

**Bakalářská práce**



**České  
vysoké  
učení technické  
v Praze**

**F3**

**Fakulta elektrotechnická  
Katedra řídicí techniky**

## **Vozítko s všesměrovým pohybem a bezkomutátorovými motory**

**Ondřej Brunner**

**Vedoucí: doc. Ing. Radoslav Bortel, Ph.D.**

**Obor: Kybernetika a robotika**

**Květen 2020**



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Brunner** Jméno: **Ondřej** Osobní číslo: **474390**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra řídicí techniky**  
Studijní program: **Kybernetika a robotika**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Vozítko s všesměrovým pohybem a bezkomutátorovými motory**

Název bakalářské práce anglicky:

**Omnidirectional vehicle with brushless DC motors**

Pokyny pro vypracování:

Navrhněte a realizujte vektorové řízení synchronního bezkomutátorového motoru se senzorem polohy rotoru a s jeho pomocí zrealizujte vozítko s všesměrovými koly 'mecanum'.

1. Navrhněte a zrealizujte elektroniku pro řízení synchronního bezkomutátorového motoru. Elektronika by měla obsahovat řídicí obvody motoru, řídicí mikrokontrolér a senzor polohy rotoru.
2. Navrhněte řídicí algoritmus realizující vektorové řízení motoru.
3. Implementujte řídicí algoritmus na mikrokontroléry v jazyce C.
4. Využijte zrealizované řízení motorů a navrhněte a sestavte vozítko se čtyřmi všesměrovými koly 'mecanum'.
5. Pro řízení vozítka navrhněte a zrealizujte centrální řídicí jednotku s modulem pro bezdrátovou komunikaci s PC (alternativně jiným zařízením).
6. Na PC (alternativně jiným zařízením) implementujte dálkové ovládání zrealizovaného vozítka.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Dorf, C.R., Bishop, R.H.: Modern Control Systems, Prentice Hall, 2011.
- [2] C. Xia.: Permanent Magnet Brushless DC Motor Drivers and Controls. Wiley, 2012.
- [3] Keesman, K.J.: System Identification, Springer, 2011.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**doc. Ing. Radoslav Bortel, Ph.D., katedra teorie obvodů FEL**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **14.01.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2021**

\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Radoslav Bortel, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

\_\_\_\_\_  
prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta



## Poděkování

Děkuji svému vedoucímu, doc. Ing. Radoslavu Bortelovi, Ph.D., za trpělivé vedení mé práce a předané zkušenosti.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně, a že jsem uvedl veškerou použitou literaturu.

V Praze, 15. května 2020

## Abstrakt

Tato práce se zabývá realizací všesměrového vozítka se synchronními bezkomutátorovými motory. Popisuje teorii vektorového řízení synchronních bezkomutátorových motorů, jeho zjednodušení pro účely této práce, princip funkce všesměrového kola mecanum a kinematiku vozítka s všesměrovým pohybem. Dále popisuje návrh elektroniky realizované pomocí plošných spojů a návrh mechanické části vozítka realizované 3D tiskem. Součástí práce je také implementace jednotlivých algoritmů a dálkového ovládání vozítka pomocí PC a joysticku. Práce je uzavřena popisem nastavení použitých regulátorů a demonstrací dosažených výsledků.

**Klíčová slova:** synchronní bezkomutátorový motor, vektorové řízení, všesměrové vozítko, všesměrové kolo mecanum

**Vedoucí:** doc. Ing. Radoslav Bortel, Ph.D.  
ČVUT v Praze,  
Fakulta elektrotechnická,  
Katedra teorie obvodů,  
Technická 2,  
166 27 Praha 6

## Abstract

This thesis deals with the implementation of an omnidirectional vehicle with brushless DC motors. It describes the theory of the field oriented control of brushless DC motors, its simplification for the purpose of this thesis, the omnidirectional wheel operation principle and the kinematics of an omnidirectional vehicle. It also describes the design of electronics implemented using printed circuit board and the design of mechanical part of the vehicle manufactured using 3D printing. The thesis also includes the implementation of individual algorithms and remote control of the vehicle using a PC and a joystick. Tuning of the used controllers and demonstration of achieved results are shown at the end of the thesis.

**Keywords:** brushless DC motor, field oriented control, omnidirectional vehicle, omnidirectional wheel mecanum

**Title translation:** Omnidirectional vehicle with brushless DC motors

# Obsah

<b>1 Úvod</b>	<b>1</b>	<b>6 Realizace programové části</b>	<b>35</b>
1.1 Motivace	1	6.1 Řídící algoritmus vozítka	35
1.2 Typická řešení	1	6.2 Řídící algoritmus otáček bezkomutátorového motoru	37
1.3 Obsah práce	2	6.3 Ovládání vozítka a komunikace s ním	39
<b>2 Synchronní bezkomutátorový motor</b>	<b>3</b>	<b>7 Naladění regulátorů a ověření výsledků</b>	<b>41</b>
2.1 Popis a rozdělení synchronních bezkomutátorových motorů	3	7.1 Ladění regulátoru pozice rotoru	41
2.2 Řízení bezkomutátorového motoru	4	7.2 Ověření vlastností regulace rychlosti rotoru	43
2.2.1 Vektorové řízení	5	7.3 Naladění a ověření kompenzace přetáčení vozítka	45
2.2.2 Realizace komutace motoru	8	<b>8 Závěr</b>	<b>47</b>
2.2.3 Řízení momentu rotoru pomocí napětí na fázích motoru	9	<b>Literatura</b>	<b>49</b>
2.2.4 Řízení polohy rotoru	10		
2.2.5 Řízení úhlové rychlosti rotoru	11		
2.3 Nerovnoměrnost momentu	12		
<b>3 Všesměrové kolo</b>	<b>13</b>		
3.1 Popis a využití	13		
3.2 Princip funkce kola mecanum	14		
3.3 Kinematika vozítka se čtyřmi koly mecanum	14		
3.4 Řízení reálného vozítka se čtyřmi koly mecanum	16		
<b>4 Návrh a realizace elektroniky</b>	<b>19</b>		
4.1 Blokové schéma elektroniky	19		
4.1.1 Centrální jednotka	19		
4.1.2 Kontrolér bezkomutátorového motoru	20		
4.1.3 Baterie a rozvod napájení	21		
4.2 Výběr součástek a motoru	21		
4.3 Prototypová elektronika	23		
4.4 Schémata navržené elektroniky	24		
4.5 Plošné spoje	28		
<b>5 Návrh a realizace mechanické části</b>	<b>33</b>		

## Obrázky

2.1 Srovnání koncentrovaného a distribuovaného vinutí Zdroj: <i>www.things-in-motion.blogspot.com</i> . . . . .	3	4.4 Fotografie prototypového kontroléru . . . . .	23
2.2 Srovnání průběhů spřažených magnetických toků a elektromotorických napětí u BLDC a PMSM motoru [4] . . . . .	4	4.5 Schéma centrální desky . . . . .	26
2.3 Grafické znázornění jednotlivých veličin . . . . .	6	4.6 Schéma kontroléru motoru . . . . .	27
2.4 Schéma vektorového řízení . . . . .	7	4.7 Osazovací plán vrchní vrstvy plošného spoje centrální desky . . . . .	29
2.5 Schéma třífázového střídače s komplementárním spínáním . . . . .	8	4.8 Osazovací plán vrchní vrstvy plošného spoje kontroléru . . . . .	30
2.6 Průběhy napětí a proudu pro rychlost $12\pi \text{ rad s}^{-1}$ . . . . .	9	4.9 Osazovací plán spodní vrstvy plošného spoje kontroléru . . . . .	30
2.7 Schéma vektorového řízení pro rychlost rotoru o velikosti nižší než $12\pi \text{ rad s}^{-1}$ . . . . .	10	4.10 Fotografie osazeného kontroléru motoru . . . . .	31
2.8 Schéma zpětnovazební regulace úhlu natočení rotoru . . . . .	10	4.11 Fotografie osazené centrální jednotky . . . . .	31
2.9 Schéma výsledného řízení rychlosti bezkomutátorového motoru pro potřeby vozítka . . . . .	12	4.12 Fotografie rozvodné desky . . . . .	31
3.1 Typické provedení všesměrových kol Zdroj: <i>www.warburtech.co.uk</i> . . . . .	13	5.1 Detailnější fotografie rámu vozítka . . . . .	33
3.2 Nákres sil působících na kolo mecanum při pohybu [11] . . . . .	14	5.2 Fotografie celého vozítka . . . . .	34
3.3 Možné symetrické struktury vozítka se čtyřmi koly mecanum [12]. Červené úsečky naznačují natočení válečků dotýkajících se podložky. . . . .	15	6.1 Diagram hlavní části řídicího algoritmu vozítka . . . . .	36
4.1 Nákres rozdělení elektroniky do více částí . . . . .	19	6.2 Diagram hlavní části řídicího algoritmu kontroléru . . . . .	37
4.2 Nákres jednotlivých bloků centrální jednotky . . . . .	20	7.1 Chování regulátoru nezatíženého motoru při skocích referenční pozice . . . . .	42
4.3 Nákres jednotlivých bloků kontroléru motoru . . . . .	21	7.2 Chování regulátoru nezatíženého motoru při různých rampách referenční pozice . . . . .	43
		7.3 Chování regulace rychlosti jednoho z kol při pohybu výsledného vozítka ve všech směrech . . . . .	44
		7.4 Chování regulace rychlosti jednoho z kol při pohybu výsledného vozítka v jednom směru větší rychlostí . . . . .	45
		7.5 Vývoj natočení vozítka při jeho umělém vychylování . . . . .	46



## Tabulky

4.1 Rozpiska součástí pro centrální jednotku.....	25
4.2 Rozpiska součástí pro jeden kontrolér .....	28



# Kapitola 1

## Úvod

Cílem práce je vytvořit dálkově ovládané všesměrové vozítko s koly „mecanum“ a synchronními bezkomutátorovými motory.

### 1.1 Motivace

Motivací pro realizaci vozítka s všesměrovým pohybem je především příležitost prakticky aplikovat a rozšířit znalosti nabyté v dosavadním studiu. Zejména se jedná o řízení synchronního bezkomutátorového motoru a rychlostí výsledného vozítka.

Z hlediska průmyslového využití jsou vozítka s všesměrovým pohybem zajímavá zejména v situacích vyžadujících pohyb na malém prostoru. Typickým příkladem jsou vysokozdvizné všesměrové vozíky operující ve stísněném prostoru mezi regály skladiště. Menší vozítka pak naleznou uplatnění například jako testovací platformy pro autonomní systémy prozkoumávající svým pohybem neznámé a stísněné prostředí.

### 1.2 Typická řešení

Všesměrovosti vozítka je možné dosáhnout použitím různých typů všesměrových kol v různém vzájemném uspořádání. Nejčastěji jsou používána 3 kola typu „omni“ v trojúhelníkové konfiguraci nebo 4 kola typu „mecanum“ v takzvané symetrické struktuře. Vztahy mezi rychlostmi jednotlivých kol a rychlostmi samotného vozítka jsou dány kinematikou použité struktury. V této práci je popsána a realizována symetrická struktura se 4 koly mecanum.

Pro dosažení všesměrovosti je dále klíčové, aby bylo možné jednotlivá kola nezávisle ovládat. U menších vozítek se k tomu se zpravidla využívají různé typy elektromotorů. S ohledem na elektroniku je nenáročným řešením využití kartáčových DC motorů opatřených mechanickou převodovkou. Pro přesné a jednoduché řízení vozítek s menší vahou je také možné využít krokových motorů. Zajímavým řešením je použít synchronní bezkomutátorové motory

schopné vyvinout dostatečný moment, aby bylo umožněno jejich nasazení bez mechanické převodovky. Tato výhoda je vyvážena nutností použití složitější elektroniky a řídicího algoritmu, než v případě DC nebo krokových motorů. Právě synchronní bezkomutátorové motory jsou pro pohon všesměrových kol použity.

S použitím synchronních bezkomutátorových motorů je třeba vyřešit problém jejich komutace a řízení. Základní techniky řízení synchronních bezkomutátorových motorů jsou takzvané sensorové, při kterých se používá senzor polohy rotoru. Mezi ně patří jednoduché šestikrokové řízení, složitější a přesnější vektorové řízení a nebo některé z komplexnějších technik, jako například prediktivní řízení. V poslední době jsou hojně využívány i bezsensorové techniky. Jejich nasazení je díky chybějícímu senzoru polohy rotoru levnější, ale hodí se pouze pro vyšší úhlové rychlosti rotoru. Pro potřeby výsledného vozítka je použito a v této práci popsáno vektorové řízení se senzorem polohy rotoru.

## 1.3 Obsah práce

Práce začíná teoretickým rozбором nastíněné problematiky. Konkrétně obsahuje stručný popis synchronního bezkomutátorového motoru, podrobnější popis vektorového řízení a jeho zjednodušení pro potřeby této práce. Následuje popis regulace pozice a rychlosti rotoru včetně kompenzace nerovnoměrnosti momentu. Dále je ukázán princip všesměrového kola mecanum a teoretickou část práce uzavírá rozbor kinematiky všesměrového vozítka.

Za účelem praktického realizování teoretických poznatků je navrhnutá vlastní elektronika realizována na plošných spojích. Elektronika zahrnuje kontrolér synchronního bezkomutátorového motoru regulující rychlost jednoho kola a centrální jednotku vozítka určující rychlosti všech kol a komunikující s uživatelem. Další kapitoly práce se veškerou touto elektronikou detailně zabývají. Součástí realizace vozítka je i tvorba rámu a dalších mechanických částí.

Dále je popsána implementace řídicích algoritmů a způsob ovládní vozítka. Tato část obsahuje implementaci zjednodušeného vektorového řízení synchronních bezkomutátorových motorů, řízení celého vozítka na úrovni jednotlivých kol, bezdrátovou komunikaci s uživatelem a způsob čtení dat z joysticku, kterým je vozítko ovládáno.

Práce je uzavřena popisem ladění regulátorů a demonstrací dosažených výsledků.

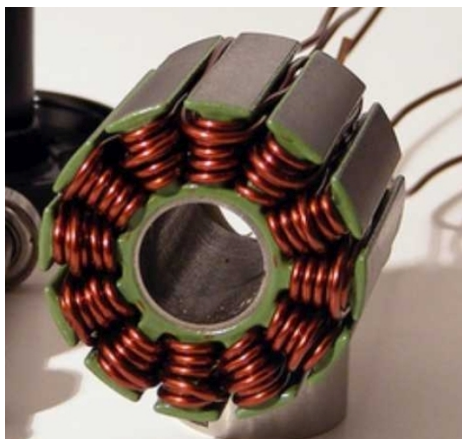
## Kapitola 2

### Synchronní bezkomutátorový motor

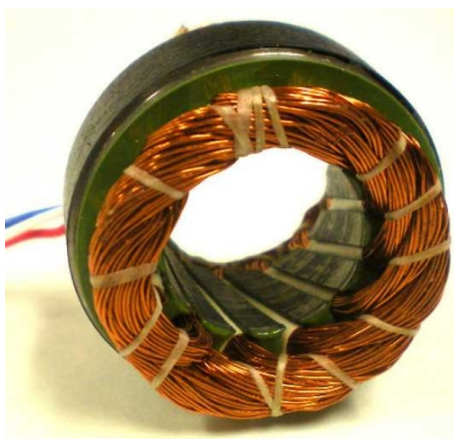
#### 2.1 Popis a rozdělení synchronních bezkomutátorových motorů

Synchronní bezkomutátorový motor (dále bezkomutátorový motor nebo jen motor) je elektrický stroj bez mechanického komutátoru, jehož komutaci zajišťuje zpravidla externí elektronika, která vytváří střídavé průběhy pro fáze motoru. Vinutí se v bezkomutátorovém motoru nachází ve statoru a rotor je opatřen permanentními magnety [1, s. 26].

Vinutí statoru je vícefázové, nejčastěji třífázové. Dále se rozlišuje jeho rozložení, které může být distribuované nebo koncentrované [2, s. 53]. Ukázky těchto provedení jsou uvedeny v obrázku 2.1.



(a) : Koncentrované vinutí



(b) : Distribuované vinutí

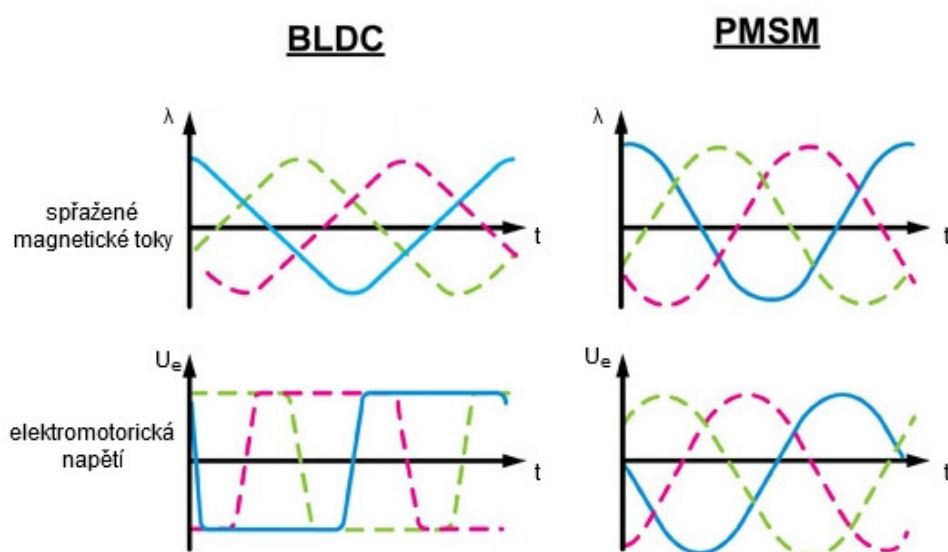
**Obrázek 2.1:** Srovnání koncentrovaného a distribuovaného vinutí

Zdroj: [www.things-in-motion.blogspot.com](http://www.things-in-motion.blogspot.com)

Podle rozložení vinutí se bezkomutátorové motory často dělí na PMSM („Permanent Magnet Synchronous Motor“) a BLDC („Brushless DC“) motory. PMSM motor má distribuované vinutí a jeho elektromotorické napětí má v ide-

álním případě sinusový průběh. BLDC motor naopak využívá koncentrované vinutí a jeho elektromotorické napětí by mělo být ideálně lichoběžníkového průběhu. [3, s. 651]

V praxi lze ideální průběhy elektromotorických napětí (obrázek 2.2) v přibližné podobě očekávat pouze u dražších motorů, kde je vinutí skutečně správně navinuté. Pro pohon vozítka s všesměrovými koly plně postačí levný třífázový motor využívaný například v RC modelech. Při výrobě těchto motorů se často uplatní výrobně jednodušší koncentrované vinutí. Mělo by se tedy jednat o BLDC motory, přesto průběh jejich elektromotorických napětí nelze obecně označit ani přibližně za lichoběžníkový. Takový motor nejde v pravém slova smyslu označit ani jako PMSM, ani jako BLDC.



