514 [15]

Odpor v sepnutém stavu		Vstupní napětí	Teplotní rozsah	Maximální proud
5V	12V			
1,5Ω	0,95Ω	3 až 13,5V	-40 až +80°C	1,9A

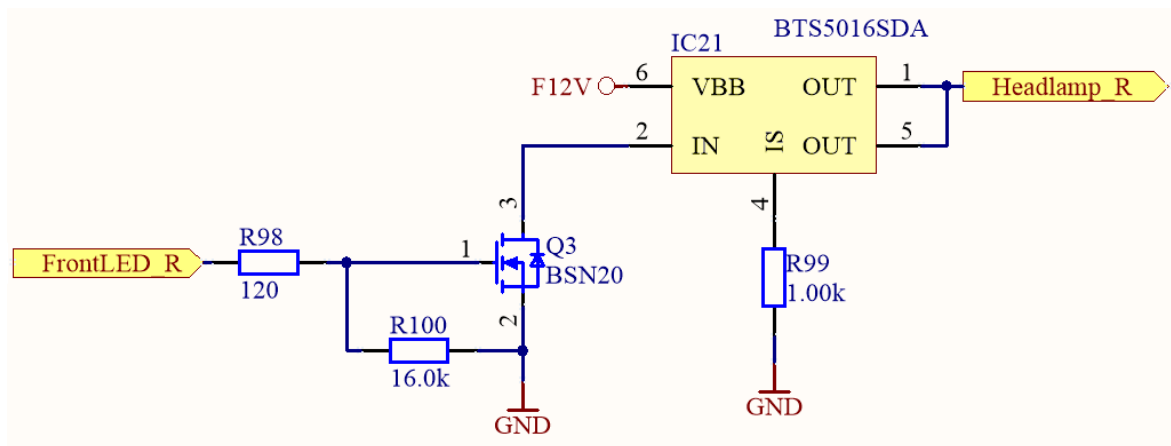


Obrázek 22: Schéma zapojení high-side spínače MIC2514Y

Pro ovládání předních světel se použil chytrý high-side výkonový spínač Infineon BTS5016SDA (obr. 23). Tento spínač obsahuje mnoho ochranných obvodů mezi ně patří ochrana před výkonovým přetížením, teplotní ochrana, přepětíová ochrana, zkratová ochrana a ochrana proti elektrostatickému výboji. Hlavní parametry spínače jsou sepsány v tab. 9.

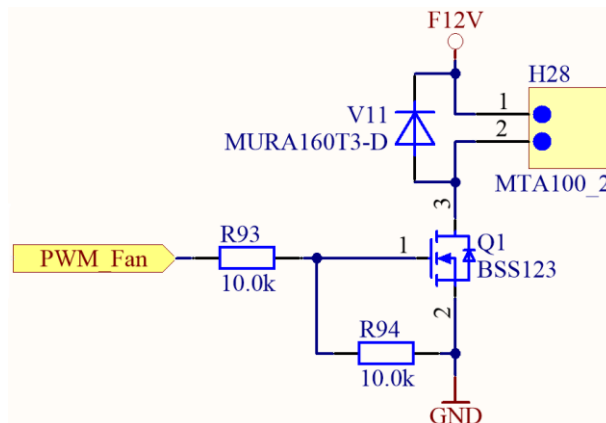
Tabulka 9: Hlavní parametry high-side spínače BTS5016SDA [16]

Odpor v sepnutém stavu	Vstupní napětí	Teplotní rozsah	Maximální proud
32mΩ	5,5 až 20V	-40 až 150°C	5,5A



Obrázek 23: Schéma zapojení high-side spínače

U motokáry se uvažuje možnost připojení dodatečného ventilátoru v případě přehřívání některé z elektrických částí (obr. 24). Z toho důvodu je na řídicí desce připraven konektor k jeho připojení. Aby bylo možné regulovat rychlost ventilátoru je tranzistor Q1 připojen na PWM výstup MCU. Dioda V11 slouží jako ochrana proti případnému přepětí při vypínání indukativní zátěže.



Obrázek 24: Schéma zapojení pro řízení ventilátoru

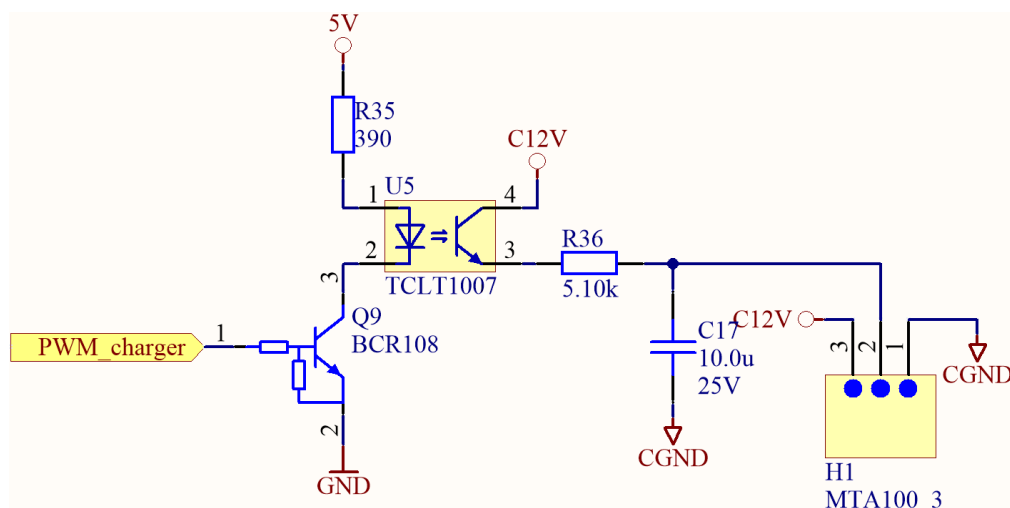
### 3.8 Ovládání nabíječky

K nabíjení baterii se používá nabíječka GWL Power [17]. Tato nabíječka potřebuje na svém povolovacím vstupu napětí pro aktivování nabíjení. Napětí může být v rozmezí od 2V do 5V. Tímto napětím lze také řídit procentuálně velikost nabíjecího proudu 0-100% viz. tab. 10.

Tabulka 10: Jednotlivé stavy nabíječky GWL Power

Stav nabíječky	Napětí na enable pinu [V]	Nabíjecí proud [%]
Vypnuto	< 1,5	-
Nabíjení povoleno	2	0
Nabíjení	3	33
	4	66
	5	100

K ovládání napětí pro nabíječku se využívá PWM, která je připojena na tranzistor. Tento tranzistor se chová jako spínač a ovládá optočlen, který spíná napětí přivedené z nabíječky. Galvanické oddělení je provedeno optočlenem. Nabíječka požaduje analogovou hodnotu na svém vstupu, proto je na výstupu optočlenu připojena dolní propust (R36 a C17). Tato dolní propust dostatečně vyhladí výstupní napětí přiváděné do nabíječky. Celé zapojení lze vidět na obr. 25.



Obrázek 25: Schéma zapojení pro řízení napětí určeného nabíječe

### 3.9 Komunikační sběrnice

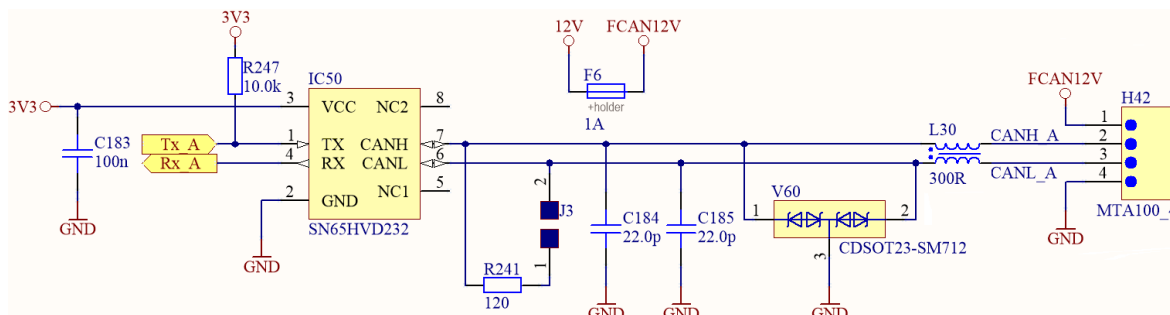
Komunikační sběrnice slouží k přenosu řídicích a datových signálů. Jsou obecně dva hlavní typy sběrnic paralelní, kde se přenáší více bitů najednou nebo sériové kde se postupně přenáší jednotlivé bity. Na motokáře jsou použity dva typy komunikačních sběrnic. CAN komunikace zajišťuje propojení mezi řídicí deskou a zobrazovací jednotkou. A druhý typ komunikace používaný na motokáře je RS-485 pro komunikace s bateriemi, resp. jejich balancéry. Oba tyto typy komunikací jsou popsány v této kapitole 3.9.

#### 3.9.1 CAN

CAN je sériový komunikační protokol umožňující distribuované řízení systémů v reálném čase s vysokou mírou zabezpečení proti chybám. Jedná se o protokol typu multi-master, kde každý uzel sběrnice může být master a řídit tak chování jiných uzlů. Po sběrnici probíhá komunikace mezi dvěma uzly pomocí zpráv (datová zpráva a žádost o data), a management sítě (signalizace chyb, pozastavení komunikace) je zajištěn pomocí dvou speciálních zpráv (chybové zprávy a zprávy o přetížení). Každá zpráva je uvozena identifikátorem, který udává význam přenášené zprávy a její prioritu. Protokol CAN zajišťuje, aby zpráva s vyšší prioritou byla v případě kolize dvou zpráv doručena přednostně a dále je možné na základě identifikátoru zajistit, aby uzel přijímal pouze ty zprávy, které se ho týkají.

Tlumivka L30 je připojena mezi sběrnice vodiče CAN\_H a CAN\_L. Tímto krokem zajistíme vysokou impedanci mezi vodiči pro společné signály a nízkou impedanci mezi vodiči pro diferenciální signály. Tlumivka přispívá ke snížení vyzařování a k posílení

odolnosti. Jeden ze způsobů zapojení tlumivky mezi sběrnice CAN\_H a CAN\_L je na obr. 26. Pro posílení odolnosti jsou k tlumivce přidány ještě kondenzátory C184 a C185, které zapojíme mezi budič CAN a tlumivku. Rezistor R241 je možné připojit přes jumper J3, v případě že je potřeba impedanční přizpůsobení. ESD ochrana V60 je zapojena z důvodu zvýšení ochrany budiče před ESD.