**Obrázek 2.2:** Srovnání průběhů spřažených magnetických toků a elektromotorických napětí u BLDC a PMSM motoru [4]

Je třeba upozornit, že zde zmíněná terminologie není vždy striktně dodržována. Pojem BLDC motory bývají často označovány bezkomutátorové motory s koncentrovaným vinutím nebo tyto motory včetně vnějšího komutačního obvodu a nebo dokonce všechny synchronní stejnosměrné bezkomutátorové motory.

## 2.2 Řízení bezkomutátorového motoru

Cílem je řídit úhlovou rychlost a úhel natočení rotoru. Protože motory budou pohánět všesměrová kolečka na výsledném vozítku, je žádanou vlastností regulátoru schopnost řídit motor do opravdu nízkých otáček a přitom zajistit hladký chod.

Pro řízení bezkomutátorových motorů se využívá zejména šestikrokové a

vektorové řízení [4]. Při jejich výběru by se mělo vzít v potaz, zda se jedná o BLDC nebo PMSM motor. Právě kvůli rozdílným průběhům elektromotorických napětí je vhodné BLDC motor řídit šestikrokově (lichoběžníkově) [3, s. 673] a PMSM motor vektorově (sinusově) [3, s. 591]. Z důvodů popsaných výše ale nemá smysl u využívaného levného motoru mezi typy BLDC a PMSM rozlišovat. Při výběru způsobu řízení se v praxi bere v potaz spíše cílová rychlost rotoru, hladkost chodu, cena a složitost výsledného zařízení a další parametry [4].

Šestikrokové řízení je sice jednodušší na implementaci, hodí se ale pouze do vyšších otáček, protože v nízkých otáčkách u nedokonalých BLDC motorů způsobuje trhavý chod. Vektorové řízení je implementačně náročnější, ale zajistí možnost řídit rotor do nízkých otáček a umožní chod mnohem hladší. [5] To jsou klíčové vlastnosti pro řízení výsledného vozítka, proto bude v této práci popsáno vektorové řízení třífázových bezkomutátorových motorů.

### 2.2.1 Vektorové řízení

Smyslem vektorového řízení je ovládat vektor magnetické indukce statoru. Směr a velikost tohoto vektoru jsou určeny hodnotami fázových proudů [4]. Při znalosti úhlu natočení rotoru umožňuje vektorové řízení pomocí fázových proudů nezávisle řídit moment rotoru [2, s. 279], díky čemuž lze pomocí další regulace řídit i úhlové zrychlení, rychlost a pozici rotoru.

Složení fázových proudů může být geometricky znázorněno vektorem  $\mathbf{i}_s$ , jehož směr je shodný se směrem magnetické indukce statoru. Při tomto popisu platí pro fázové proudy vztahy [2, s. 280]

$$\begin{aligned} i_a &= i_s \sin(\theta_r + \delta), \\ i_b &= i_s \sin\left(\theta_r + \delta - \frac{2\pi}{3}\right), \\ i_c &= i_s \sin\left(\theta_r + \delta + \frac{2\pi}{3}\right), \end{aligned}$$

kde  $i_s = \|\mathbf{i}_s\|$ ,  $\theta_r$  je elektrický úhel natočení rotoru a  $\delta$  je úhel mezi vektorem magnetické indukce rotoru a vektorem  $\mathbf{i}_s$ . Pro motor s  $p$  pólpáry platí vztah

$$\theta_r = p\theta,$$

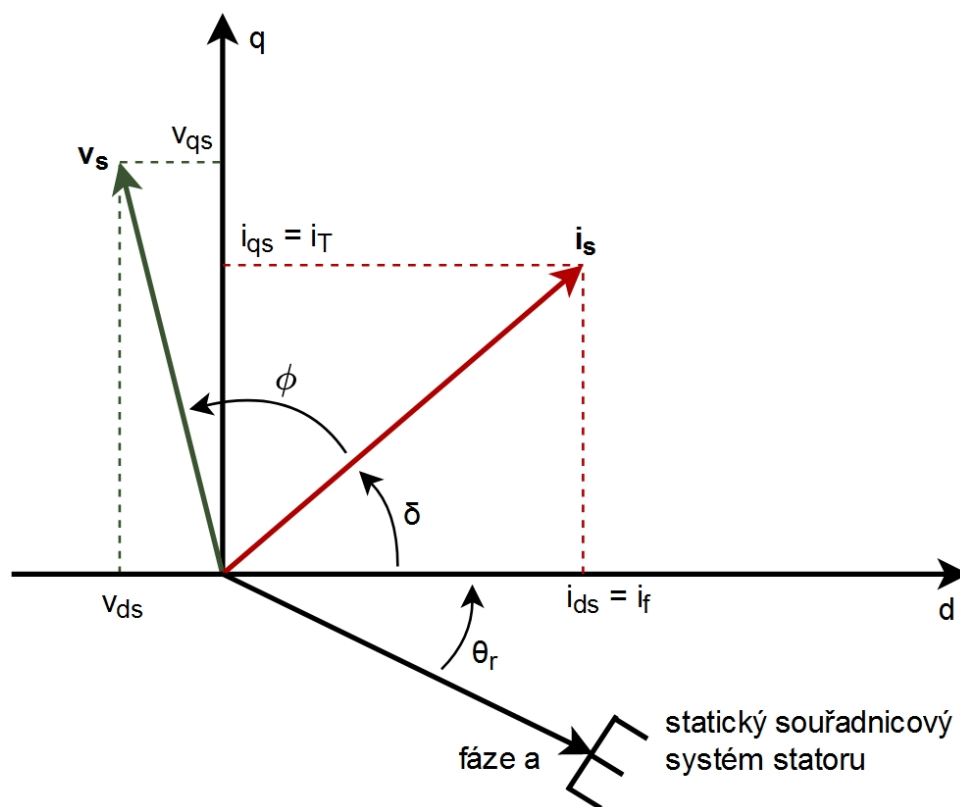
kde  $\theta$  je mechanický úhel natočení rotoru.

Aby bylo možné nezávisle řídit moment rotoru, je vhodné provést Parkovu transformaci (někdy označovanou jako Clarkova a Parkova) [6], která přetvoří průběhy  $i_a, i_b$  a  $i_c$  ze třífázového systému spjatého se státorem do dvoufázového ortogonálního systému spjatého s rotorem. Výsledkem jsou vztahy [2, s. 281]

$$i_T = i_s \sin \delta, \tag{2.1}$$

$$i_f = i_s \cos \delta. \tag{2.2}$$

Význam a rozložení jednotlivých průběhů je patrný z obrázku 2.3. Osa  $d$  je natočena ve směru vektoru magnetické indukce rotoru. Přibližně pak platí, že magnetické pole tvořené složkou  $i_T$  tvoří moment rotoru a složka  $i_f$  přispívá pouze k magnetickému poli rotoru [2, s. 282].



**Obrázek 2.3:** Grafické znázornění jednotlivých veličin

Ze vztahů (2.1) a (2.2) vyplývá, že složky  $i_f$  a  $i_T$  jsou přímo určeny úhlem  $\delta$  a hodnotou  $i_s$ . Pokud je vektorové řízení používáno k roztočení rotoru do vysokých rychlostí, je úhel  $\delta$  optimalizován, případně automaticky řízen za účelem maximalizace momentu motoru [2]. Pro řízení rychlosti rotoru do malých otáček, což je cílem této práce, plně postačuje použít jednoduchou a často používanou strategii, kdy [2, s. 304]

$$\delta = 90^\circ,$$

což vede po dosazení do rovnic (2.1) a (2.2) ke vztahům

$$\begin{aligned} i_T &= i_s, \\ i_f &= 0. \end{aligned}$$

V takovém případě je maximalizována složka  $i_T$  tvořící moment rotoru, jehož násobek je určen hodnotou  $i_s$ .

Pokud by bylo možné vytvořit přímo fázové proudy  $i_a$ ,  $i_b$  a  $i_c$ , byla by hodnota  $i_s$  (a tím i moment) plně určena a pomocí ní by bylo možné dále řídit

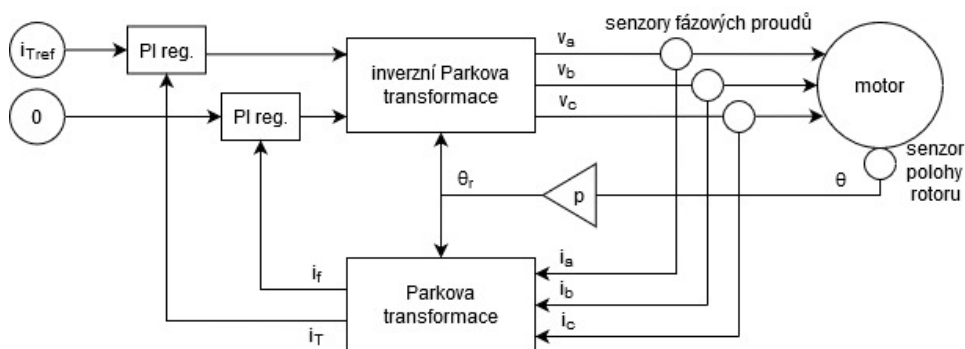


úhlovou rychlost a natočení rotoru. Přímou je možné vytvořit pouze napětí na jednotlivých fázích. Složení fázových napětí je opět možné geometricky znázornit vektorem  $\mathbf{v}_s$ , který svírá s vektorem  $\mathbf{i}_s$  úhel  $\phi$ , jak je znázorněno v obrázku 2.3. Fázová napětí pak mají průběhy [2, s. 282]

$$\begin{aligned}v_a &= v_s \sin(\theta_r + \delta + \phi), \\v_b &= v_s \sin\left(\theta_r + \delta - \frac{2\pi}{3} + \phi\right), \\v_c &= v_s \sin\left(\theta_r + \delta + \frac{2\pi}{3} + \phi\right).\end{aligned}$$

Pro řízení fázových proudů je nutné snímat skutečné proudy tekoucí do fází motoru a zpětnovazebně řídit fázová napětí tak, aby fázové proudy dosahovaly požadovaných hodnot. K této regulaci se typicky používá PI regulátor. [3, s. 607]

Pro vektorové řízení je vždy nutné znát úhel natočení rotoru  $\theta$ . Toho lze dosáhnout použitím senzoru natočení rotoru (senzorové řízení) a nebo úhel natočení rotoru odhadovat z dostupných informací, například z průběhu elektromotorických napětí (bezsenzorové řízení). Senzorové řízení poskytuje mnohem přesnější informaci o úhlu natočení rotoru. Kvůli nutnosti použití externího senzoru je nákladnější a je také třeba vyřešit problém montáže senzoru na motor. Oproti tomu realizace bezsenzorového řízení je jednodušší a levnější, ale kvůli nutnosti odhadovat úhel natočení rotoru je výpočetně složitější. Jednodušší algoritmy umožní použitelný odhad úhlu polohy rotoru pouze pro vyšší rychlosti. V malých rychlostech, do kterých je cílem práce motor řídit, je při použití bezsenzorového řízení odhad natočení rotoru velmi nepřesný, což způsobuje trhavý chod motoru. [4] Zejména z těchto důvodů bylo pro tuto práci zvoleno sensorové řízení.



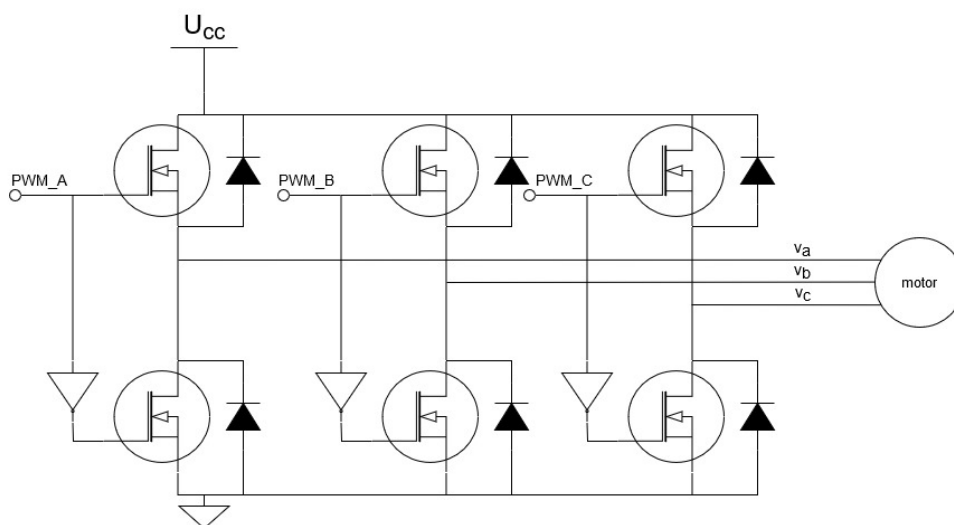
**Obrázek 2.4:** Schéma vektorového řízení

Kompletní schéma sensorového vektorového řízení bezkomutátorového motoru pro  $\delta = 90^\circ$ , kdy je řízena hodnota  $i_T$  tvořící moment na hodnotu  $i_{Tref}$ , je znázorněno na obrázku 2.4.

## 2.2.2 Realizace komutace motoru

Výpočty inverzní a přímé Parkovy transformace, realizace PI regulátorů a zpracování signálu ze senzoru polohy rotoru a senzorů fázových proudů se implementují na vhodném mikrokontroléru. Ten ale není schopen přímo spínat jednotlivé fáze motoru, na kterých se objevují vysoká napětí a tečou jimi velké proudy. K samotnému spínání fází je nutné využít externí komutační obvod, který ze stejnosměrného napájení vytvoří střídavé průběhy  $v_a$ ,  $v_b$  a  $v_c$ .

K tomu se nejčastěji používá třífázový střídač, jehož provedení je naznačeno na obrázku 2.5. Dvojici tranzistorů v dané větvi lze spínat nezávisle nebo komplementárně. Při nezávislém spínání je každý z tranzistorů ovládán zvlášť, a je tedy nutných 6 signálních vodičů. U komplementárního spínání (obrázek 2.5) je druhý tranzistor ovládán vždy opačným signálem než první. K ovládání komplementárně spínaného střídače stačí sice jenom 3 vodiče, vznikají zde ale větší proudové ztráty v důsledku zkratu v krátkém časovém intervalu během přepínání obou tranzistorů v jedné větvi. Tomu se dá zabránit metodou „Dead time insertion“, kdy jsou právě přepínané tranzistory na určitou dobu oba vypnuty. [7] K tomu je nutné buď šestici vodičů ovládat každý tranzistor zvlášť, a nebo použít elektroniku, která tuto metodu sama obstará.



**Obrázek 2.5:** Schéma třífázového střídače s komplementárním spínáním

Při vektorovém řízení se používá komplementární spínání [2, s. 156]. Pro spínání můstku se zpravidla využívá pulsně šířková modulace (PWM) s vhodnou frekvencí. Střída PWM signálu určuje střední hodnotu napětí příslušné fáze. Frekvence PWM ale nesmí být příliš vysoká, aby v důsledku metody Dead time insertion nebyly oba tranzistory ve větvi příliš dlouho vypnuty.

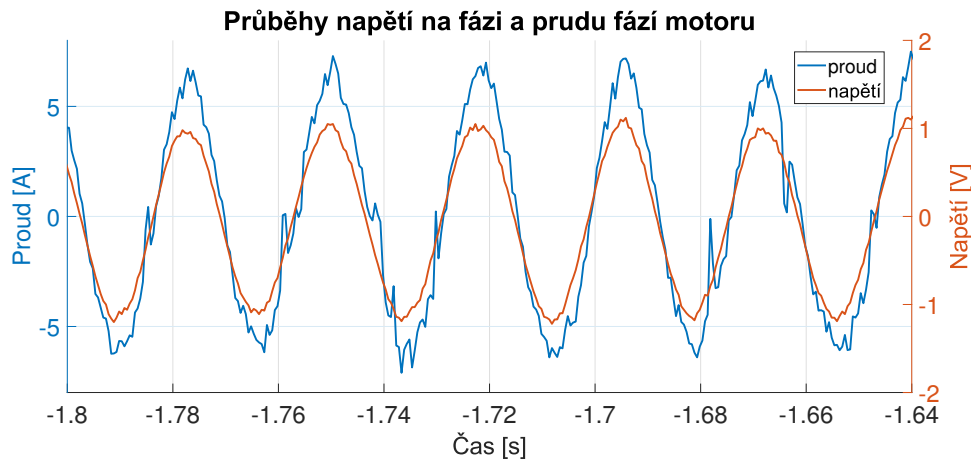
K řízení napětí  $v_a$ ,  $v_b$  a  $v_c$  bude využit třífázový střídač opatřený elektronikou zajišťující komplementární spínání s metodou Dead time insertion. Samotná fázová napětí pak budou určena střídou trojice pulsně šířkově modulovaných signálů s vhodnou frekvencí generovaných mikrokontrolérem.

### 2.2.3 Řízení momentu rotoru pomocí napětí na fázích motoru

Pro realizaci a základní ověření vektorového řízení byla navržena prototypová elektronika (ukázáno v sekci 4.3). Při experimentování s tímto prototypem bylo pozorováno, že pro určitý rozsah rychlostí rotoru je fázový posun mezi fázovými proudy a napětími zanedbatelný, tedy

$$\phi \approx 0.$$

Experimentováním byl rozsah rychlostí, kdy  $\phi \approx 0$ , stanoven na  $-12\pi \text{ rad s}^{-1}$  až  $12\pi \text{ rad s}^{-1}$ . Graf zaznamenaných proudů a napětí pro horní hranici tohoto rozsahu je na obrázku 2.6. Pro vyšší velikost rychlosti se hodnota  $\phi$  zvyšovala, pro nižší snižovala.



Obrázek 2.6: Průběhy napětí a proudu pro rychlost  $12\pi \text{ rad s}^{-1}$

Protože velikost rychlosti  $12\pi \text{ rad s}^{-1}$  je pro účely vozítka plně dostačující, bylo možné tohoto speciálního případu využít a vektorové řízení značně zjednodušit. Pro  $\phi = 0$  platí, že fázové proudy jsou násobky fázových napětí. Těmi je možné přímo řídit proudy  $i_f$ ,  $i_T$  a tím ovládat moment rotoru bez nutnosti snímání skutečných fázových proudů. Tvar fázových napětí v tomto případě je

$$v_a = v_s \sin(\theta_r + \delta), \quad (2.3)$$

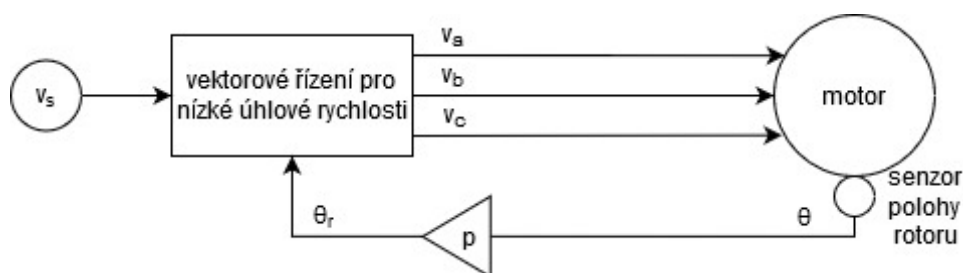
$$v_b = v_s \sin\left(\theta_r + \delta - \frac{2\pi}{3}\right), \quad (2.4)$$

$$v_c = v_s \sin\left(\theta_r + \delta + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2.5)$$

a proud  $i_T$  tvořící moment rotoru je pro  $\delta = 90^\circ$  určen vztahem

$$i_T = k v_s,$$

kde  $k$  je konstanta znázorňující, že proud je násobkem napětí, tedy i moment rotoru je násobkem hodnoty  $v_s$ . V takovém případě se schéma na obrázku 2.4 popisující vektorové řízení momentu rotoru zjednoduší v obrázek 2.7.



**Obrázek 2.7:** Schéma vektorového řízení pro rychlost rotoru o velikosti nižší než  $12\pi \text{ rad s}^{-1}$

Pro účely této práce bylo možné značně zjednodušit způsob řízení momentu rotoru. Pro velikost rychlosti rotoru do  $12\pi \text{ rad s}^{-1}$  nepotřebuje výsledná elektronika senzory fázových proudů a moment rotoru je určen hodnotou  $v_s$ .

## 2.2.4 Řízení polohy rotoru

Pro řízení polohy regulátoru byla použita zpětnovazební regulace naznačená na obrázku 2.8. Referencí  $r$  je požadovaný úhel natočení rotoru  $\theta_{ref}$ , snímaná veličina  $y$  je mechanický úhel natočení rotoru  $\theta$  a chyba regulace  $e = r - y$ . Regulátor z průběhu  $e$  vypočítává akční zásah  $u$  představující násobek momentu  $v_s$ .



**Obrázek 2.8:** Schéma zpětnovazební regulace úhlu natočení rotoru

Pro dobré fungování regulace je klíčový výběr vhodného regulátoru a zejména potom správné nastavení jeho parametrů. Zvolen byl PID regulátor, který je široce používán pro svoji jednoduchost a relativně snadné ladění jeho parametrů [1, s. 83]. Díky použití integrátoru je u mnohých soustav zajištěna nulová chyba regulace  $e$  při skoku veličiny  $r$  [8]. Pro spojitě průběhy veličin počítá PID regulátor hodnotu  $u(t)$  z hodnoty  $e(t)$  vztahem

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt},$$

kde konstanty  $K_p$ ,  $K_i$  a  $K_d$  představují proporční, integrační a derivační složku regulátoru.

Protože tento regulátor je implementován na digitálním mikrokontroléru, jsou spojitě veličiny  $u(t)$  a  $e(t)$  vzorkovány s periodou  $T_s$  a PID regulátor je pro tuto vzorkovací periodu nutné diskretizovat. To lze provést mnoha

způsoby, z nichž každý je vždy třeba ověřit. Po experimentování s několika různými diskretizacemi PID regulátoru na prototypové elektronice zdaleka nejlepší vlastnosti vykazovalo nahrazení PID regulátoru PSD (proporčně sumačně diferencním) regulátorem, který se řídí vztahem [1, s. 84]

$$u(k) = K_p e(k) + T_s K_i \sum_{j=0}^k e(j) + \frac{K_d}{T_s} (e(k) - e(k-1)).$$

Hodnota  $u(k) = v_s$  je v praxi saturována maximální a minimální možnou hodnotou střídý PWM modulace. Proto je vhodné použít „antiwindup“ filtr (filtr proti saturaci akčních členů) [1, s. 86]. Jeho úkolem je vypnutí integrální akce regulace, pokud je akční veličina zasaturována. Při diskretním řízení je antiwindup filtr implementován jednoduše tak, že v případě zjištění saturace akčního členu zvolí  $K_i = 0$  [9].

Dále je v praxi nutné filtrovat diferenci chyby regulace, aby nedocházelo k přílišnému zesilování šumu použitého senzoru. K tomu byl použit FIR filtr 2. řádu realizující filtrovanou diferenci  $d$  dle vztahu

$$d = a(e(k) - e(k-1)) + b(e(k-1) - e(k-2)),$$

kde  $a$  a  $b$  jsou koeficienty filtru, pro které platí  $a + b = 1$ .

PSD regulátor opatřený antiwindup filtrací a filtrací difference vypočítává  $u(k)$  ze vztahu

$$u(k) = \begin{cases} K_p e(k) + T_s K_i \sum_{j=0}^k e(j) + \frac{K_d}{T_s} d, & u(k-1) \in (0, u_{sat}) \\ K_p e(k) + \frac{K_d}{T_s} d, & \text{jinak} \end{cases} \quad (2.6)$$

Hodnota  $T_s$  je určena reálnými výpočetními schopnostmi mikrokontroléru. Konstanty  $K_p$ ,  $K_i$  a  $K_d$  jsou stejně jako konstanty  $a$  a  $b$  výsledkem ladění regulátoru, které je ukázáno v sekci 7.1.

Výsledkem je regulátor schopný řídit úhel natočení rotoru  $\theta$  na požadovanou hodnotu  $\theta_{ref}$  s nulovou chybou v ustáleném stavu.

## 2.2.5 Řízení úhlové rychlosti rotoru

Pro ovládní vozítka je nutné řídit úhlovou rychlost rotoru. Bylo použito řízení bez zpětné vazby s využitím regulátoru popsaného v sekci 2.2.4. Požadovaná rychlost je zavedena vytvořením rampy o směrnici  $\theta_{ref}$ .

Takový způsob regulace by měl nulovou chybu  $e$  pouze v případě, kdyby byla řízená soustava (motor) systém astatismu alespoň 1 [8]. Ideální motor bez zátěže tuto vlastnost má, reálný nikoliv [1]. Obecně tedy nelze při tomto způsobu řízení očekávat nulovou chybu  $e$  v ustáleném stavu. Praktické testy provedené v sekci 7.2 ale ukazují, že tato chyba je zanedbatelná.

## 2.3 Nerovnoměrnost momentu

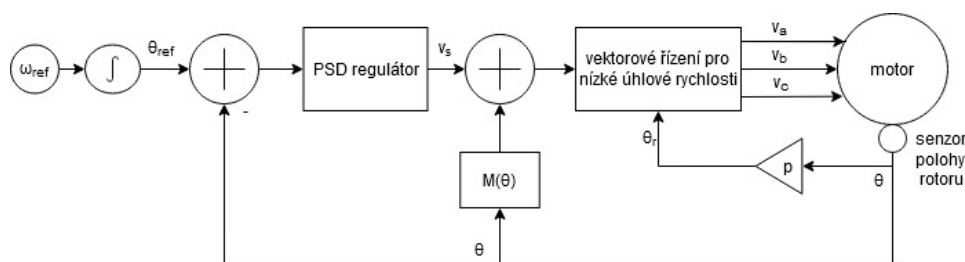
Pro ideální motor platí, že při konstantním momentu působícím na rotor a konstantním zátěžovém momentu se rotor bude otáčet konstantní rychlostí  $\omega$ . U reálného motoru se ale projevuje nerovnoměrnost momentu znemožňující hladký chod motoru. Tuto nerovnoměrnost je vhodné kompenzovat.

U drahých a kvalitně provedených motorů lze průběh nerovnoměrnosti momentu analyticky popsat a následně kompenzovat přímo [2, s. 110]. Oproti tomu u levných motorů, které jsou v této práci využity, významnou část nerovnosti momentu tvoří neideálnosti způsobené výrobou, zevrubně popsané v [2, s. 111]. Tyto neideálnosti jsou mezi jednotlivými motory nekonzistentní a metoda přímé kompenzace by zde nebyla účinná.

Průběh nerovnoměrnosti momentu lze získat zpětnovazebně s využitím regulátoru pozice rotoru popsaném v sekci 2.2.4. Při regulaci úhlu natočení rotoru na hodnotu  $\theta_{ref}$  odpovídá v ustáleném stavu (rotor se již nehýbe) a při nulové chybě  $e$  výstup regulátoru  $v_s$  momentu potřebném pro udržení rotoru na pozici  $\theta_{ref}$ . Při dostatečně jemné diskretizaci celé otáčky rotoru na jednotlivé úhly je možné každému úhlu pomocí regulátoru určit odpovídající nerovnoměrnost momentu představovanou hodnotou  $v_s$  a tím získat průběh nerovnoměrnosti momentu po celém obvodu statoru.

V praxi je diskretizace hodnot úhlu  $\theta$  určena rozlišením použitého senzoru polohy. Tato metoda je realizována s využitím regulátoru polohy tak, že je postupně měněna hodnota  $\theta_{ref}$  a výstup regulátoru  $v_s$  je po ustálení ukládán jako hodnota  $M(\theta_{ref})$ .

Při výsledné regulaci pozice rotoru je vždy k akční veličině  $v_s$  přičítána uložená hodnota  $M(\theta)$  odpovídající aktuální pozici rotoru, čímž dojde ke kompenzování nerovnoměrnosti momentu. Díky tomu je chod motoru mnohem hladší.



**Obrázek 2.9:** Schéma výsledného řízení rychlosti bezkomutátorového motoru pro potřeby vozítka

Výsledkem této kapitoly je regulátor otáček motoru pro rychlosti do velikosti  $12\pi \text{ rad s}^{-1}$  využívající zjednodušené vektorové řízení. Jeho součástí je kompenzace nerovnoměrnosti momentu přispívající k hladkému chodu motoru. Schéma výsledného řízení je na obrázku 2.9. Funkce regulátoru je popsána rovnicí (2.6) a zjednodušené vektorové řízení sadou rovnic (2.3), (2.4) a (2.5).

## Kapitola 3

### Všesměrové kolo

#### 3.1 Popis a využití

Všesměrové kolo (obrázek 3.1) je typicky zkonstruováno z klasického kola opatřeném po obvodu válečky, které jsou k tomuto středovému kolu připevněny tak, aby se mohly otáčet kolem své osy souměrnosti. Pro správnou funkci kola musí osa rotace válečků svírat s osou rotace středového kola nenulový úhel. U kol zvaných „mecanum“, která jsou v této práci použita, je tento úhel zpravidla  $45^\circ$ .



(a) : Kolo „mecanum“



(b) : Kolo „omni“

**Obrázek 3.1:** Typické provedení všesměrových kol

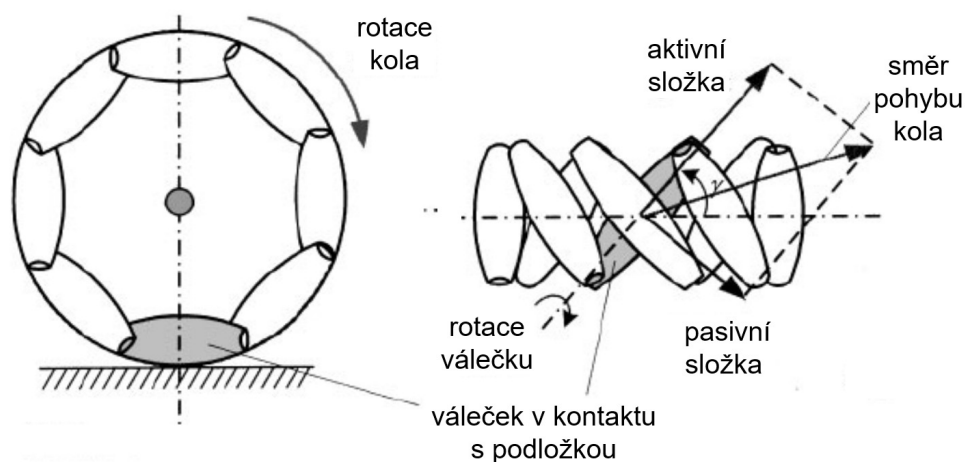
Zdroj: [www.warburtech.co.uk](http://www.warburtech.co.uk)

Vozítka opatřená koly mecanum mají při správném použití možnost pohybovat se ve všech směrech bez nutnosti natáčení kol. Výhodná je zejména schopnost rotace na místě s minimálním třením s podložkou. Naopak při translačním pohybu vozítka v jednom směru vzniká z důvodu smýkání válečků po podložce tření větší, než u klasických kol. [10] Klasická kola jsou také konstrukčně jednodušší a díky tomu i levnější. Tyto vlastnosti brání maso-

vému rozšíření všesměrových kol a proto jsou využívána spíše ve specifických situacích.

### 3.2 Princip funkce kola mecanum

Na kolečko působí v místě dotyku se zemí síla, kterou je možné rozložit na aktivní a pasivní složku, jak je znázorněno na obrázku 3.2. Aktivní složka působí ve směru osy rotace válečku dotýkajícího se s podložkou a je vyvolávána vlastní rotací kola mecanum. Ve směru pasivní složky síly, která je na osu



**Obrázek 3.2:** Nákres sil působících na kolo mecanum při pohybu [11]

rotace válečku kolmá, se může kolo volně pohybovat. Tato složka síly je zapříčiněna vnějšími silami působícími na kolečko. Typicky tuto složku tvoří další mecanum kolečka na vozítku.

Při zanedbání dalších sil (jako například tření) je směr pohybu kolečka určen vzájemným poměrem aktivní a pasivní složky síly. Díky tomu se kolečko může pohybovat ve všech směrech [11].

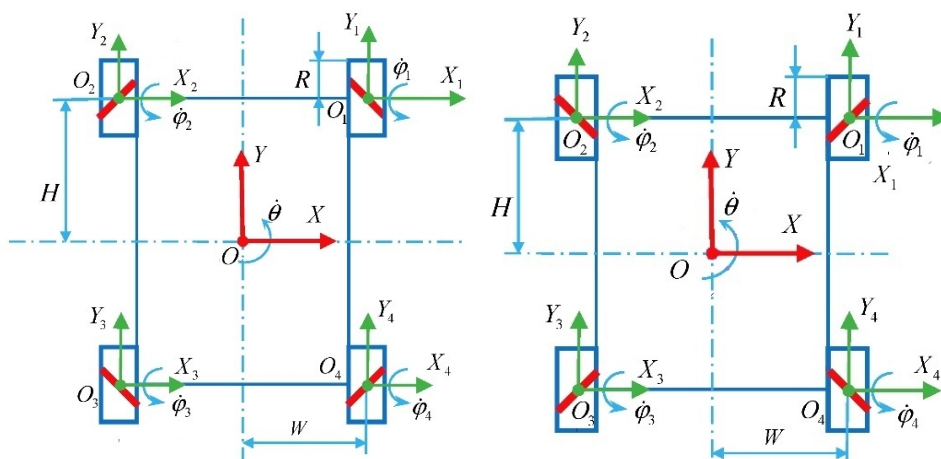
### 3.3 Kinematika vozítka se čtyřmi koly mecanum

Cílem práce je vytvořit vozítko se čtyřmi koly mecanum, řídit jeho kartézské rychlosti a úhlovou rychlost jeho otáčení v rovině. Při tom bude uvažován regulátor schopný řídit úhlové rychlosti jednotlivých koleček na zadané hodnoty. Tento regulátor je popsán v sekci 2.2.5. Za účelem řízení rychlostí výsledného vozítka je nutné znát jeho kinematiku.

Popis kinematiky je omezen na dvě nejčastěji používané čtyřkolové symetrické struktury, které jsou naznačeny na obrázku 3.3. K popisu jejich kinematiky je nutné uvažovat následující předpoklady [12].



1. Celé vozítko je dokonale tuhé.
2. Veškerý pohyb je uvažován v rovině a zanedbávají se nerovnosti podložky.
3. Válečky na podložce neprokluzují.
4. Kontakt mezi podložkou a kolem mecanum se nachází přímo pod středem kola.
5. Válečky na kole mecanum jsou natočeny pod úhlem  $45^\circ$ .



(a) : Symetrická struktura vozítka typu A (b) : Symetrická struktura vozítka typu B

**Obrázek 3.3:** Možné symetrické struktury vozítka se čtyřmi koly mecanum [12]. Červené úsečky naznačují natočení válečků dotýkajících se podložky.

Pro popis vozítka je použit souřadnicový systém naznačený na obrázku 3.3. S využitím uvedených předpokladů má takové vozítko 3 stupně volnosti a k popisu jeho polohy stačí 3 zobecněné souřadnice  $\mathbf{q}$ , které jsou

$$\mathbf{q} = (X, Y, \theta)^T.$$

Této polohy je dosahováno pomocí vhodně zvolených parametrů

$$\boldsymbol{\varphi} = (\varphi_1, \dots, \varphi_4)^T$$

vyjadřujících úhel natočení jednotlivých kol mecanum, jejichž orientace vyplývá z obrázku 3.3.

V případě vozítka je snahou řídit zobecněné rychlosti vozítka  $\dot{\mathbf{q}}$ , k čemuž jsou využívány úhlové rychlosti jednotlivých kol  $\dot{\boldsymbol{\varphi}}$ . Jakobián  $\mathbf{J}$  inverzní kinematiky uvažovaného vozítka svazující rychlosti vozítka s rychlostmi jednotlivých kol vztahem

$$\dot{\boldsymbol{\varphi}} = \mathbf{J} \cdot \dot{\mathbf{q}}$$

není těžké odvodit a je to zevrubně ukázáno například v [12] nebo [13].

Pro strukturu typu A (obrázek 3.3a) je tento jakobián

$$\mathbf{J}_A = -\frac{1}{R} \begin{pmatrix} -1 & 1 & H+W \\ 1 & 1 & -H-W \\ -1 & 1 & -H-W \\ 1 & 1 & H+W \end{pmatrix},$$

kde  $R$  je poloměr kola mecanum a hodnoty  $W$  a  $H$  určují pozice kol vzhledem ke středu vozítka (obrázek 3.3).

Pro strukturu typu B (obrázek 3.3b) je jakobián

$$\mathbf{J}_B = -\frac{1}{R} \begin{pmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Třetí sloupec jakobiánu  $\mathbf{J}_B$  je nulový, což limituje rotaci vozítka kolem svého středu a vozítka s touto strukturou není všesměrové [12]. Z tohoto důvodu byla pro výsledné vozítka zvolena struktura typu A.

### 3.4 Řízení reálného vozítka se čtyřmi koly mecanum

Rychlosti vozítka  $\dot{\mathbf{q}}$  jsou určeny přímo rychlostmi jednotlivých kol  $\dot{\varphi}$  a to s využitím vztahů vyplývajících z jakobiánu  $\mathbf{J}_A$ . Tyto vztahy jsou

$$\dot{\varphi}_1 = \frac{\dot{X}}{R} - \frac{\dot{Y}}{R} - \frac{H+W}{R}\dot{\theta}, \quad (3.1)$$

$$\dot{\varphi}_2 = -\frac{\dot{X}}{R} - \frac{\dot{Y}}{R} + \frac{H+W}{R}\dot{\theta}, \quad (3.2)$$

$$\dot{\varphi}_3 = \frac{\dot{X}}{R} - \frac{\dot{Y}}{R} + \frac{H+W}{R}\dot{\theta}, \quad (3.3)$$

$$\dot{\varphi}_4 = -\frac{\dot{X}}{R} - \frac{\dot{Y}}{R} - \frac{H+W}{R}\dot{\theta}. \quad (3.4)$$

V praxi lze očekávat, že vlivem reálných vlastností vozítka a regulátoru nebude jeho skutečná pozice a natočení plně odpovídat popsané kinematice. Pro kompletní zpětnovazební řízení rychlostí nebo poloh vozítka by však byl nutný lokalizační systém, což by značně přesáhlo rámec práce.