Obrázek 26: Schéma zapojení CAN komunikační sběrnice

### SN65HVD232

Pro motokáru je použit čip od firmy Texas Instruments s označením SN65HVD232 [18]. Je to vysokorychlostní budič, který dosahuje přenosové rychlosti až 1 Mbit/s. Budič je integrovaný do osmi pinového pouzdra SOIC8.

Základní vlastnosti budiče jsou:

- Plná kompatibilita s ISO normou ISO 11898-2 High Speed CAN Physical Layer standard
- Velmi nízké elektromagnetické vyzařování
- Řídicí jednotka bez napětí neruší sběrnici
- Elektrostatická ochrana: CANH, CANL, GND odolné  $\pm 16\text{kV}$   
Všechny piny odolné  $\pm 4\text{kV}$
- Vstupní úrovně jsou kompatibilní s 3,3 V i 5 V zařízeními
- Teplotní ochrana
- Možnost připojení 120 i více řídicích jednotek

### 3.9.2 RS-485

Rozhraní standardu RS-485 je předurčeno k přenosu dat mezi více jednotkami v architektuře se síťovou topologií, ale lze jej však pochopitelně využít i k přenosům typu "bod-bod". vždy dvojicí v protifázi generovaných signálů zpracovávaných přijímači s diferenciálními vstupy. Dvojice signálů je označována obvykle jako TXD/RXD+ (popř. B) a TXD/RXD- (popř. A). Rozhraní RS-485 umožňuje přenos dat až do vzdálenosti 1200m a na kratší vzdálenost podporuje přenosovou rychlost až 10MBd. Na jeden segment sítě může být připojeno standardně až 32 zařízení.

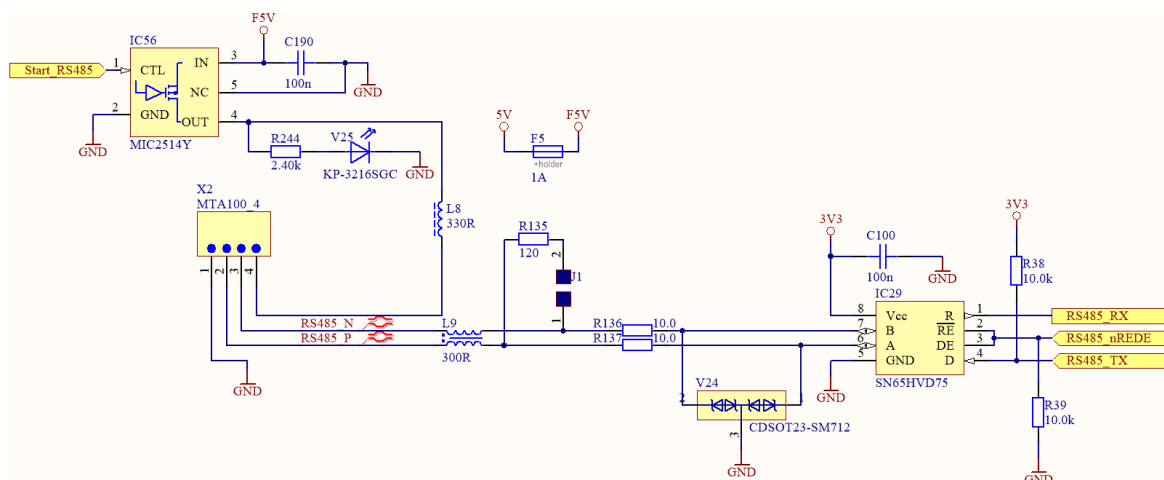
K potlačení nežádoucích odrazů na komunikační lince, které mohou způsobovat chyby v přenosu, slouží zakončovací impedance, kterou lze připojit přes jumper J1 (viz. obr. 27). Typická hodnota zakončovací impedance pro RS-485 je  $120\Omega$  (odpovídá jmenovité impedanci vedení). Budič sice má interní ESD ochranu, ale z důvodu vyšší ochrany je navíc připojena externí ESD ochrana V24. Sběrnice je připojena k balancerům na bateriích. V případě, že by z nějakého důvodu došlo chybě na balancerech je možné celou sběrnici resetovat vypnutím a opětovným zapnutím napájením realizované stejným obvodem, který je popisován v kapitole 3.7. Common mode tlumivka L9 je používána k potlačení souhlasného napětí, které může na sběrnici vzniknout.

## **SN65HVD75**

Pro motokáru je použit čip od firmy Texas Instruments s označením SN65HVD75 [19]. Budič je určený pro komunikaci typu RS-485. Je vhodný pro použití v průmyslové automatizaci, telekomunikační infrastruktuře i jako komunikace s čidly polohy. V motokáře je použit pro komunikaci s balancery na bateriích.

Základní vlastnosti budiče jsou:

- Velmi nízké elektromagnetické vyzařování
- Elektrostatická ochrana:
  - $>\pm 15$  kV HBM Protection
  - $->\pm 12$  kV IEC 61000-4-2 Contact Discharge
  - $->\pm 4$  kV IEC 61000-4-4 Fast Transient Burst
- Napájení 3,3V
- Vstupní úrovně jsou kompatibilní s 3,3 V i 5 V zařízeními
- Pracovní teplotní rozsah:  $-40^{\circ}\text{C}$  až  $125^{\circ}\text{C}$



Obrázek 27: Schéma zapojení sběrnice RS-485

### 3.10 Určování polohy rotoru

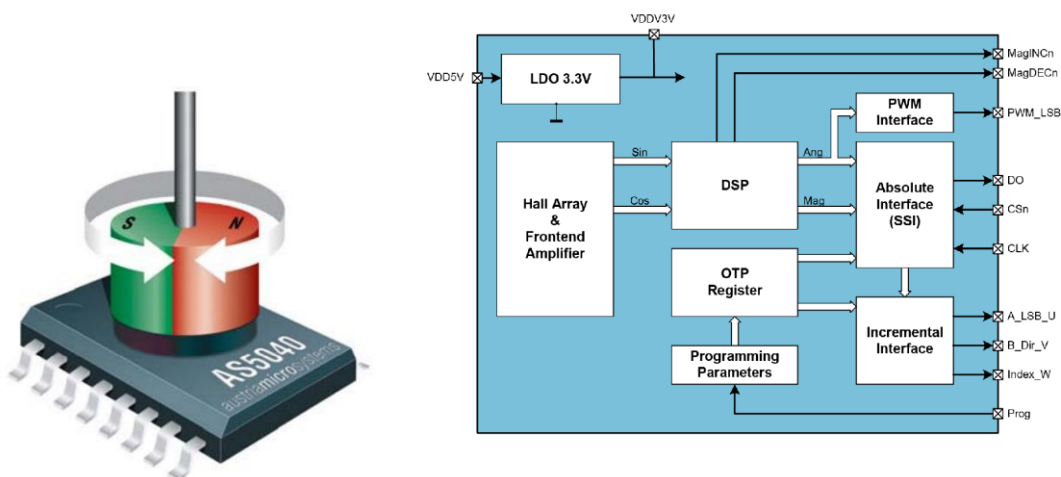
Vektorové řízení potřebuje pro správné ovládání PMSM znát přesnou polohu rotoru. Tato poloha rotoru je použita v Parkově transformaci pro převod do rotujících souřadnic  $d$ ,  $q$ . Za tímto účelem bylo navrženo čidlo, kde výstupem bude absolutní hodnota natočení rotoru a pro další výpočty také IRC. Z těchto důvodů bylo zvoleno čidlo AS5040 [20].

#### 3.10.1 AS5040

Jedná se o 10-bitový programovatelný, bezkontaktní, magnetické čidlo otáček. Toto čidlo obsahuje několik různých režimů. Jedním z režimů je inkrementální výstup, který se využívá pro měření rychlosti rotoru. Druhý používaný režim je PWM výstup dávající informaci o úhlu natočení rotoru. Tato veličina je pro vektorové řízení velmi důležitá, protože je využívána při převodu v Parkově transformaci. Pokud není tato hodnota dostatečně přesná má to zásadní vliv na řízení pohonu a může vést až k vypnutí PMSM motoru ze synchronismu.

Čidlo má v sobě umístěno 6 Hallových senzorů do kruhu, ze kterých je vyhodnocován úhel natočení hřídele rotoru. Pro měření bylo potřeba na hřídel motoru přimontovat diametrálně magnetovaný magnet. Ten vytváří magnetické pole, které snímají Hallovy sondy a převádí na popisované režimy.

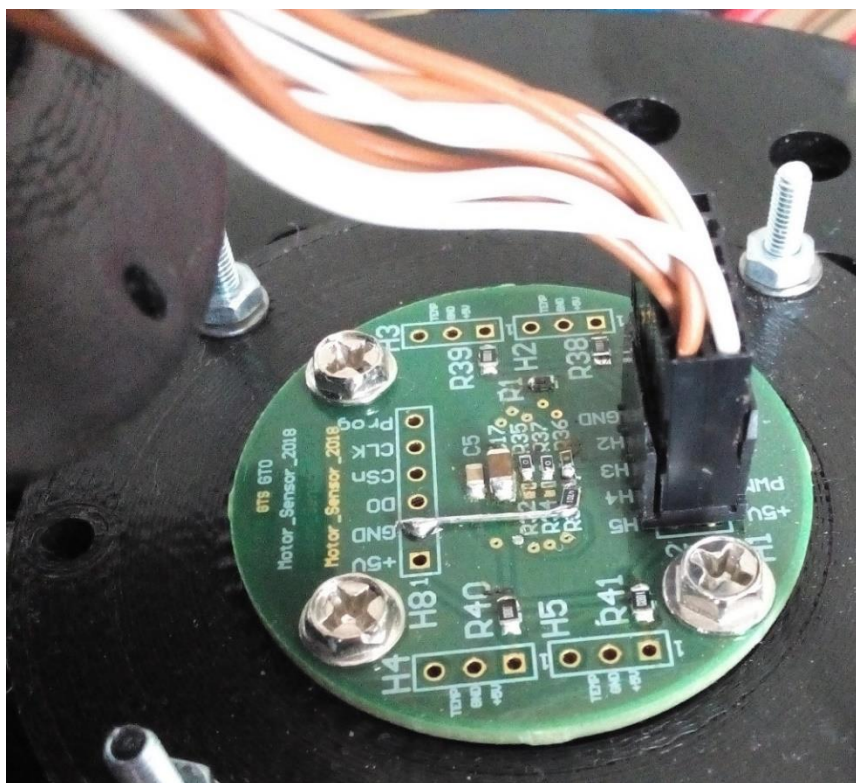
Čidlo dokáže měřit úhel natočení rotoru s rozlišením  $0,35^\circ$  a rychlost až do 30000rpm. Čidlo otáček a jeho blokové schéma je zobrazeno na obr. 28.