Zpětnovazebně kompenzováno je alespoň chybné natočení vozítka  $\theta$  vznikající při jízdě zejména kvůli občasnému prokluzování kol mecanum a posunutému těžišti mimo střed vozítka. Za tímto účelem bylo vozítka opatřeno senzorem úhlové rychlosti (gyroskopem), pomocí něhož je skutečný úhel  $\theta$  měřen.

Kompenzace přetáčení vozítka probíhá následovně. Pokud je požadovaná rychlost vozítka  $\dot{\theta}$  nenulová, je úhel natočení vozítka ovládán přímo uživatelem

a kompenzován není. Pokud  $\dot{\theta} = 0$ , je kompenzace zapnuta. Úhel  $\theta$ , ve kterém uživatel vozítko zanechal, je označen jako nulový.

Úhel natočení vozítka je proporcionálním regulátorem automaticky řízen do nuly, tedy do natočení, v jakém vozítko zanechal uživatel. Samotná kompenzace je potom tvořena zadáním úhlové rychlosti  $\dot{\theta}$ , jejíž hodnota je vypočítána ze vztahu

$$\dot{\theta} = -K_p \theta, \quad (3.5)$$

kde  $K_p$  je konstanta proporcionálního regulátoru.

Ačkoli je proporcionální regulátor velmi jednoduchý na implementaci, obecně je používán pouze v nenáročných aplikacích bez velkých nároků na parametry, jako jsou rychlost, překmit a doba ustálení regulace. V sekci 7.3 je ukázáno, že pro tento případ bohatě stačí.

Výsledkem této kapitoly je způsob řízení rychlostí  $\dot{\mathbf{q}}$  čtyřkolového vozítka s kolečky mecanum. Součástí řízení je i kompenzace nesprávného natočení vozítka vznikající v důsledku reálných vlastností kol mecanum a zbytku vozítka.



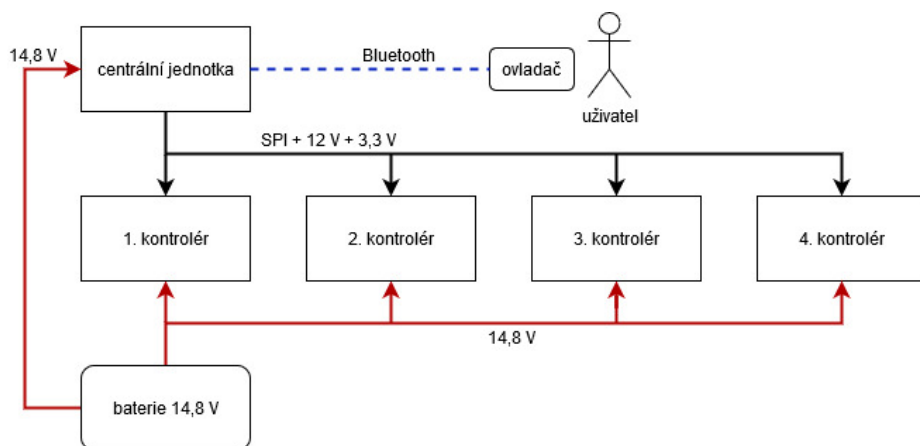
## Kapitola 4

### Návrh a realizace elektroniky

Pro realizaci výše uvedených postupů bylo navrženo obvodové řešení obsahující výkonové můstky pro řízení motorů, generování PWM signálů, snímání úhlů natočení rotoru jednotlivých motorů, ovládání celého vozítka, kompenzaci jeho přetáčení, bezdrátovou komunikaci s uživatelem a distribuci elektrické energie do příslušných částí vozítka.

#### 4.1 Blokové schéma elektroniky

Elektronika obsluhující výsledné vozítko je rozdělena do tří částí. Na centrální jednotku, jednotlivé kontroléry bezkomutátorových motorů a baterii s rozvodem napětí. Rozdělení elektroniky je znázorněno na obrázku 4.1.



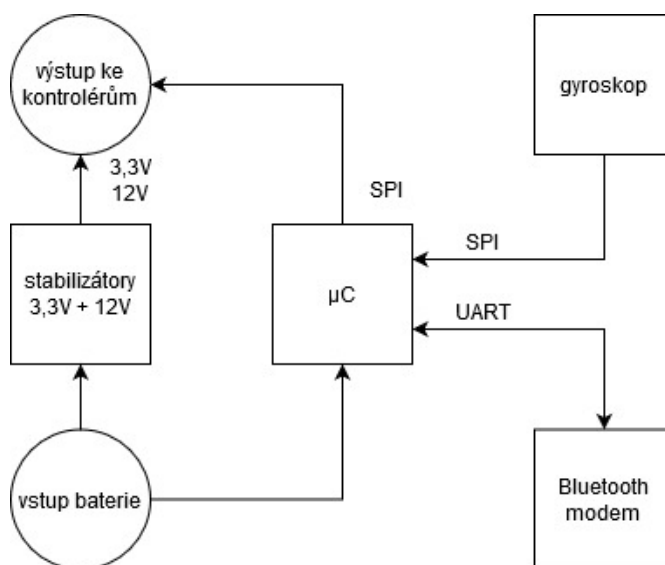
Obrázek 4.1: Nákres rozdělení elektroniky do více částí

##### 4.1.1 Centrální jednotka

Centrální jednotka zodpovídá za komunikaci s uživatelem a realizaci řízení celého vozítka popsaného v sekci 3.3. Kompozice centrální jednotky je naznačena na obrázku 4.2.

Pro komunikaci s uživatelem je využit standard Bluetooth. K tomu je na straně centrální jednotky přistupováno pomocí Bluetooth modemu a na straně uživatele pomocí počítače. K počítači je připojen joystick, kterým uživatel ovládá rychlosti vozítka  $\dot{q}$  a ty jsou odesílány do centrální jednotky. Ta naopak uživatele informuje o napětí baterie.

Z požadovaných rychlostí  $\dot{q}$  vypočítá centrální jednotka s využitím mikrokontroléru a rovnic (3.1), (3.2), (3.3) a (3.4) rychlosti otáčení jednotlivých koleček  $\dot{\varphi}$ , které předá patřičným kontrolérům pomocí hlavní SPI sběrnice. V ní centrální jednotka figuruje jako master zařízení a kontroléry jsou k centrální jednotce připojeny ve sběrnicové topologii.



**Obrázek 4.2:** Náskres jednotlivých bloků centrální jednotky

Dále je jednotka osazena gyroskopem snímajícím natočení vozítka, aby bylo možné kompenzovat chybné natočení vozítka vznikající při pohybu v důsledku prokluzování kol mecanum.

Centrální jednotka také pracuje s napájecím napětím baterie. To je měřeno a jeho hodnota je odesílána uživateli. Při velmi nízkém napětí je motorům centrální jednotkou znemožněn chod, aby se předešlo zničení baterie. Napětí z baterie je regulováno dvojicí stabilizátorů na hodnoty 12 V a 3,3 V, které potřebují jednotlivé kontroléry. Tato napětí jsou k nim rozvedena v jednom kabelu společně se signálovými vodiči hlavní SPI sběrnice.

#### ■ 4.1.2 Kontrolér bezkomutátorového motoru

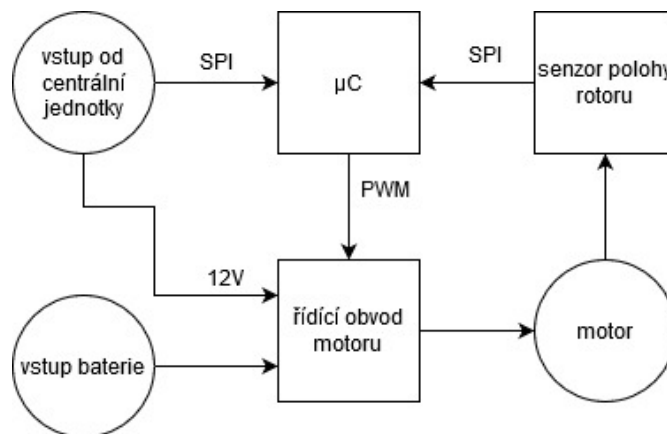
Na jednotlivých kontrolérech je realizováno vektorové řízení úhlové rychlosti motoru, které je popsáno v sekci 2.2. Kompozice jednoho kontroléru je naznačena na obrázku 4.3.

Hlavní částí kontroléru je mikrokontrolér komunikující pomocí hlavní SPI

sběrnice s centrální jednotkou. Na tomto mikrokontroléru je implementováno vektorové řízení, proto zpracovává signál ze senzoru polohy rotoru a pracuje s řídicím obvodem motoru.

Řídicí obvod motoru obsahuje třífázový střídač popsaný v sekci 2.2.2. Zároveň zajišťuje metodu Dead time insertion a má monitorovací obvody střídače, takže je schopen informovat mikrokontrolér například o přehřátí obvodu, nedostatečném napájecím napětí nebo o příliš velkém proudu do motoru.

Kvůli potřebě senzoru polohy motoru je každý kontrolér realizován na vlastním plošném spoji a je připevněn přímo k motoru (obrázek 5.1b).



**Obrázek 4.3:** Nákres jednotlivých bloků kontroléru motoru

### 4.1.3 Baterie a rozvod napájení

Pro potřeby správného fungování elektroniky je zapotřebí 3 napájecích hladin. Napětí 3,3 V slouží k napájení nízkoodběrových obvodů, k nimž patří jednotlivé mikrokontroléry, gyroskop, senzor polohy rotou a Bluetooth modem. Hodnota 12 V je spolu s napětím baterie dodávána řídicímu obvodu motoru.

Rozvedení napětí je patrné z obrázku 4.1. Napětí baterie je rozvedeno zvlášť v kabelech uzpůsobených na možný velký proudový odběr motorů. K tomu byla vytvořena rozvodná deska, k níž jsou připojeny jednotlivé kontroléry, centrální jednotka, baterie a hlavní vypínač. Právě kvůli potenciálně velkému proudovému odběru motorů byla pro napájení výsledného vozítka vybrána LiPo baterie o 4 článcích a nominálním napětí 14,8 V.

## 4.2 Výběr součástek a motoru

Kromě mnoha odporů, kondenzátorů a cívek vyžadují jednotlivé části elektroniky mikrokontrolér, řídicí obvod motoru, snímač polohy rotoru, gyroskop,

modem pro Bluetooth komunikaci, stabilizátory napětí, konektory a kabeláž pro vzájemné propojení. Dále bylo třeba vybrat vhodný motor.

Jako mikrokontrolér je použit procesor s jádrem ARM Cortex M0+, konkrétně v provedení ATSAMR21E18. Procesory s tímto jádrem se vyznačují nízkým proudovým odběrem, ale zároveň pro účely vozítka dostatečným výkonem. Využity jsou také jejich periferie jako AD převodník, generátor PWM nebo periferie pro obsluhu sběrnic SPI a UART.

Spínání motorů zajišťuje integrovaný obvod DRV8332. Tento obvod zvládne řídit motory s napájením až 50 V a je schopen dodávat do motoru kontinuální proud 8 A, ve špičce až 15 A. Uvnitř je tranzistorový můstek popsán v sekci 2.2.2 doplněný o obvody kontrolující teplotu obvodu a omezující proud do motoru. Napětí na jednotlivých fázích motoru je přes tento můstek řízeno trojicí pulsně šířkově modulovaných signálů z mikrokontroléru, jejichž frekvence může být až 500 kHz. Tento obvod také automaticky zajišťuje metodu Dead time insertion a umožňuje omezit proud tekoucí do motoru.

Pro snímání polohy motoru je využit magnetický enkodér. Další možností by bylo použít například enkodér optický. Ten ale vyžaduje složitější montáž a oproti magnetickému je náchylnější na vlivy okolí, například světlo nebo nečistoty. Byl vybrán magnetický enkodér AS5048A. Má rozlišení 14 bitů a hodnotu změřeného úhlu předává mikrokontroléru pomocí SPI sběrnice s maximální frekvencí hodin 20 MHz.

Výběr Bluetooth modemu a gyroskopu nebyl pro funkci vozítka klíčový. Zástavbový modul HC-06 pro Bluetooth komunikaci a gyroskop MPU-6000 cílovému použití plně vyhovují. S modulem HC-06 komunikuje mikrokontrolér pomocí sběrnice UART rychlostí až 115200 Bd a gyroskop předává data po sběrnici SPI s frekvencí hodin až 20 MHz. Jeho měřící rozsah je  $\pm 2000^\circ \text{s}^{-1}$  a rozlišení má 16 bitů.

Pro vytvoření napěťových hladin 12 V a 3,3 V byly vybrány lineární napěťové regulátory NCP1117DT33RKG a NCV1117ST12T3G. Ty splňují nároky na maximální vstupní napětí, proudový odběr i přiměřený ohřev jejich pouzdra vůči okolí v důsledku ztrátového výkonu. U stabilizátoru na 12 V bylo pro dobrý odvod tepla nutné uzpůsobit plošný spoj.

Napájecí hladiny 3,3 V, 12 V a signální vodiče hlavní SPI sběrnice jsou společně distribuovány v jednom kabelu. Vybrán byl plochý kabel o 12 žilách, který je k jednotlivým částem elektroniky připojen konektory řady Micro-MaTch.

Pro výběr bezkomutátorového motoru byl důležitý požadavek, aby osa rotoru vyčnívala z motoru na obě dvě strany. Na jednu stranu bude připevněno všesměrové kolo a na druhou stranu diametrálně magnetizovaný magnet sloužící k určení polohy rotoru pomocí magnetického enkodéru. Využit je motor C2230 firmy Turnigy. Má šest pólpárů, napájen může být z dvou- až čtyřčlánkové LiPo baterie a jeho proudový odběr může být ve špičce až 15 A.

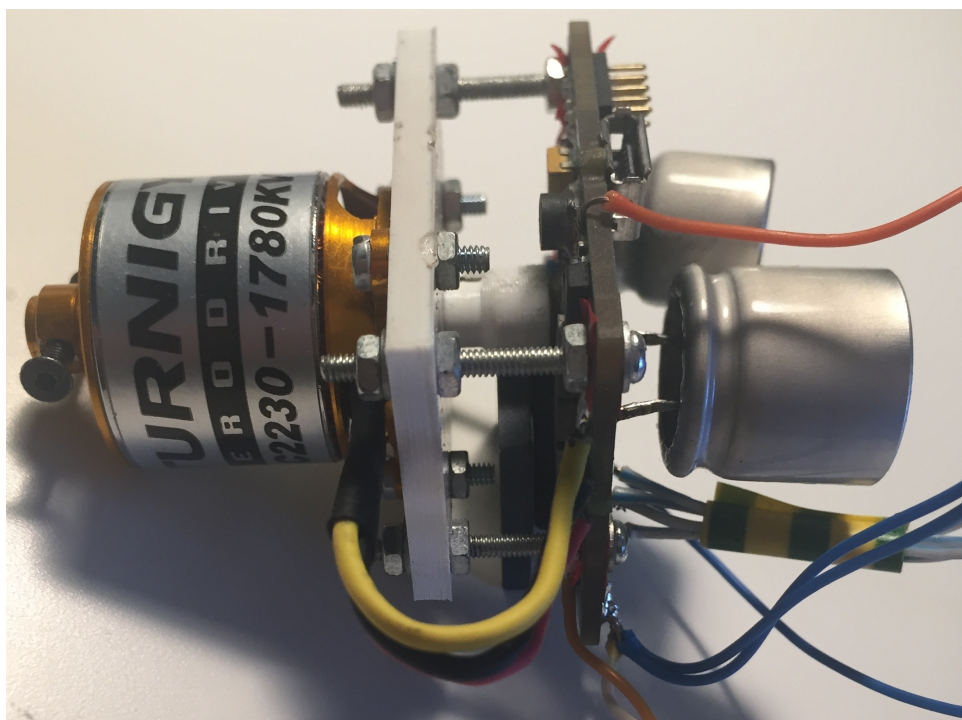


## 4.3 Prototypová elektronika

Za účelem ověření funkčnosti vybraných součástí a jejich vhodnosti pro vektorové řízení popsané v sekci 2.2 byl vytvořen prototyp kontroléru bezkomutátorového motoru (obrázek 4.4), na kterém bylo toto řízení implementováno.

Prototypový kontrolér má schéma prakticky stejné jako finální verze, pouze navíc umožňuje měřit fázové proudy. Měření fázových proudů bylo realizováno umístěním odporových bočniců mezi zem a zemnicí vývody jednotlivých větví střídače z řídicího obvodu motoru. Úbytek napětí na těchto odporech byl vnitřním AD převodníkem mikrokontroléru zesilován a převáděn.

Kvůli velkému šumu vnitřního zesilovače použitého AD převodníku se měření proudu ukázalo být jako velmi nepřesné. Z toho důvodu byl vytvořen tříkanálový diferenční zesilovač, kterým byla napětí na odporových bočnicích bez velkého šumu zesílena a AD převodníkem procesoru převedena. Díky tomu bylo možné fázová napětí a proudy zaznamenat a vykreslit do grafu na obrázku 2.6.



**Obrázek 4.4:** Fotografie prototypového kontroléru

Jak je popsáno v sekci 2.2.3, pro vozítkem používaný rozsah otáček lze moment motoru řídit pomocí napětí. Proto výsledná elektronika nemusí měření fázových proudů obsahovat.

Díky prototypové elektronice byla funkčnost jednotlivých součástí i vektorového řízení úspěšně ověřena a bylo možné navrhnout výslednou elektroniku.

## 4.4 Schémata navržené elektroniky

Schéma centrální jednotky je uvedeno na obrázku 4.5 s rozpiskou v tabulce 4.1. Uprostřed schématu se nachází mikrokontrolér (U1), který obsluhuje Bluetooth modem (U2), gyroskop (U3) a je opatřen programovacím konektorem (J1), USB konektorem (J2) a konektory pro připojení plochého kabelu s rozvodem napájení a hlavní SPI sběrnici (J3, J4). Součástí centrální jednotky jsou i stabilizátory napětí (S1, S2) a indikační led dioda (D1).

Integrované obvody jsou zapojeny podle příslušné dokumentace. U gyroskopu je za účelem zlepšení jeho přesnosti vytvořeno pomocí prvků L2, CC1, C15 a C14 filtrování napájení. Napájení celé centrální jednotky je filtrováno LC článkem z prvků L1, C16, aby bylo částečně odděleno od potenciálních proudových špiček odebíraných motory. Napětí baterie je měřeno mikrokontrolérem pomocí odporového děliče z odporů R3 a R4.

Napájecí hladiny a signály hlavní SPI sběrnice jsou plochým kabelem rozvedeny tak, že signální vodiče jsou proloženy vodiči uzemněnými. To napomáhá stínění signálních vodičů před vnějším a vzájemným rušením. Pro hlavní SPI sběrnici je vytvořeno zakončení u zdroje pomocí odporů R5 - R10. Společně se signály Chipselect je sběrnice rozdělena do dvou kabelů, přičemž ke každému z nich jsou připojeny dva kontroléry.

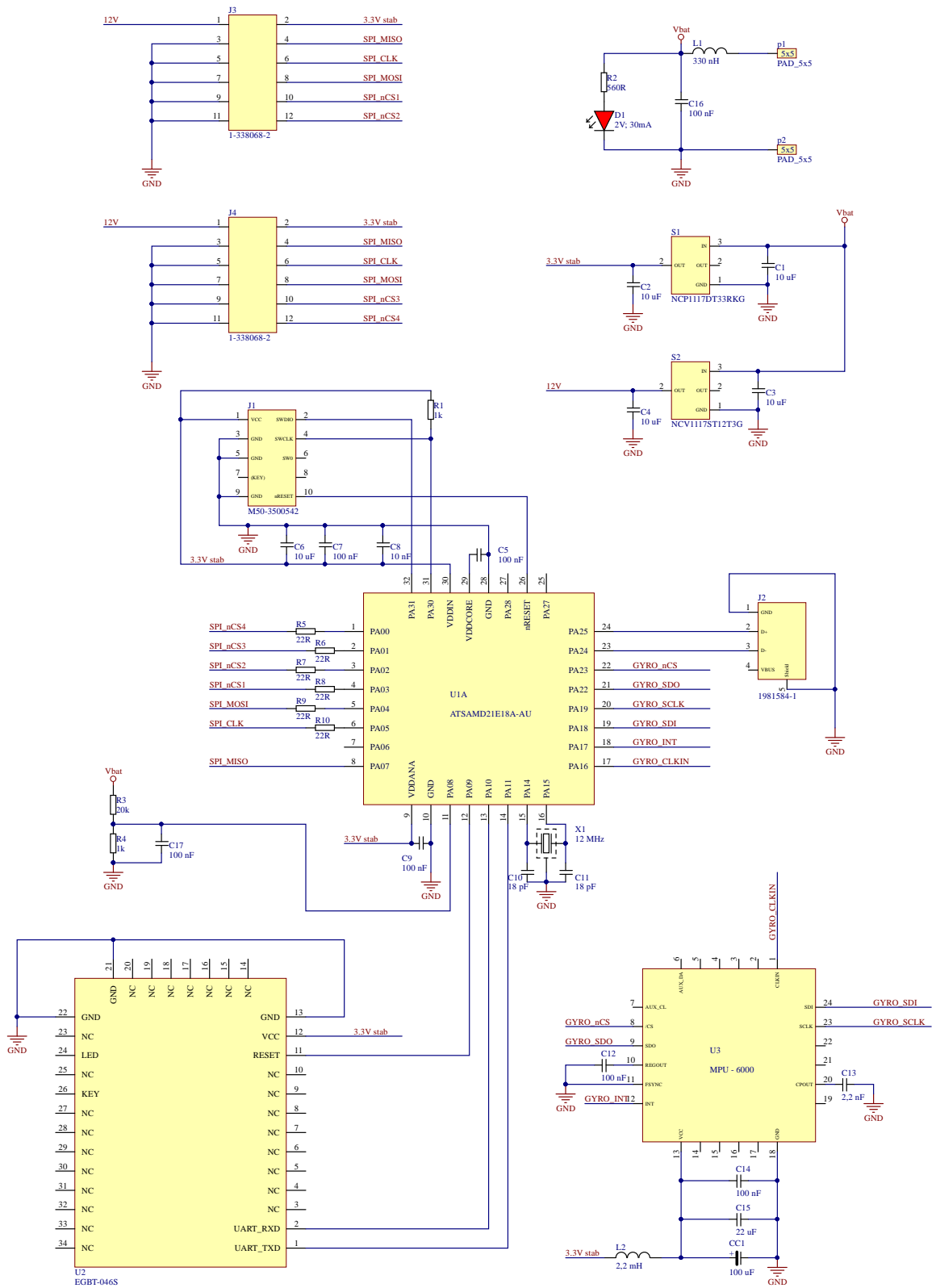
Schéma zapojení kontroléru je na obrázku 4.6 a rozpiska součástek je uvedena v tabulce 4.2. Základem je mikrokontrolér (U1) komunikující s dalšími bloky obvodu. Těmi jsou magnetický enkodér (U2), řídicí obvod motoru (U3), programovací konektor (J1), USB konektor (J2) a konektor pro připojení k centrální jednotce (J3).

Zapojení jednotlivých integrovaných obvodů je shodné s jejich dokumentací. U enkodéru bylo pomocí prvků L1, CC1, C8 a C7 vytvořeno stejné filtrování napájení, jako u gyroskopu. Pomocí odporu R3 u řídicího obvodu motoru je dosaženo omezení špičkového proudu do motoru na hodnotu 11,6 A. Odpor R5 zajišťuje zakončení u zdroje pro signál MISO hlavní SPI sběrnice. Z odporů R6 a R7 je vždy osazen jen jeden podle toho, který signál Chipselect je danému kontroléru určen.

Hodnota, kód	Označení	Typ součástky	Počet
10 $\mu\text{F}$	C1, C2, C3, C4	Kapacitor 0805	4
100 nF	C5, C7, C9, C12, C14, C16, C17	Kapacitor 0402	7
10 $\mu\text{F}$	C6	Kapacitor 0402	1
10 nF	C8	Kapacitor 0402	1
18 pF	C10, C11	Kapacitor 0402	2
2,2 nF	C13	Kapacitor 0402	1
22 $\mu\text{F}$	C15	Kapacitor 0805	1
100 $\mu\text{F}$	CC1	Kapacitor 1210	1
2 V, 30 mA	D1	LED dioda 0805	1
M50-3500542	J1	konektor Atmel ICE	1
1981584-1	J2	konektor USB	1
1-338068-2	J3, J4	konektor plochý kabel	2
330 nH	L1	L_XEL4020-331MEC	1
2,2 mH	L2	L_SRR6603-222ML	1
1 k $\Omega$	R1, R4	Odpor 0402	2
560 $\Omega$	R2	Odpor 0805	1
20 k $\Omega$	R3	Odpor 0402	1
22 $\Omega$	R5, R6, R7, R8, R9, R10	Odpor 0402	6
NCP1117DT33RKG	S1	NCP1117DT33RKG	1
NCV1117ST12T3G	S2	NCV1117ST12T3G	1
ATSAMD21E18A-AU	U1	ATSAMD21E18A-AU	1
HC-06	U2	HC-06	1
MPU - 6000	U3	MPU-6000	1
12 MHz	X1	EA2532LA18-12.000M TR	1

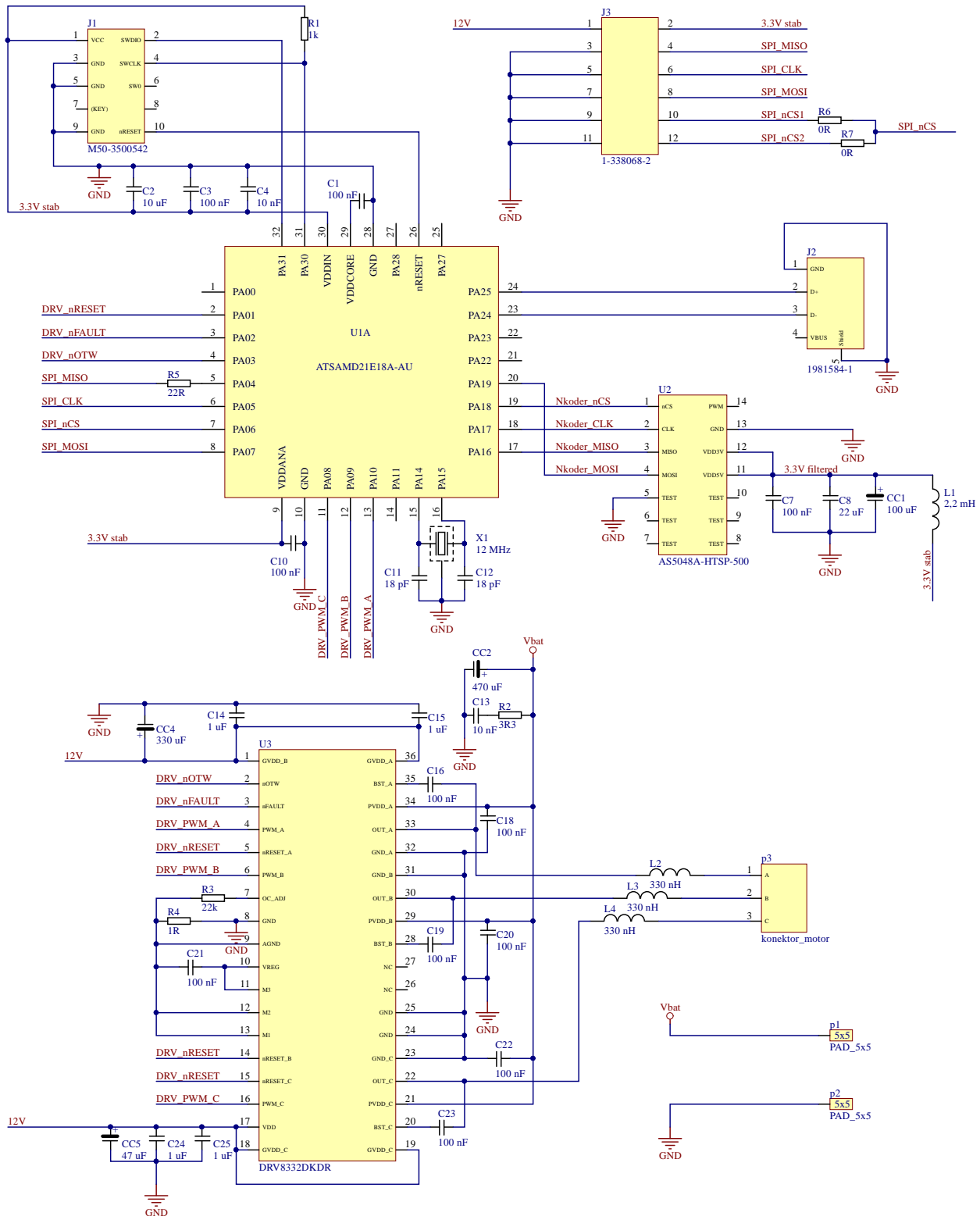
**Tabulka 4.1:** Rozpiska součástek pro centrální jednotku

#### 4. Návrh a realizace elektroniky



Obrázek 4.5: Schéma centrální desky

#### 4.4. Schémata navržené elektroniky



Obrázek 4.6: Schéma kontroléru motoru

Hodnota, kód	Označení	Typ součástky	Počet
100 nF	C1, C3, C7, C10, C16, C18 - C23	Kapacitor 0402	11
10 $\mu$ F	C2	Kapacitor 0402	1
10 nF	C4, C13	Kapacitor 0402	2
22 $\mu$ F	C8	Kapacitor 0805	1
18 pF	C11, C12	Kapacitor 0402	2
1 $\mu$ F	C14, C15, C24, C25	Kapacitor 0402	4
100 $\mu$ F	CC1	Kapacitor 1210	1
470 $\mu$ F	CC2	C_TCN4477M016R0100E	1
330 $\mu$ F	CC4	C_TCJE337M016R0070	1
47 $\mu$ F	CC5	Kapacitor 1210	1
M50-3500542	J1	konektor Atmel ICE	1
1981584-1	J2	konektor USB	1
1-338068-2	J3	konektor plochý kabel	1
2,2 mH	L1	L_SRR6603-222ML	1
330 nH	L2, L3, L4	L_XEL4020-331MEC	3
1 k $\Omega$	R1	Odpor 0402	1
3,3 $\Omega$	R2	Odpor 0402	1
22 k $\Omega$	R3	Odpor 0402	1
1 $\Omega$	R4	Odpor 0402	1
22 $\Omega$	R5	Odpor 0402	1
0 $\Omega$	R6, R7	Odpor 0402	2
ATSAMD21E18A-AU	U1	ATSAMD21E18A-AU	1
AS5048A-HTSP-500	U2	AS5048A-HTSP-500	1
DRV8332DKDR	U3	DRV8332DKDR	1
12 MHz	X1	EA2532LA18-12.000M TR	1

Tabulka 4.2: Rozpiska součástek pro jeden kontrolér

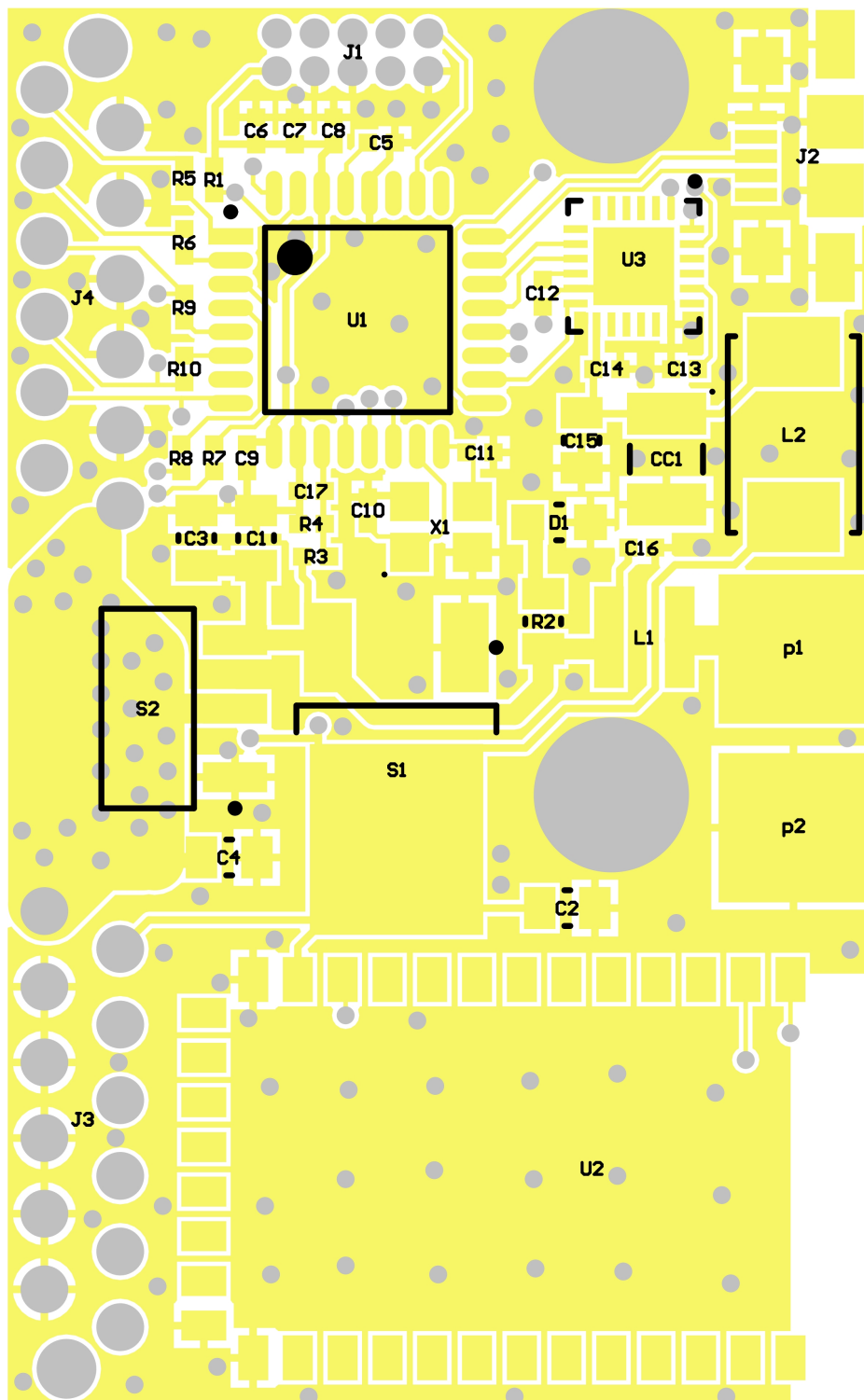
## 4.5 Plošné spoje

Plošné spoje byly navrženy v prostředí Altium. Osazovací plány, z nichž jsou patrné i detaily navrhnutých plošných spojů, jsou uvedeny na obrázcích 4.7, 4.8 a 4.9. Rozvodná deska není osazena žádnými součástkami, proto je zde pro představu uvedena pouze její fotografie na obrázku 4.12.

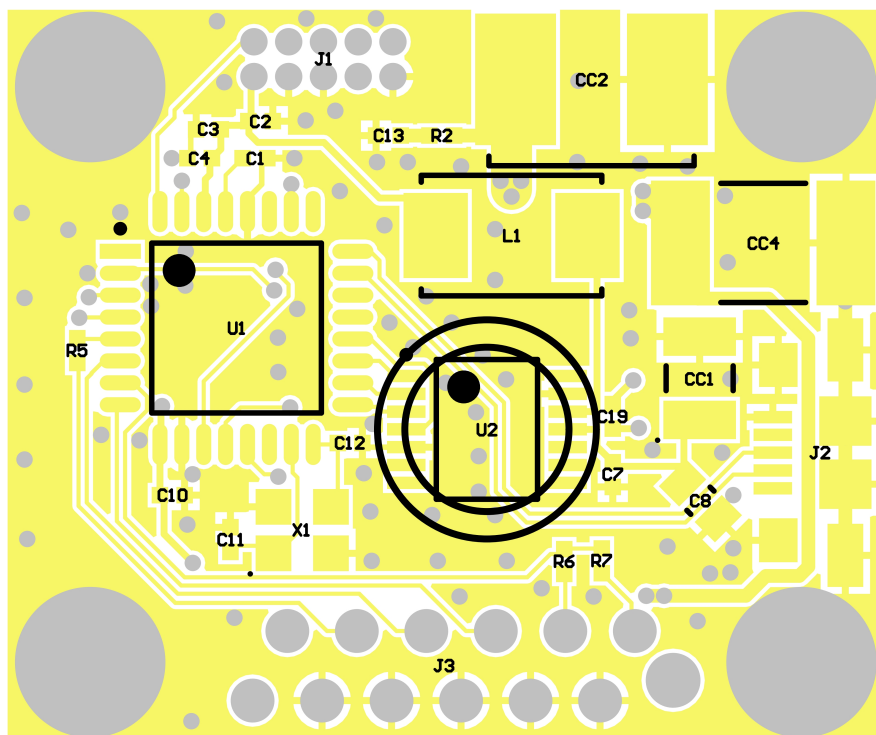
Plošný spoj centrální jednotky má veškeré součástky v jedné vrstvě. Zde bylo nutné teplotně přizpůsobit stabilizátor na 12 V. Proto jsou zde vytvořeny velké plochy mědi umožňující odvedení přebytečného tepla od tohoto stabilizátoru.

U plošného spoje kontroléru jsou součástky umístěny do obou vrstev. Bylo třeba dbát zejména na dostatečnou šířku spojů vedoucích velké proudy do motoru. Enkodér byl umístěn na vhodné místo tak, aby bylo možné k němu přivést hlavu motoru opatřenou diametrálně magnetizovaným magnetem. Na plošném spoji jsou montážní otvory pro připevnění plošného spoje k motoru.