Obrázek 28: Čidlo polohy a jeho vnitřní blokové schéma [20]

### 3.10.2 DPS pro čidlo

Na přesné a voděodolné upevnění čidla byla navržena DPS, která tyto vlastnosti splňuje. Na DPS je osazeno čidlo AS5040 s pomocnými obvody a teplotními čidly. Tato čidla jsou vyvedena na různé části motoru (šasi, vstupní vzduch a vyfukovaný vzduch). Napájení pro všechny tyto obvody je přivedeno z hlavní desky, napájení jsou popsána v kapitole 3.3. Pro splnění požadavku na vodotěsnost byl v internetovém programu OnShape navržen kryt, který byl následně vytištěn na 3D tiskárně a přimontován k motoru viz. obr. 29.



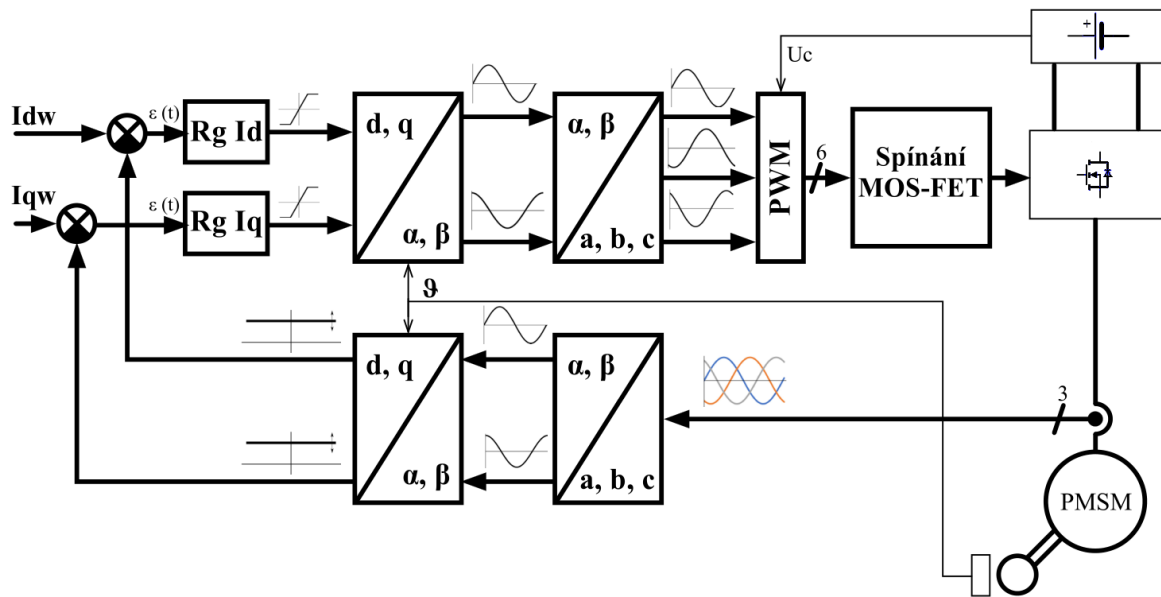
Obrázek 29: DPS pro čidlo polohy AS5040

## 4 Implementace řídicího algoritmu do TMS320F28335

### 4.1 Regulační schéma vektorového řízení

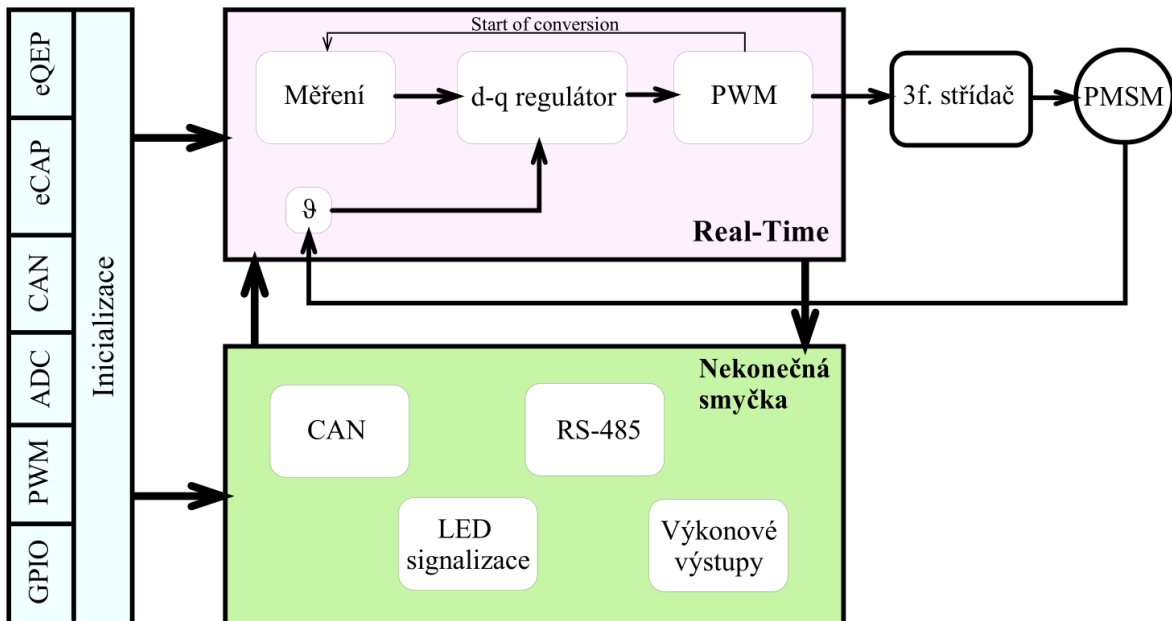
Vektorové řízení PMSM motoru je složeno ze tří větších celků: regulátorů, transformací a uzpůsobení modulačních napětí pro PWM. Pro řízení je použit nejjednodušší typ vektorového řízení, které nemá použitý dopředný model motoru. Obr. 30 zobrazuje jednak blokově zapojení celého řízení ale také průběhy veličin v různých fázích řízení.





Obrázek 30: Regulační schéma implementované v elektrické motokáře

Na obr. 31 lze vidět softwarovou topologii použitou v algoritmu řídicí jednotky. Při zapnutí napájení se provede inicializace všech periférií. Na začátku se nastaví veškerá GPIO na výstupy. Následuje inicializace PWM, ADC, eCAP a dalších používaných periférií společně se změnou GPIO na požadovaný režim pro jednotlivé periferie. Po dokončení inicializace se program dostane do nekonečné smyčky (zelený blok), ve které se provádí operace, které nejsou kritické z pohledu periody nebo latence časování. Do tohoto bloku patří ovládání výkonových výstupů, LED signalizace a komunikace. Regulační smyčka musí běžet v real-time smyčce (růžový blok) to zajišťuje přerušení od PWM signálem ePWMSOCA, kterým se spouští měřicí cyklus AD převodníku. Po naměření všech veličin se vyvolá přerušení, ve kterém běží regulační smyčka. Jednotlivé bloky jsou popsány v kapitolách 4.1.x.



Obrázek 31: Topologie softwaru

#### 4.1.1 Transformace zapsané v jazyce C

Blok Transformation (viz. obr. 32) převádí skutečně změřené proudy do statického souřadnicového systému a potom do rotujícího souřadnicového systému  $d,q$ .

```

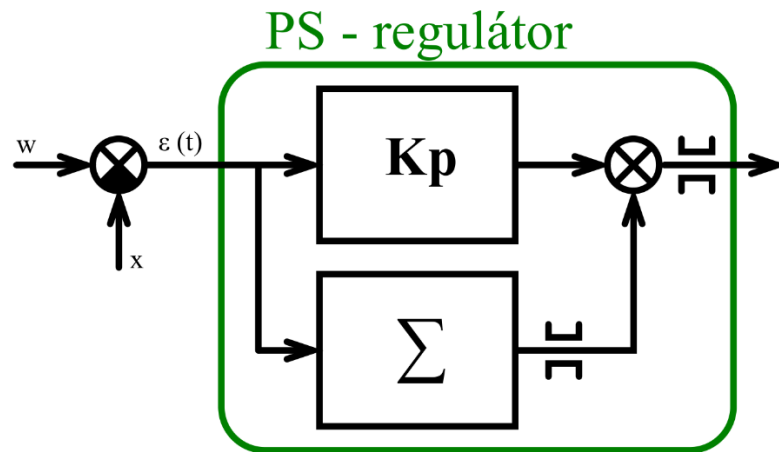
1682 void Transformation(void)
1683 {
1684     //Clark transformation
1685     conv_clark_s.I_alfa = (0.666*meas_current_s.I_u)-(0.333*(meas_current_s.I_v+meas_current_s.I_w));
1686     conv_clark_s.I_beta = 0.577*(meas_current_s.I_v-meas_current_s.I_w);
1687     //Park transformation
1688     conv_park_s.I_d = conv_clark_s.I_alfa*cosf(Position.rad)+conv_clark_s.I_beta*sinf(Position.rad);
1689     conv_park_s.I_q = conv_clark_s.I_beta*cosf(Position.rad)-conv_clark_s.I_alfa*sinf(Position.rad);
1690 }

```

Obrázek 32: Převedení 3-fázových proudů na proudy v  $d,q$ 

#### 4.1.2 PS regulátor

PS regulátor je složen z proporcionální a sumační složky, zapojení je na obr. 33. Regulátor je zařazen před řízenou soustavu. Vstupní veličinou je regulační odchylka  $\varepsilon(t)$ , která je výsledkem odečtení skutečné od požadované hodnoty. Proporcionální složka je vlastně zesilovací člen, který zesiluje regulační odchylku o konstantu  $K_p$ . Sumační člen je integrační složka využívaná v diskrétních systémech. Jejím úkolem je odstranit trvalou regulační odchylku, kterou proporční složka není schopna kompenzovat zcela na nulu. Návrh sumační složky je popsán v části s kódem. Výstupem regulátoru je akční veličina, používaná k akčnímu zásahu do systému v tomto případě napětí  $U_d$  a  $U_q$ .



Obrázek 33: PS regulátor

$$u(t) = K_p \cdot \varepsilon(t) + S(k) \quad (4.1)$$

$$S(k+1) = S(k) + \frac{K_p}{T_r} \cdot \Delta t \cdot \varepsilon(t) \quad (4.2)$$

Obr. 34 zobrazuje PS regulátor implementovaný v programu. Řádky 1764 a 1765 provádí rozdíl mezi skutečným a požadovaným proudem kde výsledkem je regulační odchylka. Ta je použita v řádcích 1767 a 1768, které odpovídají PS regulátorům. Ve zbytku kódu je implementován omezovač sumační složky pro složky d a q.

```

1759 void Regulator_PS(void)
1760 {
1761     GpioDataRegs.GPBSET.bit.GPIO36 = 1;
1762     Ramp();
1763
1764     conv_park_s.epsilon_d = conv_park_s.I_dw - (conv_park_s.I_d);
1765     conv_park_s.epsilon_q = conv_park_s.I_qwr - (conv_park_s.I_q);
1766
1767     reg_dq_s.U_d = (Kp*conv_park_s.epsilon_d) + conv_park_s.sum_d;
1768     reg_dq_s.U_q = (Kp*conv_park_s.epsilon_q) + conv_park_s.sum_q;
1769
1770     if (reg_dq_s.U_d > reg_dq_s.U_dmax) reg_dq_s.U_d = reg_dq_s.U_dmax;
1771     else if (reg_dq_s.U_d < reg_dq_s.U_dmin) reg_dq_s.U_d = reg_dq_s.U_dmin;
1772     else
1773     {
1774         conv_park_s.sum_d = conv_park_s.sum_d + (Tsample*conv_park_s.epsilon_d*(Kp/Tr));
1775     }
1776
1777     if (reg_dq_s.U_q > reg_dq_s.U_qmax) reg_dq_s.U_q = reg_dq_s.U_qmax;
1778     else if (reg_dq_s.U_q < reg_dq_s.U_qmin) reg_dq_s.U_q = reg_dq_s.U_qmin;
1779     else
1780     {
1781         conv_park_s.sum_q = conv_park_s.sum_q + (Tsample*conv_park_s.epsilon_q*(Kp/Tr));
1782     }
1783     GpioDataRegs.GPBCLEAR.bit.GPIO36 = 1;
1784 }
-----

```

Obrázek 34: PS regulátor zapsaný v jazyce C

#### 4.1.3 Zpětná transformace v jazyce C

Modulační napětí je na výstupu z regulátoru ve složkách d a q. Ty je nutno převést

na 3-fázový modulační napětí, se kterým se pracuje v kapitole 4.1.4. To se provádí v bloku `Back_transformation()` viz. obr. 35, ve kterém se používají zpětné transformace. Výslednými veličinami pro další modifikace jsou `back_conv3p_s.U_u`, `U_v` a `U_w`.

```
1700 void Back_transformation(void)
1701 {
1702     //Park back transformation
1703     back_conv_clark_s.U_alfa = reg_dq_s.U_d*cosf(Position.rad)-reg_dq_s.U_q*sinf(Position.rad);
1704     back_conv_clark_s.U_beta = reg_dq_s.U_q*cosf(Position.rad)+reg_dq_s.U_d*sinf(Position.rad);
1705     //Clarc back transformation
1706     back_conv3p_s.U_u = back_conv_clark_s.U_alfa;
1707     back_conv3p_s.U_v = 0.5*(-back_conv_clark_s.U_alfa)+(1.7321*back_conv_clark_s.U_beta));
1708     back_conv3p_s.U_w = 0.5*(-back_conv_clark_s.U_alfa)-(1.7321*back_conv_clark_s.U_beta));
1709
1710 }
```

Obrázek 35: Zpětná transformace v jazyce C

#### 4.1.4 Převod veličin pro PWM jednotku

V tomto bloku se provádí přepočítání 3-fázových modulačních napětí na poměrná sepnutí z (řádky 1791, 1792, 1793) viz. obr. 36. Hodnota zadávaná pro porovnání s pilou PWM je počítána z poměrného sepnutí a poloviny TBPRD (viz. obr. 37) a k tomu je přičtena polovina TBPRD (HalfTBPRD). Tato přičtená polovina tvoří offset, kterým je docíleno nulového napětí, resp.  $U_{dc}/2$  pro požadavek na nulové napětí na výstupu. Řádky 1808, 1809 a 1810 zapisují vypočtené hodnoty (`phase_U`, `phase_V`, `phase_W`) do CMPA registrů pro jednotlivé PWM. Do CMPB registrů nemusíme zapisovat, protože se používají hardwarové mrtvé časy generované přímo ePWM, nastavované softwarově, které zajišťují správné přepínání mezi horním a spodním výkonovým prvem.

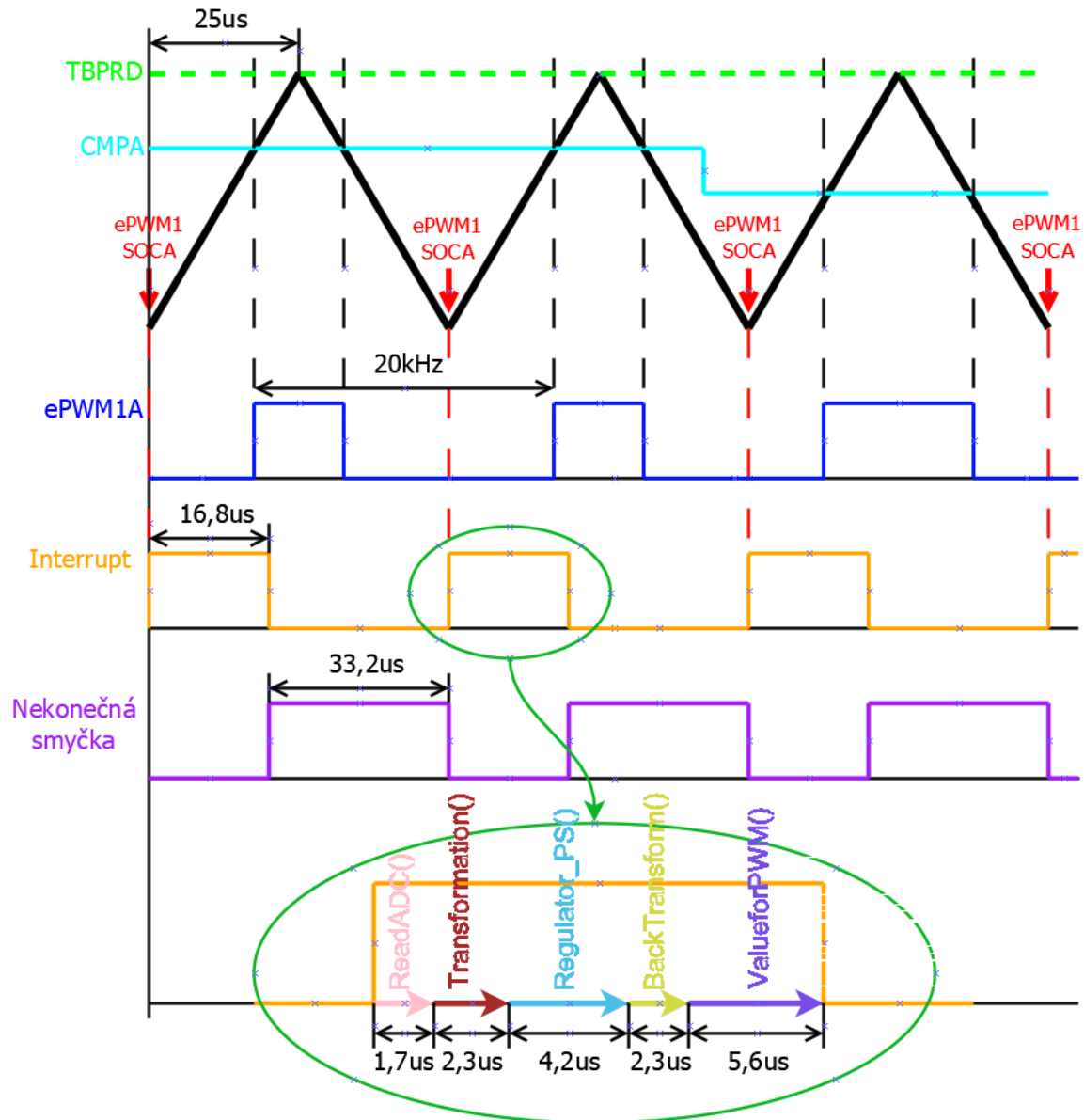
```
1786 void Value_for_PWM(void)
1787 {
1788     GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO37 = 1;
1789     Half_Ucn = Uce*0.5;
1790
1791     z_u = back_conv3p_s.U_u/Half_Ucn;
1792     z_v = back_conv3p_s.U_v/Half_Ucn;
1793     z_w = back_conv3p_s.U_w/Half_Ucn;
1794
1795     if(back_conv3p_s.U_u >= Half_Ucn) z_u = 1;//DutyA = Half_TBPRD*2;
1796     else if(back_conv3p_s.U_u <= -Half_Ucn) z_u = -1;//DutyA = 0;
1797
1798     if(back_conv3p_s.U_v >= Half_Ucn) z_v = 1;//DutyB = Half_TBPRD*2;
1799     else if(back_conv3p_s.U_v <= -Half_Ucn) z_v = -1;//DutyB = 0;
1800
1801     if(back_conv3p_s.U_w >= Half_Ucn) z_w = 1;//DutyC = Half_TBPRD*2;
1802     else if(back_conv3p_s.U_w <= -Half_Ucn) z_w = -1;//DutyC = 0;
1803
1804     phase_U = HalfTBPRD + (HalfTBPRD * z_u);
1805     phase_V = HalfTBPRD + (HalfTBPRD * z_v);
1806     phase_W = HalfTBPRD + (HalfTBPRD * z_w);
1807
1808     EPwm1Regs.CMPA.half.CMPA = phase_U; // adjust duty for output EPWM1A
1809     EPwm2Regs.CMPA.half.CMPA = phase_V; // adjust duty for output EPWM1A
1810     EPwm3Regs.CMPA.half.CMPA = phase_W; // adjust duty for output EPWM1A
1811     GpioDataRegs.GPBCLEAR.bit.GPIO37 = 1;
1812 }
```