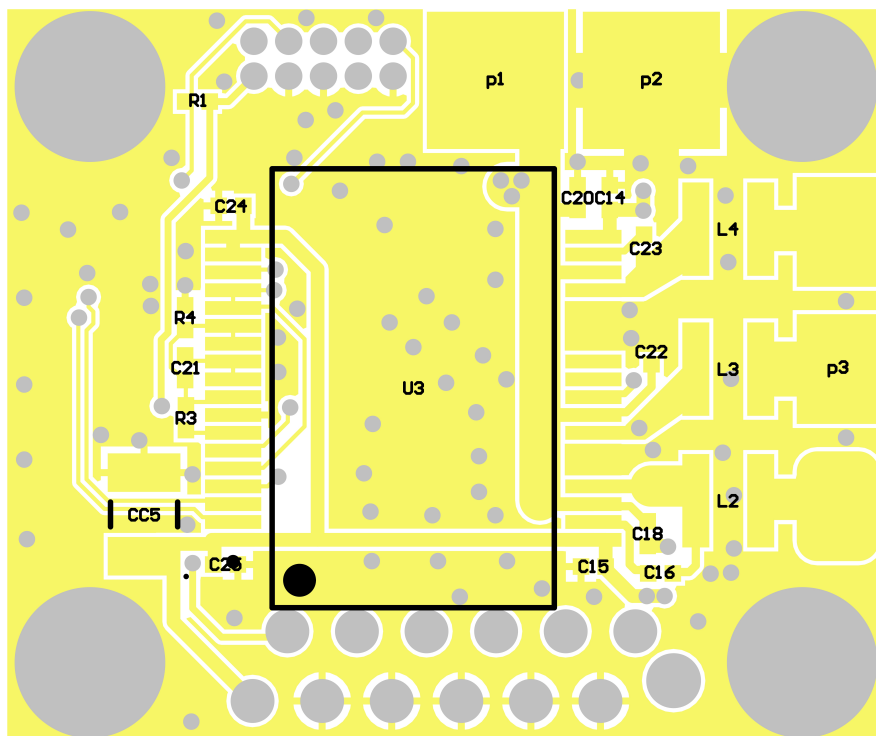
Plošné spoje jsou vyrobeny z mědi tloušťky 1 oz ve dvou vrstvách a byly osazeny pomocí přetavení měkké pájky. Osazené plošné spoje jsou na obrázcích 4.10 a 4.11.



**Obrázek 4.7:** Osazovací plán vrchní vrstvy plošného spoje centrální desky

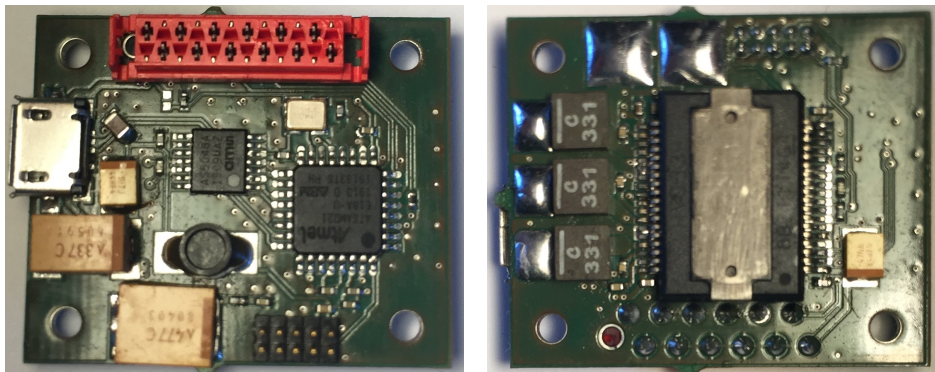


Obrázek 4.8: Osazovací plán vrchní vrstvy plošného spoje kontroléru



Obrázek 4.9: Osazovací plán spodní vrstvy plošného spoje kontroléru

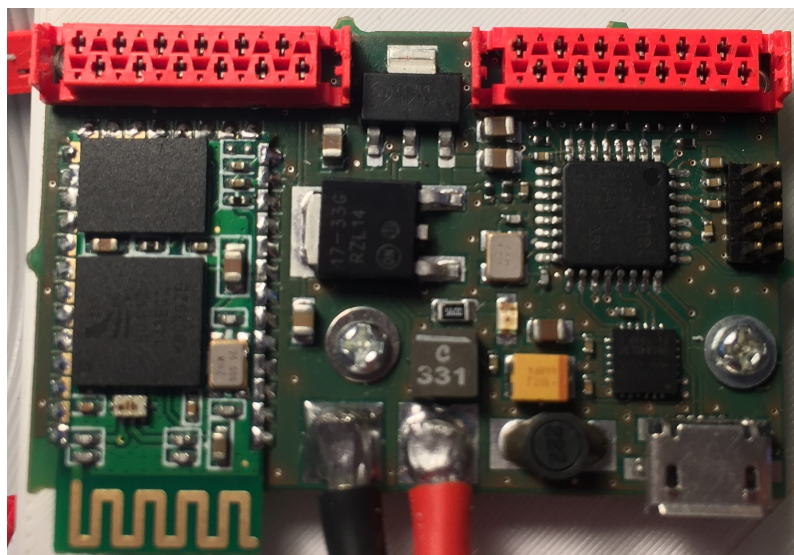




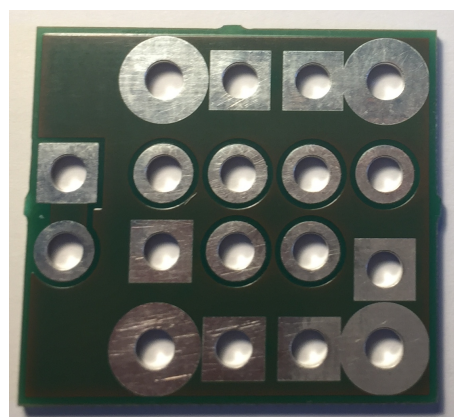
(a) : Fotografie osazené horní vrstvy kontroléru

(b) : Fotografie osazené spodní vrstvy kontroléru

**Obrázek 4.10:** Fotografie osazeného kontroléru motoru



**Obrázek 4.11:** Fotografie osazené centrální jednotky



**Obrázek 4.12:** Fotografie rozvodné desky

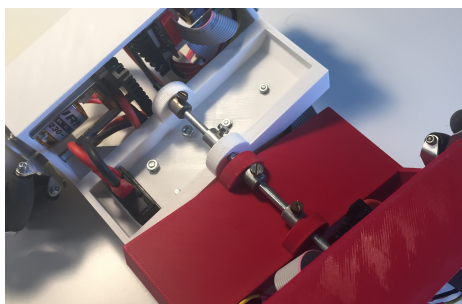


## Kapitola 5

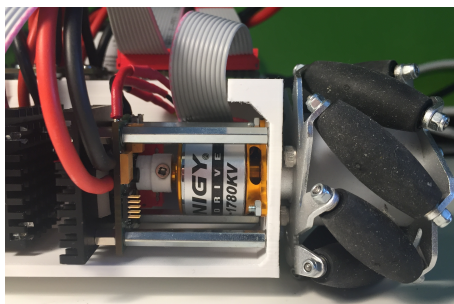
### Návrh a realizace mechanické části

Mechanická část vozítka je tvořena rámem, ke kterému jsou v rozích připevněny jednotlivá kola se svými motory a jejich kontroléry. Součástí rámu je také prostor pro centrální jednotku, rozvodnou desku, baterii a vypínač. Kromě spojovacího materiálu jsou veškeré díly navrženy v prostředí Solidworks a vytvořeny pomocí 3D tisku.

Rám je tvořen ze dvou nezávislých částí spojených pomocí osy tak, jak je patrné z obrázku 5.1a. Toto uspořádání umožňuje vzájemný rotační pohyb obou částí a díky tomu je zajištěno, že i na nedokonale rovné podložce budou mít všechna kola kontakt s podložkou. Pozice kol na rámu je taková, že pro parametr  $W + H$ , vyskytující se v rovnicích (3.1), (3.2), (3.3) a (3.4), platí  $W + H = 15$  cm. Poloměr kol, vyskytující se ve stejných rovnicích, je  $R = 3$  cm. Kompozice celého vozítka (umístění kol a jednotlivých částí elektroniky) je částečně patrná z obrázku 5.2. Z této fotografie je také patrná orientace jednotlivých kol odpovídající zvolené struktuře vozítka popsané v sekci 3.3.



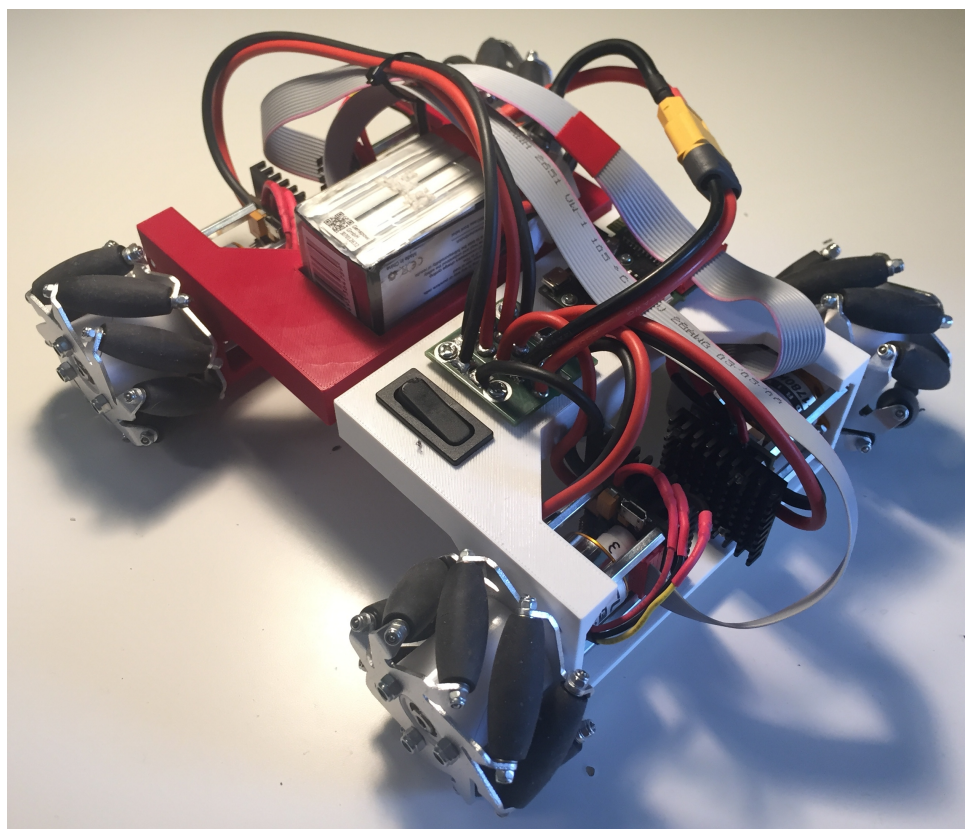
(a) : Fotografie spodní části rámu



(b) : Fotografie pohonu jednoho kola

**Obrázek 5.1:** Detailnější fotografie rámu vozítka

Stavba pohonu kola je patrná z obrázku 5.1b. K rámu je připevněn motor přímo pohánějící všesměrové kolo. Z druhé strany je pomocí distančních sloupků připevněn plošný spoj kontroléru tak, aby se magnetický enkodér nacházel nad hlavou rotoru. K ní je pomocí dalšího dílu připevněn diametrálně magnetizovaný magnet sloužící k určení pozice rotoru. Součástí konstrukce je i chladič řídicího obvodu motoru.



**Obrázek 5.2:** Fotografie celého vozítka

Kvůli konstrukci použitých všesměrových kol (obrázek 3.1a) je vozítko určeno zejména pro pohyb po relativně rovné podložce. Při jízdě v terénu by se kolečko svým okrajem často dotýkalo podložky a nebylo by všesměrové. Protože rychlost bezkomutátorového motoru je omezena do velikosti  $12\pi \text{ rad s}^{-1}$  a poloměr kolečka je 3 cm, může být výsledná rychlost vozítka maximálně zhruba  $1,13 \text{ m s}^{-1}$ .

## Kapitola 6

### Realizace programové části

Programové vybavení vozítka je tvořeno řídicím algoritmem otáček bezkomutátorového motoru a řídicím algoritmem vozítka. Oba tyto algoritmy byly implementovány v jazyce C v prostředí Atmel Studio a jsou nahrány v mikrokontrolérech kontrolérů a centrální jednotky.

Na straně uživatele je ovládání tvořeno joystickem připojeným k počítači. Zpracování dat z joysticku, komunikace s vozítkem a jednoduché uživatelské rozhraní je naprogramováno v prostředí Matlab.

#### 6.1 Řídicí algoritmus vozítka

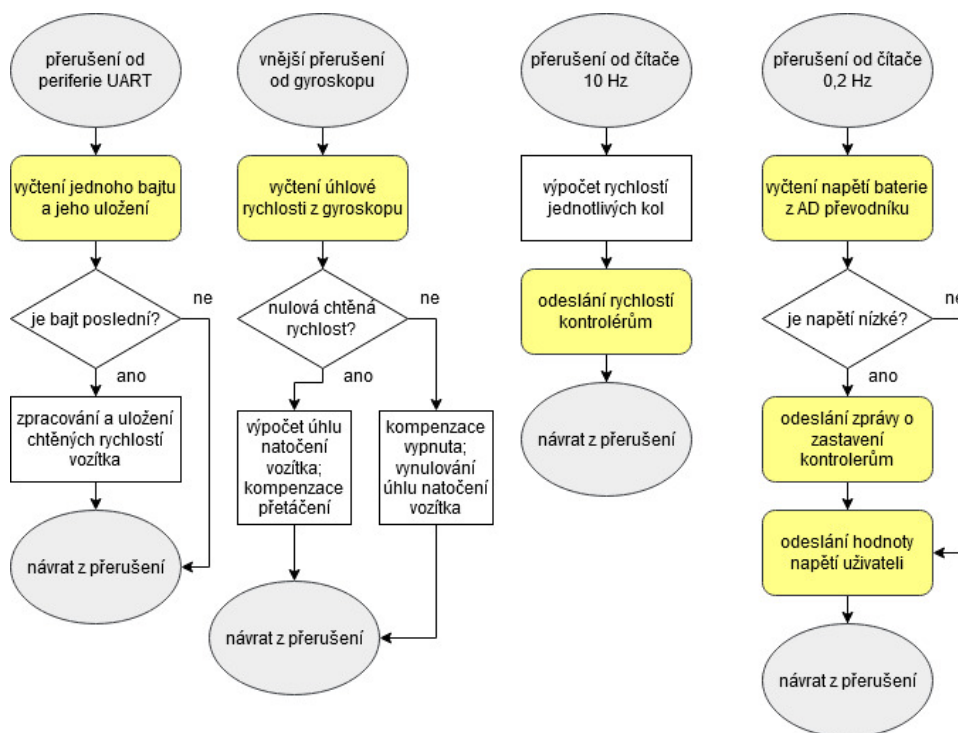
Řídicí algoritmus vozítka zajišťuje jeho rychlost, jak je popsáno v sekci 3.3. Po inicializační části je jeho úkolem příjem požadovaných rychlostí vozítka  $\dot{q}$  od uživatele, zpracování dat z gyroskopu, provedení kompenzace přetáčení vozítka, vypočítání rychlostí jednotlivých koleček  $\dot{\varphi}$  a jejich předání jednotlivým kontrolérům. Dále snímá napětí baterie, které odesílá uživateli a v případě nízkého napětí zabrání vozítku v pohybu.

Po zapnutí vozítka je vykonána inicializační část řídicího algoritmu, kdy jsou nastaveny hodinové signály, použité periferie, gyroskop a Bluetooth modem. Mezi použité periferie patří dva čítače, AD převodník, dva bloky pro sběrnici SPI a blok pro sběrnici UART. Hlavní část algoritmu se nachází v podprogramech, které jsou volány jako obsluhy přerušení přicházejících od periférií, jak je patrné z obrázku 6.1 (žlutě je vyznačena práce s perifériemi). V rámci těchto periférií bude celý algoritmus stručně popsán.

Periferie pro sběrnici UART je použita pro komunikaci s Bluetooth modelem a je nastavena na rychlost 115200 Bd. Přerušení je vytvořeno při příjmu jednoho bajtu. Přijatá data jsou dočasně ukládána, a jakmile dojde k obdržení posledního bajtu, jsou z dat složeny hodnoty požadovaných rychlostí vozítka  $\dot{X}$ ,  $\dot{Y}$  a  $\dot{\theta}$ .

Gyroskop je k procesoru připojen pomocí jedné z periférií pro SPI sběrnici, jejíž rychlost je nastavena na 10 MHz. Gyroskop je nastaven do režimu, kdy

ve frekvenci 1 kHz provádí nová měření a pomocí dedikovaného signálu po doměření vytvoří vnější systémové přerušování. Spuštěná obsluha přerušování pomocí SPI sběrnice vyčte z gyroskopu aktuální hodnotu úhlové rychlosti vozítka a následně vypočítá kompenzaci přetáčení vozítka.



**Obrázek 6.1:** Diagram hlavní části řídicího algoritmu vozítka

K určení kompenzace přetáčení je nutné znát úhel natočení vozítka  $\theta$ . Ten je získáván integrací naměřené úhlové rychlosti. Integrace je nahrazena sumací změřených úhlových rychlostí vydělených vzorkovací frekvencí 1 kHz. Protože je měřená úhlová rychlost zatížena ofsetem gyroskopu, je úhel natočení vozítka kvůli sumaci zatížen stále rostoucí chybou. Za účelem minimalizace této chyby byl ofset s určitou nepřesností změřen a od naměřených hodnot je vždy odečítán.

Kompenzace probíhá tak, jak je popsána v sekci 3.4. Pokud je požadovaná rychlost  $\dot{\theta}$  nulová, je její hodnota určena z rovnice (3.5). Pro  $\dot{\theta} \neq 0$  se hodnota  $\dot{\theta}$  nemění (směr natočení vozítka ovládá přímo uživatel), je ale nulována proměnná nesoucí hodnotu  $\theta$ .

Rychlosti  $\dot{X}$ ,  $\dot{Y}$  a  $\dot{\theta}$  jsou pomocí rovnic (3.1), (3.2), (3.3) a (3.4) pravidelně přepočítávány na rychlosti jednotlivých kol  $\dot{\varphi}_i$ , které jsou rovnou odesílány patřičným kontrolérům. Tuto pravidelnost zajišťuje jeden z použitých čítačů generující ve frekvenci 10 Hz přerušování. Hodnoty  $\dot{\varphi}_i$  jsou škálovány a případně omezeny tak, aby vyplnily použité rozsahy proměnných a nedocházelo k přetékání.