Obrázek 36: Zpracování modulačního napětí pro použití v PWM jednotce

#### 4.1.5 Časová návaznost v regulační smyčce

Černá křivka zobrazuje symetrickou pilu PWM periférie. Frekvence pily je nastavena na 20kHz zápisem do registru TBPRD (4.3). Čítač v PWM periférii každou  $T_{CLK}$  přičte jedničku do registru TBCTR při čítání nahoru. Směrem dolů naopak odčítá. Pokud se rovnají hodnoty TBCTR a CMPA je na ePWM1A vnitřním signálem EPWM jednotky změněna logická úroveň podle směru počítání. Vygenerovaný PWM signál jde dále do jednotky generování mrtvých časů. Vždy když je TBCTR v nule je aktivován signál ePWM1SOCA, který spustí měření AD převodníku. Po změření je vyvoláno přerušení, ve kterém probíhá celé vektorové řízení. I tak ale pořád zbývá dostatek času i na vykonávání příkazů v nekonečné smyčce, přesněji okolo 60% času.

$$TBPRD = \frac{T_{PWM}}{2 \cdot T_{CLK}} \quad (4.3)$$



Obrázek 37: Časová návaznost jednotlivých bloků v programu

#### 4.1.6 Výpočet polohy

Poloha rotoru se počítá v rutině od eCAP přerušení. Na eCAP5 je připojen výstup z čidla polohy, které vyhodnocuje úhel natočení rotoru. Jednotka je nastavena tak aby reagovala na tři změny vstupního signálu (náběžná, sestupná a náběžná hrana) (viz. obr. 38). Z těchto třech zaznamenaných hran lze již určit periodu, dobu sepnutí, dobu vypnutí a střidu signálu.

$$Period = CAP3 - CAP1 \quad (4.4)$$

$$DutyOnTime = CAP2 - CAP1 \quad (4.5)$$

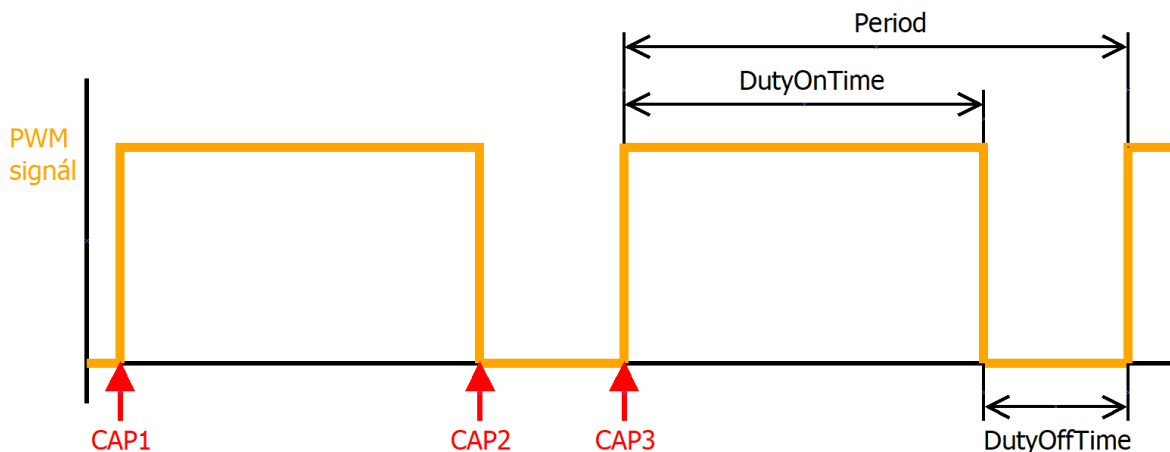
$$DutyOffTime = CAP3 - CAP2 \quad (4.6)$$

$$Positionbit = \frac{DutyOnTime \cdot 1025}{DutyOnTime + DutyOffTime} - 1 \quad (4.7)$$

$$Positionangle = 4 \cdot Positionbit \cdot \frac{359,65}{1024} \quad (4.8)$$

$$Positionrad = -(Positionangle \cdot \frac{\pi}{180} - Offset\_angle) \quad (4.9)$$

Výsledkem Positionbit je hodnota v rozsahu 0 – 1024, kde každý bit odpovídá určitému úhlu natočení rotoru. Pro lepší představu je Positionbit převeden na úhel ve stupních vynásobený čtyřmi reprezentující počet pól párů stroje. Nakonec je úhel převeden na radiány pro snadnou implementaci ve funkcích sinus a cosinus v Parkově transformaci. Proměnná Positionrad má rozsah 0 -  $8\pi$ , protože použitý motor má čtyři pólpáry. Tento rozsah ale není vhodný pro funkce  $\sin$  a  $\cos$  používané k transformacím, které jsou implementovány pomocí Taylorova polynomu a mají omezený rozsah vstupních parametrů, konkrétně úhlu. Z tohoto důvodu je rozsah udržován od 0 do  $2\pi$ , využitím podmínkové funkce if a for cyklem.

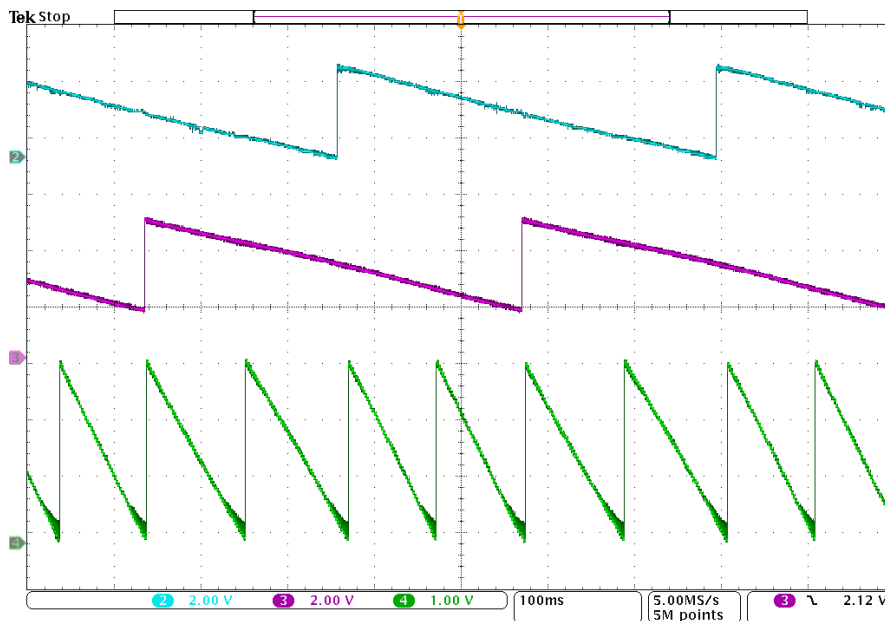


Obrázek 38: Měření PWM signálu od čidla polohy v eCAP jednotce

## 5 Výsledky měření

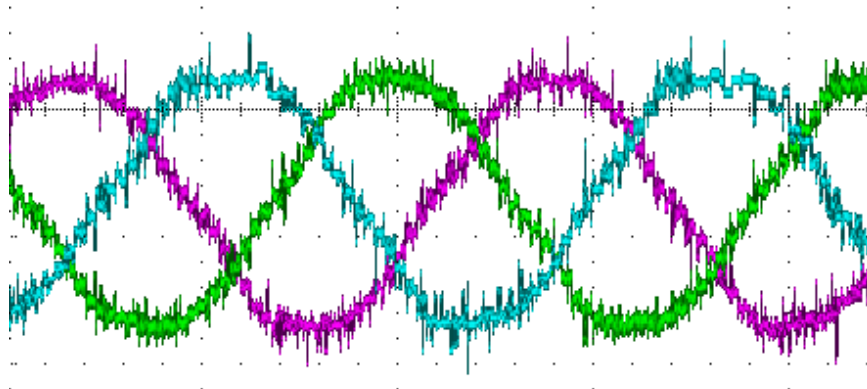
Veškerá měření byly prováděny v laboratoři EL105. Napájení řídicí jednotky a střídače bylo 24V/10A ze zdroje. Parametr  $I_{dw}$  (tokotvorná složka) byl po celou dobu nastaven na nulu.

Na obr. 39 jsou D/A převodníkem vykresleny průběhy zpracování úhlu natočení hřídele. Průběh CH2 pracuje v rozsahu 0 -  $8\pi$  a je počítána v pevné řádové čárce z důvodu jednodušší implementace přechodu z 0 na  $8\pi$ . Průběh CH4 je používán při transformacích a pracuje v rozsahu 0 -  $2\pi$ , kde za jednu otáčku hřídele dosáhne  $2\pi$  čtyřikrát.



Obrázek 39: Úhel natočení hřídele, **CH2** (světle modrá) – úhel natočení hřídele převedený do pevné řádové čárky ( $0 - 8\pi$ ) 2V/div, **CH3** (fialová) – úhel natočení hřídele od čidla polohy ( $0 - 2\pi$ ) 2V/div, **CH4** (zelená) – úhel natočení hřídele používaný v transformacích ( $0 - 2\pi$ ) 1V/div

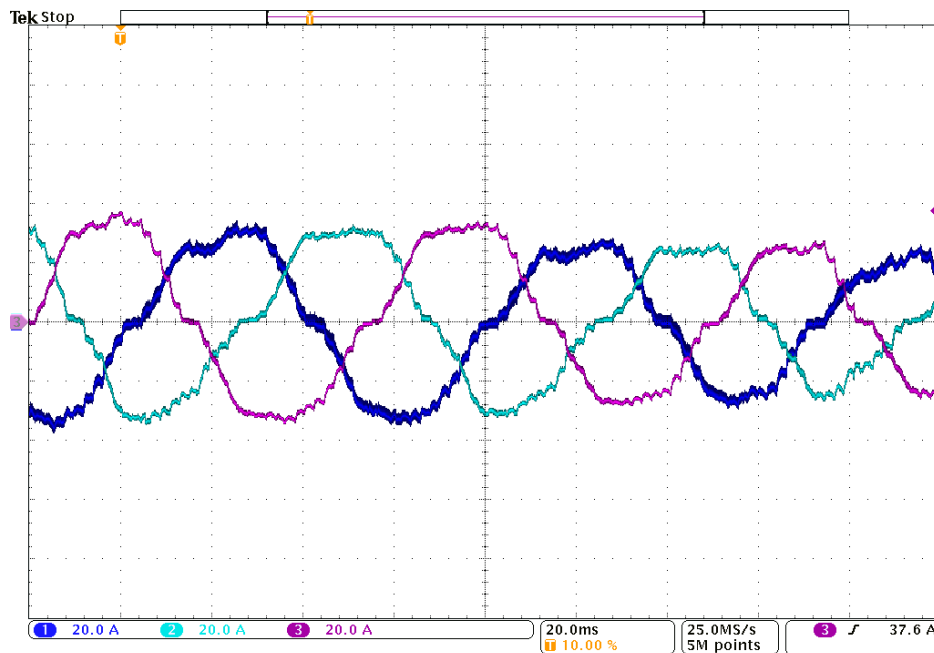
Na obr. 40 jsou vykresleny průběhy modulačních napětí pro jednotlivé fáze. „Chlupatost“ průběhu způsobuje rušení od spínání výkonových prvků.



Obrázek 40: Modulační napětí  $U_{u,v,w}$ , **CH2** (světle modrá) – modulační napětí  $U_u$ , **CH3** (fialová) – modulační napětí  $U_v$ , **CH4** (zelená) – modulační napětí  $U_w$

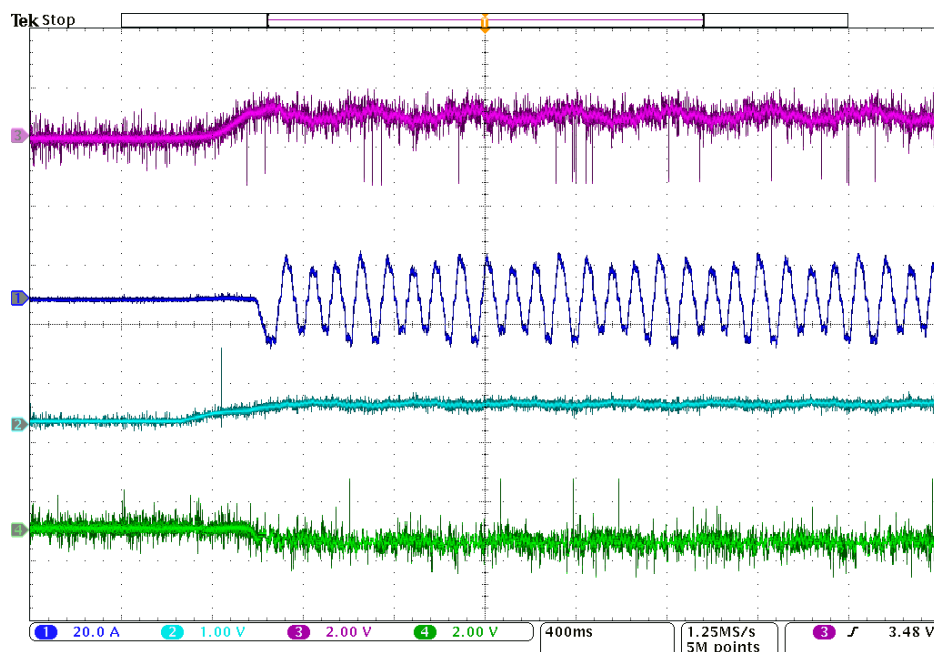
Obr. 41 zobrazuje průběhy proudů v jednotlivých fázích motoru. Motor není zatížen a neprobíhá žádný přechodový děj.





Obrázek 41: Běh motoru při požadavku na proud  $I_{qw} = 40$ , **CH1** (tmavě modrá) – proud fáze u 20A/div, **CH2** (světle modrá) - proud fáze v 20A/div, **CH3** (fialová) - proud fáze w 20A/div

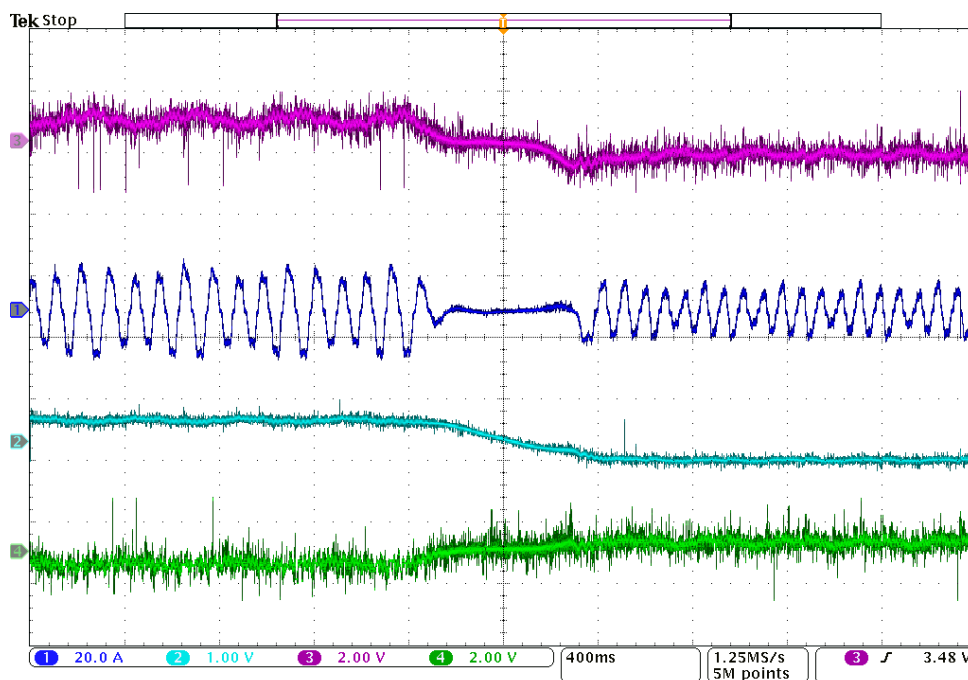
Obr. 42 zobrazuje rozběh motoru při požadavku  $I_{qw} = 40$ . Z obrázku lze vidět, že k rozběhnutí motoru dojde až při dostatečně velkém modulačním napětí  $U_q$  (světle modrá).



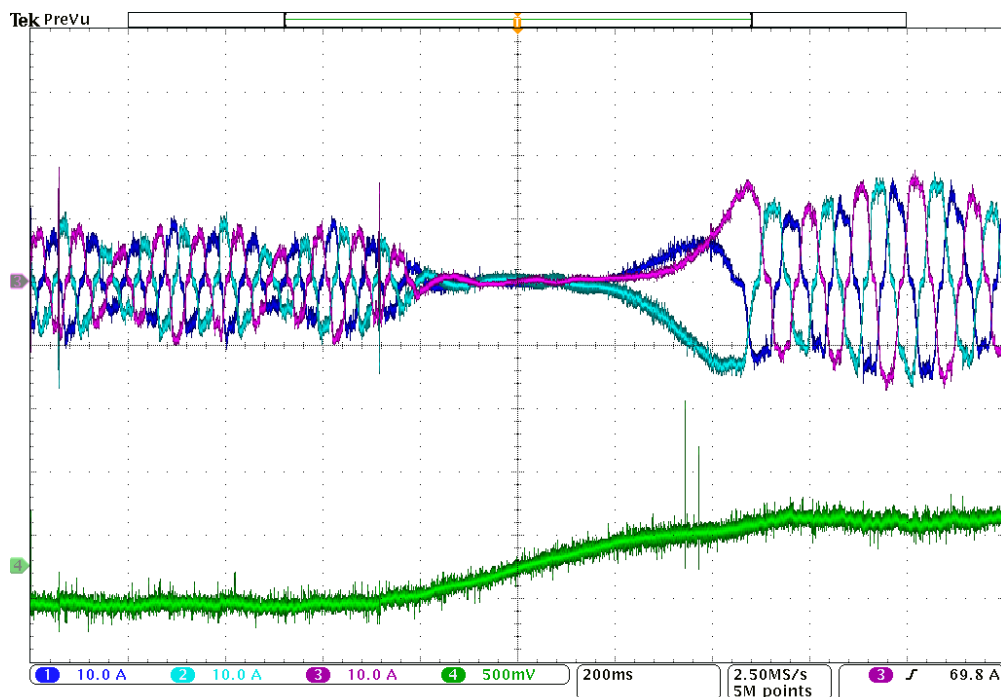
Obrázek 42: Rozběh pro skokovou změnu požadavku proudu  $I_q$  z 0 na 40, **CH1** (tmavě modrá) – proud fází w 20A/div, **CH2** (světle modrá) – modulační napětí  $U_q$  1V/div, **CH3** (fialová) – proud  $I_q$  30A/div (2V/div), **CH4** (zelená) – proud  $I_d$  30A/div (2V/div)

Reverzace motoru je zobrazena na následujících dvou obrázcích obr. 43 a obr. 44. Na obr.43 jsou vidět průběhy při reverzaci otáček z požadavku  $I_{qw} = 40$  na  $I_{qw} = -40$ . Průběh fáze w je zobrazen tmavě modrou barvou.

Na obr. 44 jsou vidět průběhy při reverzaci otáček z požadavku  $I_{qw} = -40$  na  $I_{qw} = 40$ . Na obrázku jsou vidět průběhy všech proudů motoru a modulační napětí  $U_q$ .



Obrázek 43: Reverzace, **CH1** (tmavě modrá) – proud fází w 20A/div, **CH2** (světle modrá) – modulační napětí  $U_q$  1V/div, **CH3** (fialová) – proud  $I_q$  30A/div (2V/div), **CH4** (zelená) – proud  $I_d$  30A/div (2V/div)



Obrázek 44: Reverzace, **CH1** – proud fází u (tmavě modrá) 10A/div, **CH2** (světle modrá) – proud fází v 10A/div, **CH3** (fialová) – proud fází w 10A/div, **CH4** (zelená) – modulační napětí  $U_q$  500mV/div

## 6 Závěr

Cílem této práce bylo navrhnout řídicí jednotku pro elektrickou motokáru, která nahradí doposud používané zapojení pulzního měniče a řídicí jednotky založené na mikrokontroléru AVR firmy Atmel. První kapitola je věnována teoretickému popisu řízeného PMSM motoru a vektorovému řízení v d-q souřadném systému. V další kapitole jsou popsány různé topologie zapojení DC-DC měničů k budičům výkonových prvků. Třetí kapitola se již věnuje jedné z hlavních částí vývoje řídicí jednotky, což je návrh DPS. Zde jsou popsány jednotlivé bloky schématu, ze kterého byla sestavena řídicí jednotka. DPS řídicí jednotky nebylo nutno po osazení téměř upravovat. Pouze bylo potřeba změnit připojení analogové země k mikrokontroléru. V další kapitole je popsáno vektorové řízení implementované do mikrokontroléru TMS320F28335 a blokově popsána celá SW topologie.