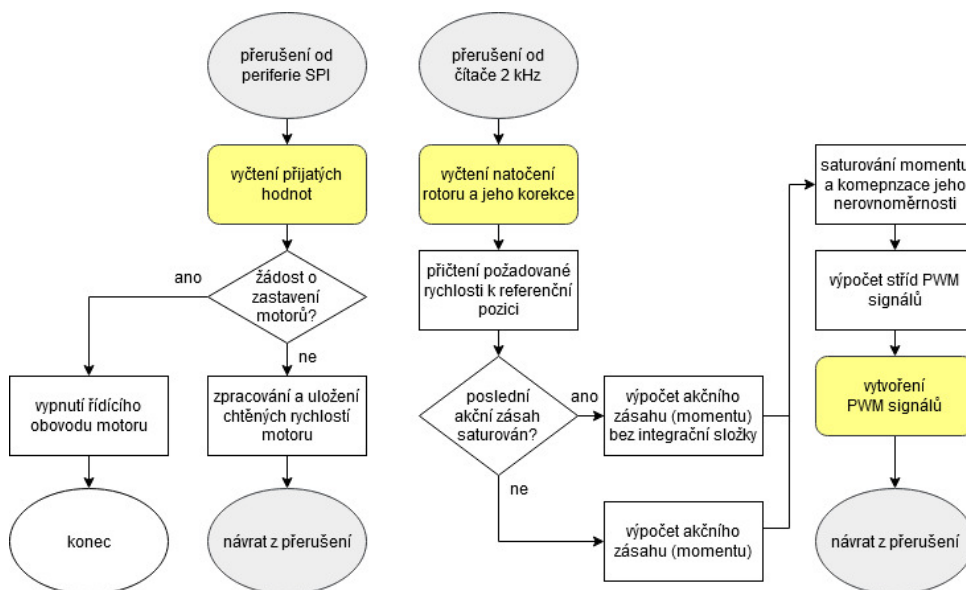
K odesílání hodnot  $\dot{\varphi}_i$  je využita periferie spravující hlavní SPI sběrnici.

Rychlost jejích hodin je 10 MHz a hodnota  $\phi_i$  je odeslána ve dvou bajtech. Kterému kontroléru je hodnota  $\phi_i$  určena, je rozlišeno pomocí signálu Chip Select.

Druhý z čítačů je nastaven na vytváření přerušování s periodou 5 s. To spustí obsluhu přerušování měřící pomocí AD převodníku (nastaven na přesnost 12 bitů) napětí na baterii. Toto napětí je pomocí bloku UART a následně Bluetooth modemu ve dvou bajtech odesíláno uživateli. Pokud napětí baterie klesne pod hodnotu 13,2 V (představující doporučené minimální napětí pro čtyřčlávkovou Li-Po baterii), odesílá řídicí algoritmus zprávu kontrolérům, aby vypnuli řídicí obvod motoru a tím zabránili dalšímu vybíjení baterie.

## 6.2 Řídicí algoritmus otáček bezkomutátorového motoru

Řídicí algoritmus motoru reguluje jeho rychlost. Jeho součástí je implementace vektorového řízení popsaného v sekci 2.2, které obnáší komunikaci se senzorem polohy rotoru, výpočet akčního zásahu a generování PWM signálů pro řídicí obvod motoru. Dále tento algoritmus zajišťuje příjem žádaných rychlostí od centrální jednotky a případné znemožnění chodu motorů při zprávě o nízkém stavu baterie.



Obrázek 6.2: Diagram hlavní části řídicího algoritmu kontroléru

Po zapnutí vozítka je vykonána inicializační část algoritmu, kdy jsou nastaveny hodinové signály a použité periferie (dva čítače a dvě periferie pro obsluhu SPI sběrnice). Jeden z čítačů je nastaven na produkování 3 signálů PWM o frekvenci 20 kHz. Druhý generuje ve frekvenci 2 kHz přerušování, v jehož obsluze je implementována řídicí smyčka. Jedna z periférií pro obsluhu SPI

sběrnice je nastavena jako zařízení slave přijímající zprávy od centrální jednotky. Při příjmu dat vyprodukuje přerušení, jehož obsluha přijatá data vyčte a zpracuje. Druhá z SPI periférií s hodinami 10 MHz slouží ke komunikaci s magnetickým enkodérem. V rámci inicializační části je ještě přečten úhel natočení kola a je uložen jako referenční  $\theta_{ref}$ .

Hlavní část algoritmu se nachází v podprogramech, které jsou volány jako obsluhy přerušení přicházejících od periférií, jak je patrné z obrázku 6.2 (žlutě je vyznačena práce s perifériemi).

Požadovaná rychlost kolečka je získávána od centrální jednotky pomocí hlavní SPI sběrnice ve dvou bajtech. Přijatá hodnota neodpovídá rychlosti motoru v typických fyzikálních jednotkách a je třeba ji škálovat. Vektorové řízení je v případě vozítka navrženo pro rychlosti motoru v rozmezí  $-12\pi$  rad s<sup>-1</sup> až  $12\pi$  rad s<sup>-1</sup>. Konstanta škálování je taková, aby maximální možná požadovaná rychlost odpovídala mezní hodnotě tohoto rozsahu.

Pokud kontrolér obdrží definovanou zprávu značící nízké napětí baterie, vypne řídicí obvod motoru a ukončí svou činnost, čímž sníží odběr elektrické energie na minimum.

Řídicí smyčka, v níž je vektorové řízení implementováno, je volána s frekvencí 2 kHz. Zajišťuje čtení úhlu natočení rotoru, zavedení rampy referenčního pozice rotoru podle požadované rychlosti, výpočet akčního zásahu (momentu rotoru) PID regulátorem s antiwindup filtrací a aplikování tohoto momentu na motor.

Ke čtení úhlu rotoru  $\theta$  je využíván magnetický enkodér. Ten poskytuje hodnotu úhlu zatíženou konstantním ofsetem odpovídajícím natočení diametrálně polarizovaného magnetu na hlavě rotoru. Tento ofset je pro každý motor s magnetem zvlášť změřen, je uložen v příslušném mikrokontroléru a při každém měření je od hodnoty získané enkodérem odečítán.

Následně regulační smyčka přičte k proměnné obsahující referenční úhel naškálovanou hodnotu požadované rychlosti, čímž je zavedena rampa hodnoty  $\theta_{ref}$ . Hodnota proměnné  $\theta_{ref}$  je pomocí funkce modulo ohraničena na interval odpovídající  $[0; 2\pi]$  rad. Chyba regulace  $e$  je určena jako  $e = \theta_{ref} - \theta$ . Hodnota  $e$  je s každým vykonáním řídicí smyčky sčítána, čímž je po vydělení vzorkovací frekvencí (2 kHz) dosaženo její diskrétní integrace.

Akční zásah je vypočten dle rovnice (2.6), jejíž součástí je i antiwindup filtrace a filtrování diference. Hodnoty  $K_p$ ,  $K_i$  a  $K_d$  jsou pevně dané a jejich naladění je ukázáno v sekci 7.1.

Vzniklý akční zásah je saturován na vhodnou hodnotu a následně je k němu přičtena hodnota  $M(\theta)$  odpovídající kompenzaci nerovnoměrnosti momentu pro úhel  $\theta$ , jak je popsáno v sekci 2.3. Tyto hodnoty jsou pro jednotlivé úhly uloženy v paměti FLASH mikrokontroléru.

Střídý PWM signálů jsou vypočteny z rovnic (2.3), (2.4) a (2.5), kde  $v_s$  odpovídá vypočtenému akčnímu zásahu a hodnota odpovídající  $\theta_r$  je vypočtena jako šestnásobek (motor má 6 pólů) změřeného úhlu rotoru.



Pro zkrácení doby vykonání řídicí smyčky byla funkce `sin` nahrazena tabulkou hodnot uložených v paměti FLASH mikrokontroléru.

## 6.3 Ovládání vozítka a komunikace s ním

Uživatel ovládá vozítka pomocí joysticku připojeném k počítači. Ten pomocí standartu Bluetooth odesílá centrální jednotce vozítka požadované rychlosti  $\dot{q}$ . Od centrální jednotky dostává uživatel informaci o napětí baterie. Uživatelské prostředí, zpracování dat z joysticku a práce se standartem Bluetooth jsou v počítači realizovány v programu Matlab.

Joystick je v Matlabu připojen pomocí příkazu `vrjoystick` a data z něj jsou získávána pomocí funkce `axis`. Použitý joystick je tříosý. Posunem páky vpřed a vzad je volena rychlost vozítka  $Y$ , posun vlevo a vpravo určuje rychlost  $X$  a rotace pákou rychlost  $\theta$ . Směr těchto pohybů je intuitivně shodný se směry jednotlivých rychlostí (obrázek 3.3) přičemž jejich orientace je vždy pevně svázána s orientací vozítka.

Data jsou z joysticku pravidelně čtena s frekvencí 10 Hz. Pozice páky je v každé ose vyjádřena číslem v intervalu  $[-1; 1]$ . To je následně vhodnou konstantou přeškálováno na 16 bitové číslo. Výsledná 3 čísla jsou po jednotlivých bajtech sériově odeslána centrální jednotce vozítka.

Bluetooth komunikace je v Matlabu spravována pomocí Instrument Control Toolboxu. Komunikace se spárovaným zařízením probíhá přes sériový port pomocí funkcí `fread` a `fwrite`. Sériový port je nakonfigurován tak, aby při přijmutí dvou bajtů dat zavolal funkci, která dva přijaté bajty zpracuje, vypočítá z nich napětí baterie a to zobrazí uživateli.

Součástí programu je jednoduché grafické uživatelské prostředí. To pouze uživateli zobrazuje hodnotu napětí baterie a při jejím poklesu pod 13,2 V informuje uživatele o nutnosti okamžitého vypnutí vozítka a dobití baterie.



# Kapitola 7

## Naladění regulátorů a ověření výsledků

V této kapitole je ukázáno naladění regulátorů popsaných v sekcích 2.2.4 a 3.4. Výsledky ladění jsou demonstrovány grafy průběhů patřičných veličin. Také je ověřen způsob řízení rychlosti motoru popsaný v sekci 2.2.5.

### 7.1 Ladění regulátoru pozice rotoru

Pro regulování pozice motoru byl použit PSD regulátor popsaný v sekci 2.2.4 a vyjádřený rovnicí (2.6). Hodnota  $T_s$  představující periodu řídicí smyčky je dána možnostmi mikrokontroléru, na němž je řídicí algoritmus implementován, a byla stanovena

$$T_s = \frac{1}{2000} \text{ s.}$$

Konstanty filtru diference byly pro začátek zvoleny jako  $a = 0,8$  a  $b = 0,2$ . Pro naladění parametrů  $K_p$ ,  $K_i$  a  $K_d$  byla použita Ziegler-Nicholsova metoda, popsaná v [14].

Její výsledkem byly hodnoty

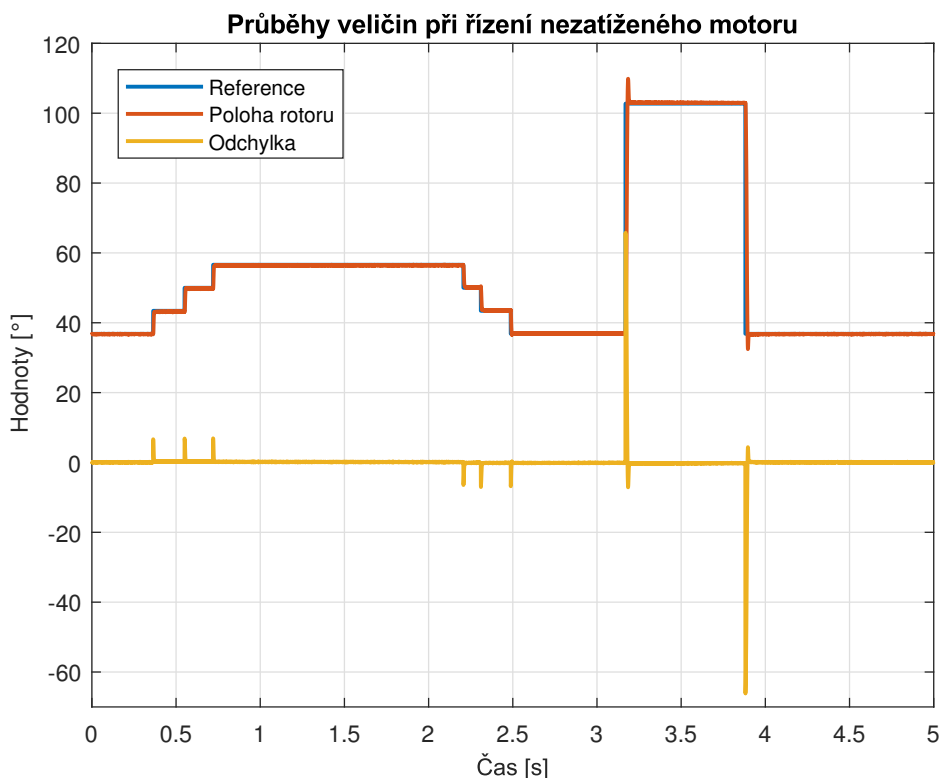
$$\begin{aligned} K_p &= 16 \cdot 10^{-4}, \\ K_d &= 0,13 \cdot 10^{-4}, \\ K_i &= 460 \cdot 10^{-4}. \end{aligned}$$

Hodnota  $K_i$  se okamžitě ukázala být jako příliš vysoká a postupným laděním byla snížena na  $K_i = 60 \cdot 10^{-4}$ , při které pozice rotoru při skoku reference nekmitala a zároveň chyba regulace  $e$  nabyla poměrně rychle nulové hodnoty.

Takto nastavený regulátor měl velmi dobrou dynamiku, ale složka  $K_d$  i přes filtraci diference příliš zesilovala šum dat z enkodéru, v důsledku čehož byl i akční zásah zašuměný. To způsobovalo mírné a rychlé chvění motoru. Bylo experimentováno s jinými konstantami použitého filtru diference a FIR filtrem vyššího řádu, ale bezvýsledně.

Dále bylo ověřeno, zda chvění motoru nevzniká v důsledku rezonance mechanické části regulátoru nebo motoru a není tak zpětnou vazbou od senzoru

polohy rotoru zesilováno. Proto byla naměřena frekvenční charakteristika motoru (s otevřenou smyčkou zpětné vazby). Rezonanční frekvence byla na základě této charakteristiky určena jako 22,7 Hz. Při této frekvenci docházelo ke zdvojnásobení amplitudy vstupního signálu. Dále byl vytvořen IIR filtr 2. řádu typu pásmová zádrž zeslabující pásmo kolem rezonanční frekvence. Tímto filtrem byla data ze senzoru polohy rotoru filtrována. Ačkoli byl filtr úspěšně implementován a otestován v prostředí Matlab, popsany problém uspokojivě nevyřešil. Z toho bylo usouzeno, že rezonance mechanické části chvění motoru a následný šum enkodéru nezpůsobuje.



**Obrázek 7.1:** Chování regulátoru nezatíženého motoru při skocích referenční pozice

Bylo rozhodnuto vrátit se při filtrování diference k původnímu FIR filtru diference s koeficienty  $a = 0,8$  a  $b = 0,2$  a zmenšit derivační složku regulátoru. Byla naladěna kompromisně tak, aby nedoházelo k přílišnému zesilování šumu senzoru polohy rotoru a zároveň výsledná regulace dosahovala dostatečné dynamiky. Společně s tím byla ještě mírně zvýšena proporcionální konstanta. Výsledkem jsou hodnoty

$$\begin{aligned} K_p &= 18 \cdot 10^{-4}, \\ K_d &= 0,06 \cdot 10^{-4}, \\ K_i &= 60 \cdot 10^{-4}. \end{aligned}$$

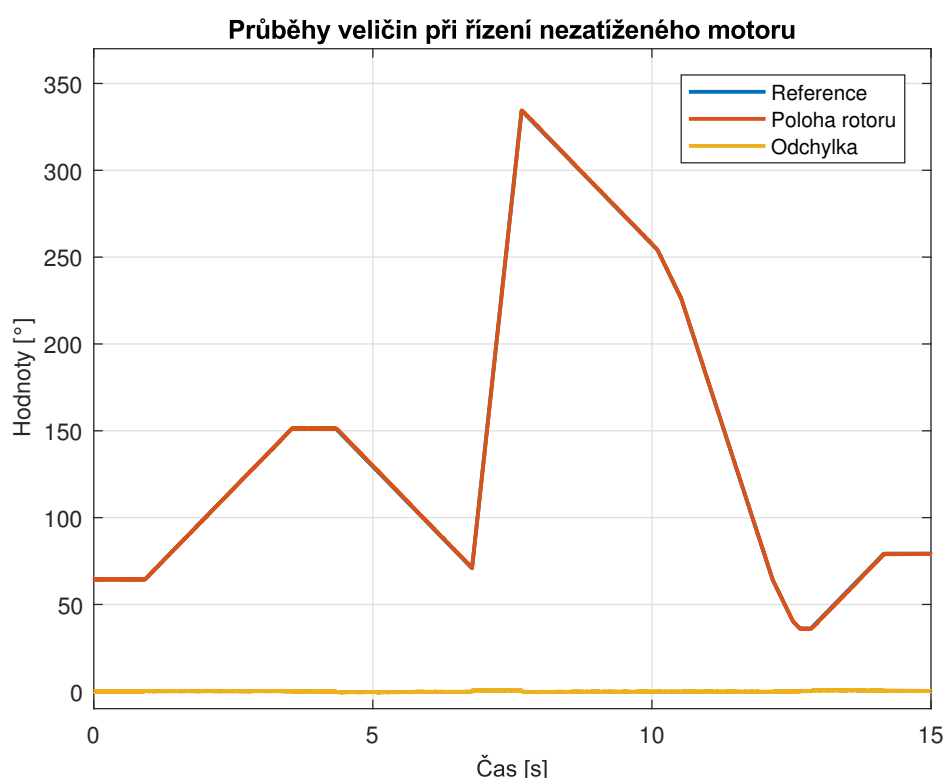
Ladění regulátoru probíhalo při pohybu vozítka, aby zatížení motoru věrně odpovídalo cílovému použití.

Chování regulátoru pro nezatížený motor je ukázáno v obrázku 7.1. Je zde provedeno několik skokových změn referenční pozice rotoru a následně jsou sledovány průběhy patřičných veličin. Rychlost regulace je plně postačující. Při velkých skokových změnách pozice rotoru překmitává. Děje se tak zejména kvůli snížení derivační složky regulátoru. Vzhledem k tomu, že regulátor polohy motoru je využit pro řízení rychlosti a referencí polohy bude rampa s omezenou směrnicí, nebyla tato vlastnost považována za problematickou.

Ačkoli bylo vlivem šumu senzorů nutné snížit derivační složku PID regulátoru a tím mírně snížit kvalitu regulace, dosahuje naladěný regulátor pozice rotoru vlastností plně dostačujících cílovému určení.

## 7.2 Ověření vlastností regulace rychlosti rotoru

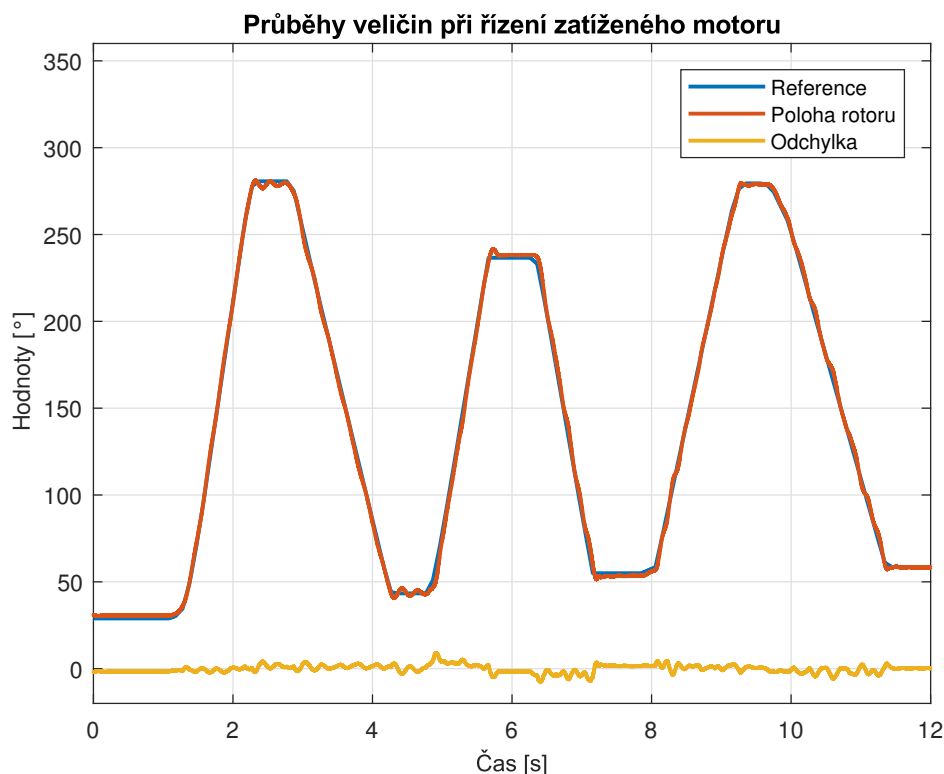
Způsob regulace rychlosti rotoru popsany v sekci 2.2.5 používá již naladěný a ověřený regulátor pozice rotoru. Je ale třeba ověřit, zda tento způsob regulace bude pro cílové použití vykazovat požadované vlastnosti. Těmi je přesné řízení rychlosti motoru do hodnot v rozmezí  $-12 \pi \text{ rad s}^{-1}$  až  $12 \pi \text{ rad s}^{-1}$  a zajištění hladkého chodu rotoru. Protože odchylka pozice rotoru od reference nebude při tomto způsobu regulace ani v ustáleném stavu obecně nulová, je také třeba ověřit, zda nenabývá příliš vysokých hodnot.



**Obrázek 7.2:** Chování regulátoru nezatíženého motoru při různých rampách referenční pozice

V grafu na obrázku 7.2 jsou zachyceny patřičné veličiny při regulování rychlosti nezátíženého motoru. Skutečná pozice motoru prakticky kopíruje referenční pozici. Chyba regulace dosahuje při skokových změnách referenční rychlosti velikosti do  $5^\circ$  a velmi rychle se ustálí na zanedbatelnou hodnotu. Na grafu v obrázku 7.2 (konkrétně na hladkosti naměřených hodnot) lze také demonstrovat úspěšnost kompenzování nerovnoměrnosti momentu, čímž byl hladký chod rotoru v dostatečné míře zajištěn.

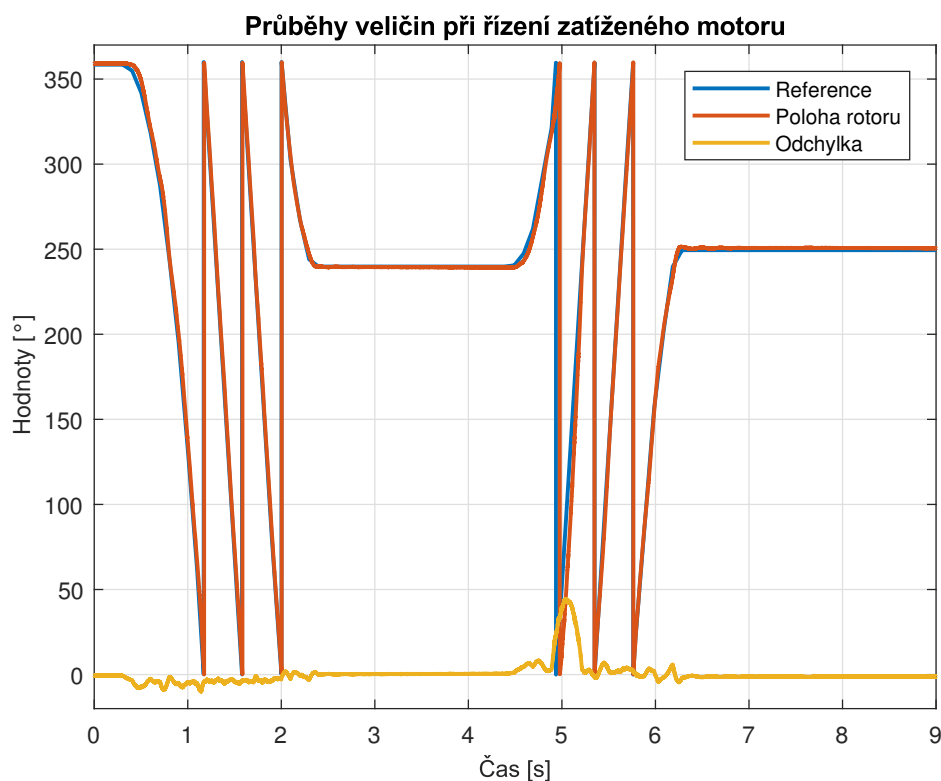
Zajímavější je sledovat chování regulátoru rychlosti při pohánění výsledného vozítka. V grafu na obrázku 7.3 jsou vykresleny patřičné veličiny jednoho z regulátorů při různých pohybech vozítka. Vozítko se pohybuje „tam a zpět“ nejprve ve směru souřadnice Y („dopředu“), poté ve směru souřadnice X („do strany“) a nakonec se otáčí kolem svého středu. Z grafu je patrné, že při náhlém přerušení pohybu ve směru osy Y (v čase přibližně 2 s a 4 s) měřené kolečko vlivem setrvačnosti vozítka trochu zakmitá. Ostatní pohyby jsou bezproblémové. Velikost chyby regulace se stále drží v hodnotách pod  $15^\circ$ . Její kmitání způsobuje zejména stavba všesměrového kola mecanum, které kvůli rozložení svých válečků a mezer mezi nimi při otáčení nevykazuje konstantní valivý odpor jako klasické kolo.



**Obrázek 7.3:** Chování regulace rychlosti jednoho z kol při pohybu výsledného vozítka ve všech směrech

V grafu na obrázku 7.4 je ukázáno chování regulátoru při pohybu v jednom směru, ale ve vyšších rychlostech. Zajímavý moment nastal v čase přibližně 5 s. Kolečko se na chvíli „zaseklo“ a významně rostla chyba regulace. I přesto

dokázal regulátor tuto chybu poměrně rychle a bez velkého překmitu ustálit zpět na velmi malou hodnotu.



**Obrázek 7.4:** Chování regulace rychlosti jednoho z kol při pohybu výsledného vozítka v jednom směru větší rychlostí

Z uvedených grafů je patrné, že tento způsob regulace rychlosti rotoru je pro účely všesměrového vozítka plně postačující. Pozice (a tím i rychlost) rotoru se velmi dobře drží referenční hodnoty. Kompenzace nerovnoměrnosti momentu přispívá k dostatečně hladkému chodu a odchylku rotoru od referenční pozice se daří držet ve velmi malých hodnotách, které nepůsobí problémy.

## 7.3 Naladění a ověření kompenzace přetáčení vozítka

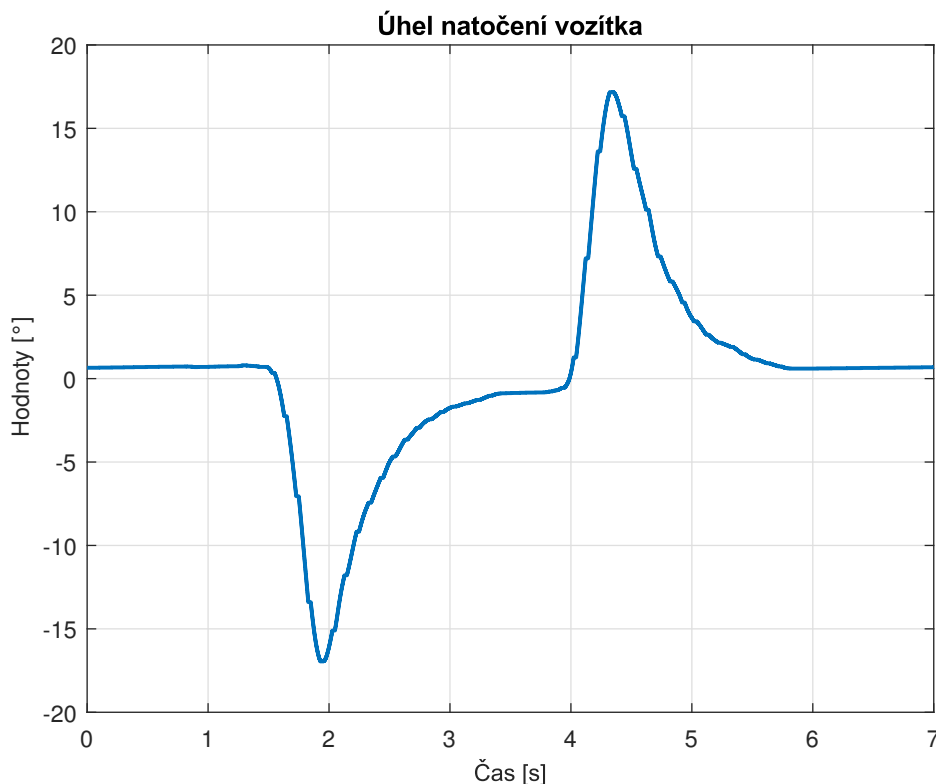
Pro kompenzaci přetáčení vozítka (popsáno v sekci 3.4) byl navržen proporcionální regulátor.

Při testování vozítka bez kompenzace přetáčení bylo zjištěno, že k přetáčení během pohybu dochází v malé míře a regulátor musí zasahovat pouze minimálně. Při volbě konstanty  $K_p$  proporcionálního regulátoru v určitém rozumném pásmu nebyla vlastnost této kompenzace hodnotou  $K_p$  výrazně ovlivněna. Bylo zvoleno

$$K_p = 64,$$

aby bylo možné výpočet akčního zásahu realizovat pouhým bitovým posunem.

Chování výsledné kompenzace je ukázáno na obrázku 7.5. V čase přibližně 1,5 s bylo vozítko zvednuto ze země, otočeno o přibližně  $17^\circ$  a v čase 2 s bylo položeno zpátky na zem. Vykreslen je vývoj úhlu natočení vozítka a v čase 4 s je celý experiment proveden znovu, pouze s natočením na druhou stranu.



**Obrázek 7.5:** Vývoj natočení vozítka při jeho umělém vychylování

Měřené úhly jsou získávány integrací dat z gyroskopu, jak je popsáno v sekci 6.1. Vlivem offsetu dat z gyroskopu, který je teplotně závislý a nejde proto plně kompenzovat, je skutečný úhel natočení vozítka trochu jiný a v průběhu času se stále mírně zvětšuje. To způsobuje stále a velmi pomalé otáčení vozítka kopírující právě tento chybně určený úhel.

Bylo vysledováno, že čím blíže se těžiště vozítka nachází jeho středu, tím méně se vozítko během pohybu přetáčí. Od určité vzdálenosti těžiště a středu vozítka je lepší přetáčení nekompensovat, neboť tím vznikne menší chyba natočení vozítka, než v případě popsané kompenzace založené na ne zcela přesně určeném úhlu natočení pomocí gyroskopu.

Pokud je kompenzace použita, je během pohybu do všech stran zajištěno udržování stálého směru natočení vozítka. Odchylka od tohoto směru měřeného gyroskopem dosahuje velikostí menších, než  $2^\circ$ . Reálná odchylka ale vlivem integrace offsetu dat z gyroskopu v čase stále pomalu roste.



## Kapitola 8

### Závěr

Cílem práce bylo vytvořit vozítka s všesměrovým pohybem a bezkomutátorovými motory. Součástí práce byl návrh a realizace elektroniky pro senzorové vektorové řízení bezkomutátorových motorů, implementace tohoto řízení a využití vzniklých regulátorů při stavbě výsledného vozítka. Cílem bylo také navrhnout a realizovat centrální řídicí jednotku vozítka s modulem pro bezdrátovou komunikaci s PC a pomocí PC implementovat dálkové ovládání zrealizovaného vozítka. Tyto cíle se podařilo úspěšně splnit.

V práci je nejprve teoreticky popsáno vektorové řízení bezkomutátorového motoru včetně regulace pozice a rychlosti rotoru. Vektorové řízení, a s ním i výslednou elektroniku, se podařilo pro potřeby této práce zjednodušit. Součástí teoretické části je i rozbor funkce všesměrového kola mecanum a kinematiky celého vozítka se 4 těmito koly. Popsán je také princip kompenzace přetáčení vozítka vznikající při pohybu.

Následně byla navržena elektronika, na níž jsou jednotlivé řídicí algoritmy implementovány. Návrh elektroniky obsahuje její rozdělení do jednotlivých bloků, popis jejich funkcí, výběr součástek a sestavení elektrických schémat patřičných bloků. V práci jsou také ukázány osazovací plány navržených plošných spojů, na nichž je elektronika realizována. Za účelem ověření funkčnosti nastíněných teoretických řešení byla také navržena a stručně popsána prototypová elektronika.

Součástí práce je návrh mechanické části vozítka realizované pomocí 3D tisku. Rám vozítka je ze dvou vzájemně pohyblivých částí, což umožňuje kontakt všech kol vozítka i se zakřivenou podložkou. Kvůli konstrukci všesměrových kol a vlastnostem zjednodušeného vektorového řízení je vozítka určeno pro pohyb omezenou rychlostí v prostorech s relativně hladkým povrchem.

Programová část zahrnuje implementace řídicího algoritmu otáček bezkomutátorového motoru, řídicího algoritmu vozítka a bezdrátové komunikace s uživatelem. Tyto algoritmy jsou nahrány v mikrokontrolérech příslušných bloků elektroniky. Popsány jsou využité periferie mikrokontrolérů, jejich nastavení a podrobněji pak jednotlivé funkce řídicích algoritmů. Dálkového ovládání bylo dosaženo pomocí joysticku připojeného k PC, na kterém byla implementována jeho obsluha a bezdrátová komunikace s vozítkem.

Závěrem práce je popsán způsob ladění jednotlivých regulátoru. Výsledky ladění jsou demonstrovány pomocí grafů průběhů jednotlivých regulovaných veličin při různých pohybech vozítka. Jsou zde také rozebrány některé vlastnosti vozítka, které se projevily až po jeho realizaci.

Výsledkem práce je vozítko schopné pohybu ve všech směrech včetně rotace. Vozítko je určeno pro pohyb v nenáročném terénu omezenou rychlostí. Tyto parametry ho ale v dalším využití příliš nelimitují. Díky vlastní realizaci elektroniky a všech algoritmů není problém vozítko dále rozšiřovat, což je velmi výhodné. Vznikla tak vlastně univerzální, modifikovatelná, všesměrová platforma připravená pro další aplikace. Tou může být například testování systému autonomního pohybu v neznámém prostředí. Protože je možné řídit nejenom rychlost, ale polohu jednotlivých koleček, je také možné například opatřit vozítko lokalizačním systémem a přesně řídit jeho pozici. Tyto (a mnoho dalších) aplikací vzniklého vozítka mohou být předmětem dalšího studia.



## Literatura

- [1] XIA, Chang-liang. *Permanent magnet brushless DC motor drives and controls*. 1. Hoboken, N.J.: Wiley-Science Press, 2012. ISBN 978-1-118-18833-0.
- [2] KRISHNAN, Ramu. *Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives*. 1. Boca Raton: Taylor and Francis Group, 2010. ISBN 978-0-8247-5384-9.
- [3] CHIASSON, John. *Modeling and High-Performance Control of Electric Machines*. 1. New Jersey: John Wiley, 2005. ISBN 0-47 1-68449-X.
- [4] KIRAN, Yadu. A Review of Brushless Motor Control Techniques. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering* [online]. 2014, **3**(8) [cit. 2020-02-19]. Dostupné z: [https://www.ijareeie.com/upload/2014/august/9\\_AReview.pdf](https://www.ijareeie.com/upload/2014/august/9_AReview.pdf)
- [5] HLINOVSKÝ, Vít. Elektronicky komutovaný motor [přednáška]. Praha: ČVUT FEL, 10. 3. 2020.
- [6] Direct-quadrature-zero transformation. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-02-08]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Direct-quadrature-zero\\_transformation](https://en.wikipedia.org/wiki/Direct-quadrature-zero_transformation)
- [7] LEPKA, Jaroslav a Pavel GRASBLUM. Použití mikroprocesorů pro řízení pohonů s BLDC motory: Učební texty ke kurzu. In: *Ústav automatizace a měřící techniky* [online]. Brno, 2011 [cit. 2020-02-20]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/12741705-Pouziti-mikroprocesoru-pro-rizeni-pohonu-s-blde-motory.html>
- [8] ŠEBEK, Michael. Automatické řízení, sledování a odmítnutí poruchy [přednáška]. Praha: ČVUT FEL, 12. 3. 2019.
- [9] ŠEBEK, Michael. Automatické řízení, regulátory (příklady k přednášce) [přednáška]. Praha: ČVUT FEL, 26. 3. 2019.

- [10] Mecanum wheel. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-02-04]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Mecanum\\_wheel](https://en.wikipedia.org/wiki/Mecanum_wheel)
- [11] DOROFTEI, Ioan a Victor GROSU. Omnidirectional Mobile Robot - Design and Implementation. *Bioinspiration and Robotics* [online]. 1. 2007, s. 520 [cit. 2020-02-05]. ISBN 978-3-902613-15-8.
- [12] LI, Yunwang, Sumei DAI a Lala ZHAO. Topological Design Methods for Mecanum Wheel Configurations of an Omnidirectional Mobile Robot. *Symmetry* [online]. 2019, **11**(10), 5-18 [cit. 2020-02-04]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2073-8994/11/10/1268>
- [13] TAHERI, Hamid, Bing QIAO a Nurallah GHAEMINEZHAD. Kinematic Model of a Four Mecanum Wheeled Mobile Robot. *International Journal of Computer Applications* [online]. 2015, , 6-8 [cit. 2020-02-04]. DOI: 10.5120/19804-1586.
- [14] KLÁN, Petr. Ziegler-Nicholsovo nastavení PID regulátoru — retrospektiva. *Automa* [online]. 2000, (4) [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: [https://automa.cz/cz/casopis-clanky/ziegler-nicholsovo-nastaveni-pid-regulatoru-retrospektiva-2000\\_04\\_27697\\_3105/](https://automa.cz/cz/casopis-clanky/ziegler-nicholsovo-nastaveni-pid-regulatoru-retrospektiva-2000_04_27697_3105/)