Při ladění byla otestována funkčnost veškerých výkonových výstupů osazených na DPS. Dále byly nastaveny a otestovány veškeré analogové vstupy potřebné jak pro vektorové řízení, tak i pro motokáru samotnou. Ladění a měření vektorového řízení probíhaly bez zátěže, protože zatím nebylo možné připevnit motor přímo na motokáru. Přípravek použitý pro upevnění motoru je zobrazen v příloze A.

Dále byla navržena DPS pro čidlo polohy a její kryt pro zajištění vodotěsnosti. Při návrhu bylo počítáno s osazením řídicí jednotky do bedny, která má být vodotěsná. Pro tento účel byly vybrány konektory, které zajistí průchod skrz bočnice a zachovají odolnost proti vodě.

Řídicí jednotka je osazena přímo nad střídačem, tvořeném půl můstky navrženými na KEV. Z tohoto důvodu bylo požadováno protažení silových vodičů přímo skrz desku. Takto zvolená konstrukce zároveň vytváří velice kompaktní celek střídače a řídicí desky.

Řídicí jednotka byla při měření napájena zdrojem 24V/10A. Tento zdroj dodával poloviční jmenovité napětí a proud byl velmi omezen. Pro vyzkoušení všech periférií jsou tyto parametry zdroje dostačující ale až bude jednotka s motorem osazena do motokáry bude zapotřebí upravit parametry regulátorů. Na naměřených průbězích v kapitole 5 lze vidět rozběh a reverzaci motoru. Také jsou zde průběhy modulačních napětí, požadovaného proudu  $I_{dw}$ ,  $I_{qw}$  a úhlu natočení hřídele.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] BARTOŠ, Václav. Elektrické stroje. Plzeň: Západočeská univerzita, 2006. ISBN 8070434449.
- [2] [online]. Copyright © [cit. 08.05.2019]. Dostupné z: <https://vts.cd.cz/documents/168518/195384/2908.pdf/0cfb0eda-cd8d-42f1-941e-b4e3ed2dfd2a>
- [3] KOBRLE, Pavel a Jiří PAVELKA. Elektrické pohony a jejich řízení. 3. přepracované vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2016. ISBN 978-80-01-06007-0.
- [4] ZEMAN, Karel, Výťah z přednášek Automatická regulace pohonů, Plzeň: Západočeská univerzita, 2013
- [5] Microsemi | Semiconductor & System Solutions | Power Matters [online]. Copyright © [cit. 11.04.2019]. Dostupné z: [https://www.microsemi.com/document-portal/doc\\_view/132799-park-inverse-park-and-clarke-inverse-clarke-transformations-mss-software-implementation-user-guide](https://www.microsemi.com/document-portal/doc_view/132799-park-inverse-park-and-clarke-inverse-clarke-transformations-mss-software-implementation-user-guide)
- [6] [online] [cit. 11.04.2019], Dostupné z: <https://www.digikey.com/en/articles/techzone/2017/nov/dual-dc-dc-converter-power-driver-modules>
- [7] [online] [cit. 11.04.2019] Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/slaa672/slaa672.pdf>
- [8] J. Gottschlich, M. Schäfer, M. Neubert and R. W. De Doncker, "A galvanically isolated gate driver with low coupling capacitance for medium voltage SiC MOSFETs," 2016 18th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'16 ECCE Europe), Karlsruhe, 2016, pp. 1-8. doi: 10.1109/EPE.2016.7695608  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7695608&inumber=7695111>
- [9] [online] [cit. 05.05.2019] Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tms320f28335.pdf>
- [10] [online] [cit. 05.05.2019] Dostupné z: [https://www.xppower.com/portals/0/pdfs/SF\\_JTL60.pdf?utm\\_campaign=portals%2F0%2Fpdfs%2FSF\\_JTL60.pdf](https://www.xppower.com/portals/0/pdfs/SF_JTL60.pdf?utm_campaign=portals%2F0%2Fpdfs%2FSF_JTL60.pdf)
- [11] [online] [cit. 05.05.2019] Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps562200.pdf>
- [12] [online] [cit. 05.05.2019] Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tlc555.pdf>
- [13] [online] [cit. 13.05.2019] Dostupné z: [https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-2ED020I12FA-DS-v03\\_01-EN.pdf?fileId=db3a30432e779412012e7b87d2b23878](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-2ED020I12FA-DS-v03_01-EN.pdf?fileId=db3a30432e779412012e7b87d2b23878)
- [14] [online] [cit. 13.05.2019] Dostupné z: [https://power.murata.com/datasheet?/data/power/ncl/kdc\\_mgj3.pdf](https://power.murata.com/datasheet?/data/power/ncl/kdc_mgj3.pdf)
- [15] [online] [cit. 13.05.2019] Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/mic2514.pdf>

- [16] [online] [cit. 13.05.2019] Dostupné z: [https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-BTS5016SDA-DS-v01\\_01-EN.pdf?fileId=5546d4625a888733015aa41a6c38112d](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-BTS5016SDA-DS-v01_01-EN.pdf?fileId=5546d4625a888733015aa41a6c38112d)
- [17] [online] [cit. 16.05.2019] Dostupné z: [https://www.ev-power.eu/docs/GWL-Power-POW-PFC\\_1-8kW-Spec.pdf](https://www.ev-power.eu/docs/GWL-Power-POW-PFC_1-8kW-Spec.pdf)
- [18] [online] [cit. 19.05.2019] Dostupné z: <http://www.ti.com/product/SN65HVD232>
- [19] [online] [cit. 19.05.2019] Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/sl1se11h/sl1se11h.pdf>
- [20] [online] [cit. 19.05.2019] Dostupné z: [https://ams.com/documents/20143/36005/AS5040\\_DS000374\\_3-00.pdf/c4dd3ec3-24f4-f3a2-0eca-811af6c30c84](https://ams.com/documents/20143/36005/AS5040_DS000374_3-00.pdf/c4dd3ec3-24f4-f3a2-0eca-811af6c30c84)
- [21] [online] [cit. 22.05.2019] Dostupné z: <https://www.omnitron.cz/download/SMARTTEC%20SMT172-Datasheet-V12.0.pdf>
- [22] [online] [cit. 22.05.2019] Dostupné z: [https://www.nxp.com/docs/en/datasheet/LPC185X\\_3X\\_2X\\_1X.pdf](https://www.nxp.com/docs/en/datasheet/LPC185X_3X_2X_1X.pdf)
- [23] [online] [cit. 22.05.2019] Dostupné z: <https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/15/74/87/a5/ab/0e/4f/bf/CD00225717.pdf/files/CD00225717.pdf/jcr:content/translations/en.CD00225717.pdf>
- [24] [online] [cit. 22.05.2019] Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tms320f28335.pdf>
- [25] [online] [cit. 23.05.2019] Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm5019.pdf>
- [26] FROHN, Manfred. Elektronika: polovodičové součástky a základní zapojení. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-123-3.
- [27] [online] [cit. 25.05.2019] Dostupné z: [https://www.lem.com/sites/default/files/products\\_datasheets/htfs\\_200\\_800-p.pdf](https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/htfs_200_800-p.pdf)
- [28] [online] [cit. 25.05.2019] Dostupné z: [https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/datasheets/ADR3412\\_ADR3420\\_ADR3425\\_ADR3430\\_ADR3433\\_ADR3440\\_ADR3450.pdf](https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/datasheets/ADR3412_ADR3420_ADR3425_ADR3430_ADR3433_ADR3440_ADR3450.pdf)
- [29] [online] [cit. 25.05.2019] Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/678/V02-0956EN-1143793.pdf>

## Seznam tabulek

TABULKA 1: POROVNÁNÍ TŘÍ TYPŮ MIKROKONTROLÉRŮ OD RŮZNÝCH VÝROBCŮ .....	21
TABULKA 2: PARAMETRY ZDROJE JTL6048S12 .....	23
TABULKA 3: HLAVNÍ PARAMETRY ZDROJE TMS562200 .....	24
TABULKA 4: VELIKOSTI ODPORŮ $R_H$ , $R_L$ PRO VSTUPNÍ PIN $V_{FB}$ .....	25
TABULKA 5: PARAMETRY DC/DC MĚNIČE MURATA MGJ3T12150505MC .....	27
TABULKA 6: POPIS JEDNOTLIVÝCH PINŮ NA VSTUPNÍ STRANĚ DRIVERU .....	28
TABULKA 7: POPIS JEDNOTLIVÝCH PINŮ NA VÝSTUPNÍ STRANĚ DRIVERU .....	28
TABULKA 8: HLAVNÍ PARAMETRY HIGH-SIDE SPÍNAČE MIC2514 [14] .....	34
TABULKA 9: HLAVNÍ PARAMETRY HIGH-SIDE SPÍNAČE BTS5016SDA [15] .....	34
TABULKA 10: JEDNOTLIVÉ STAVY NABÍJEČKY GWL POWER .....	35

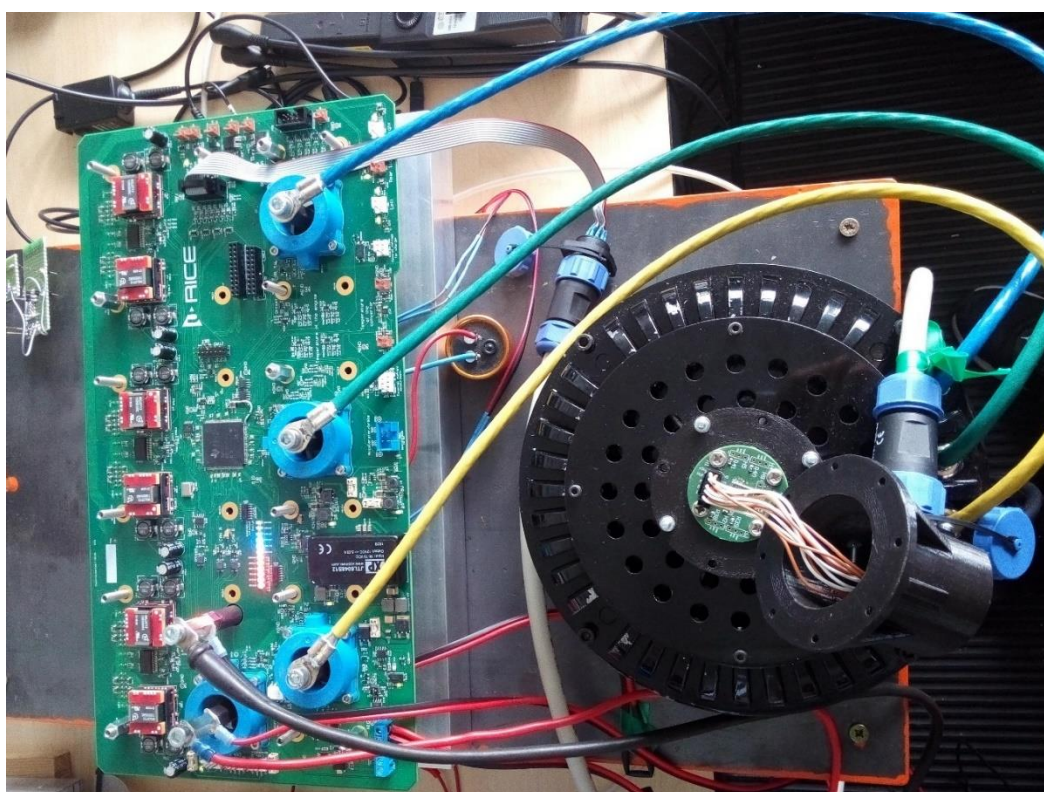
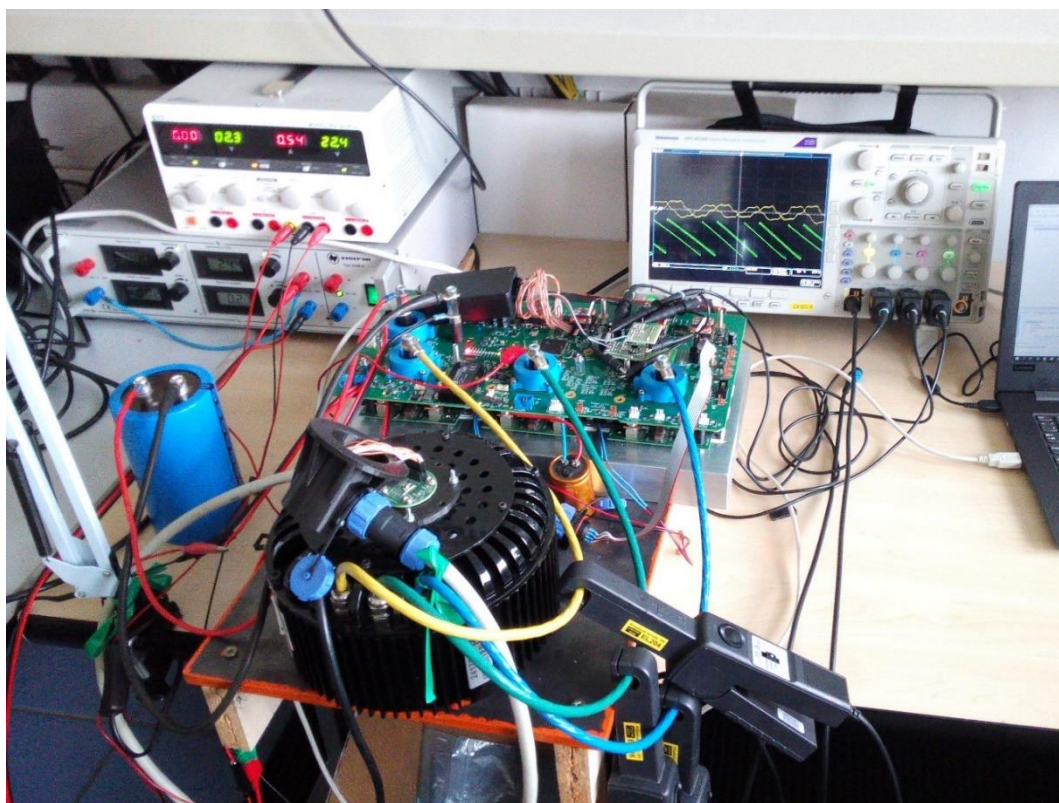
## Seznam obrázků

OBRÁZEK 1: FÁZOROVÉ DIAGRAMY PMSM MOTORU V RŮZNÝCH REŽIMECH [3].....	14
OBRÁZEK 2: PŘEHLED JEDNOTLIVÝCH SOUŘADNÝCH SYSTÉMŮ [4].....	15
OBRÁZEK 3: STACIONÁRNÍ SYSTÉM [4] .....	15
OBRÁZEK 4: ROTUJÍCÍ SOUŘADNÝ SYSTÉM [4] .....	16
OBRÁZEK 5: ZAPOJENÍ DC-DC MĚNIČŮ PRO KAŽDÝ BUDIČ ZVLÁŠŤ [5] .....	18
OBRÁZEK 6: ZAPOJENÍ DC-DC MĚNIČŮ PRO HORNÍ BUDIČE ZVLÁŠŤ A SPODNÍ SPOLEČNĚ....	18
OBRÁZEK 7: SPECIÁLNÍ TYP ZDROJE PRO BUDIČE [7] .....	19
OBRÁZEK 8: BLOKOVÉ SCHÉMA ŘÍDICÍ DESKY ELEKTRICKÉ MOTOKÁRY .....	20
OBRÁZEK 9: OSAZENÁ ŘÍDICÍ JEDNOTKA S PŘIPOJENÝM PMSM MOTOREM .....	21
OBRÁZEK 10: SCHÉMA ZAPOJENÍ ZDROJE 12V, 5A.....	24
OBRÁZEK 11: ÚČINNOST SNIŽOVACÍHO MĚNIČE [10].....	25
OBRÁZEK 12: SCHÉMA ZAPOJENÍ ZDROJE 3V3 .....	25
OBRÁZEK 13: VSTUPNÍ OBVODY ŘÍDICÍ DESKY PRO MOTOKÁRU.....	26
OBRÁZEK 14: SCHÉMA ZAPOJENÍ DC-DC MĚNIČE MGJ3T12150505MC .....	27
OBRÁZEK 15: SCHÉMA ZAPOJENÍ DRIVERU 2ED020I12FA .....	27
OBRÁZEK 16: ČASOVÝ DIAGRAM PODPĚŤOVÉ OCHRANY BUDIČE [12].....	29
OBRÁZEK 17: ČASOVÝ DIAGRAM FUNKCE DESATURAČNÍ OCHRANY BUDIČE [12] .....	30
OBRÁZEK 18: PROUDOVÁ SONDA .....	31
OBRÁZEK 19: DIFERENCIÁLNÍ ZESILOVAČ.....	31
OBRÁZEK 20: SCHÉMA ZAPOJENÍ NAPĚŤOVÉHO SENSORU HCPL-7520 .....	32
OBRÁZEK 21: SCHÉMA ZAPOJENÍ MĚŘENÍ TEPLoty Z NTC ČIDLA.....	33
OBRÁZEK 22: SCHÉMA ZAPOJENÍ HIGH-SIDE SPÍNAČE MIC2514Y .....	34
OBRÁZEK 23: SCHÉMA ZAPOJENÍ HIGH-SIDE SPÍNAČE.....	34
OBRÁZEK 24: SCHÉMA ZAPOJENÍ PRO ŘÍZENÍ VENTILÁTORU .....	35
OBRÁZEK 25: SCHÉMA ZAPOJENÍ PRO ŘÍZENÍ NAPĚTÍ URČENÉHO NABÍJEČCE.....	36
OBRÁZEK 26: SCHÉMA ZAPOJENÍ CAN KOMUNIKAČNÍ SBĚRNICE.....	37
OBRÁZEK 27: SCHÉMA ZAPOJENÍ SBĚRNICE RS-485.....	38
OBRÁZEK 28: ČIDLO POLOHY A JEHO VNITŘNÍ BLOKOVÉ SCHÉMA [19] .....	39
OBRÁZEK 29: DPS PRO ČIDLO POLOHY AS5040.....	40
OBRÁZEK 30: REGULAČNÍ SCHÉMA IMPLEMENTOVANÉ V ELEKTRICKÉ MOTOKÁŘE .....	41
OBRÁZEK 31: TOPOLOGIE SOFTWARE .....	42
OBRÁZEK 32: PŘEVEDENÍ 3-FÁZOVÝCH PROUDŮ NA PROUDY V D,Q.....	42



OBRÁZEK 33: PS REGULÁTOR.....	43
OBRÁZEK 34: PS REGULÁTOR ZAPSANÝ V JAZYCE C.....	43
OBRÁZEK 35: ZPĚTNÁ TRANSFORMACE V JAZYCE C .....	44
OBRÁZEK 36: ZPRACOVÁNÍ MODULAČNÍHO NAPĚTÍ PRO POUŽITÍ V PWM JEDNOTCE.....	44
OBRÁZEK 37: ČASOVÁ NÁVAZNOST JEDNOTLIVÝCH BLOKŮ V PROGRAMU .....	46
OBRÁZEK 38: MĚŘENÍ PWM SIGNÁLU OD ČIDLA POLOHY V CAPTURE JEDNOTCE .....	47
OBRÁZEK 39: ÚHEL NATOČENÍ HŘÍDELE.....	48
OBRÁZEK 40: MODULAČNÍ NAPĚTÍ $U_{u,v,w}$ .....	48
OBRÁZEK 41: BĚH MOTORU PŘI POŽADAVKU NA PROUD $I_{Qw} = 40$ .....	49
OBRÁZEK 42: ROZBĚH PRO SKOKOVOU ZMĚNU POŽADAVKU PROUDU $I_Q$ Z 0 NA 40 .....	49
OBRÁZEK 43: REVERZACE.....	50
OBRÁZEK 44: REVERZACE.....	51

Příloha A – Foto realizované řídicí jednotky připojené ke střídači a PMSM motoru



## **Příloha B – Obsah přiloženého CD-ROM**

- Text diplomové práce ve formátu PDF a DOCX
- Schémata a plošné spoje navrhnuté v programu Altium
- Program pro řídicí jednotku v jazyce C