



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A  
BIOMECHANIKY**

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

**VÝROBA A IMPLEMENTACE ENKODÉROVÉ  
JEDNOTKY**

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF ENCODER UNIT

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Tomáš Kirchner**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Tomáš Spáčil**

**BRNO 2018**

# Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky  
Student: **Tomáš Kirchner**  
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství  
Studijní obor: Mechatronika  
Vedoucí práce: **Ing. Tomáš Spáčil**  
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Výroba a implementace enkodérové jednotky

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Během vývoje řídicího algoritmu robota s nestabilní sférickou základnou, který byl předmětem bakalářských prací předchozích let, bylo zjištěno, že enkodéry, kterými jsou motory osazeny, nemají dostatečné rozlišení. Pro přesné řízení dynamické soustavy je třeba adekvátně měřit její stavové proměnné, jako např. rychlost, což současné řešení neumožňuje. Vhodným řešením se jeví upgrade enkodérů.

### Cíle bakalářské práce:

- 1) Provedte rešerši a vyberte magnetický enkodér s výstupem I2C nebo SPI. K tomuto enkodéru vyberte vhodný magnet.
- 2) Navrhněte DPS pro vybraný enkodér tak, aby ji bylo možné umístit na šasi motoru. DPS osadíte a s magnetem umístíte na motor.
- 3) Implementace komunikačního protokolu pro vyčítání aktuální polohy v mikrokontroléru PIC.

### Seznam doporučené literatury:

VALÁŠEK, MICHAEL. Mechatronika. Dot. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1996. ISBN 80-01-01276-X.

ZÁHLAVA, VÍT. Návrh a konstrukce desek plošných spojů. Vyd. 1. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03351-1.

SKALICKÝ, JIŘÍ. Teorie řízení 1. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické, 2002. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-2112-6.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá implementací jednotky absolutního magnetického enkodéru jako senzoru natočení DC motoru na zařízení zvané ballbot v rámci projektu BB-8 v mechatronické laboratoři. Věnuje se principům a omezením technologie magnetických enkodérů, dále návrhu desky plošných spojů senzoru a skříně pro motor.

Součástí práce bylo testování funkčnosti enkodéru na Raspberry Pi a vytvoření SPI komunikace s řídicím mikrokontrolérem PIC, jehož výsledky jsou, mimo jiné, měření přesnosti snímání úhlu natočení při různých nepřesnostech uložení magnetu vůči enkodéru.

## **Summary**

The aim of the thesis is to implement an absolute magnetic encoder unit as a sensor measuring the angle of rotation of a DC engine on a ballbot, which is part of the BB-8 project at the mechatronic laboratory. It describes the principals and limitations of a magnetic encoder technology, also the design of printed circuit board for the sensor and the engine housing.

Testing functionality of the encoder at Raspberry Pi was part of the work as well as creating SPI communication with a master microcontroller PIC. Furthermore an accuracy of the angle of rotation sensing was measured for different inaccuracy of a magnet position to the sensor.

## **Klíčová slova**

Ballbot, Hallův jev, Hallova sonda, absolutní magnetický enkodér, SPI a I<sup>2</sup>C komunikace

## **Keywords**

Ballbot, Hall effect, Hall sensor, absolute magnetic encoder, SPI and I<sup>2</sup>C communication

## **Bibliografická citace**

KIRCHNER, T. *Výroba a implementace enkodérové jednotky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 41 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Tomáš Spáčil.

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „VÝROBA A IMPLEMENTACE ENKODÉROVÉ JEDNOTKY“ vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

25. května 2018

.....  
Tomáš Kirchner

## **Poděkování**

Tímto děkuji Ing. Tomáši Spáčilovi a všem ochotným lidem v Mechlabu za vedení a pomoc při vypracování mé bakalářské práce.

# Obsah

|       |                                                                 |    |
|-------|-----------------------------------------------------------------|----|
| 1     | Úvod.....                                                       | 6  |
| 2     | Rešerše .....                                                   | 7  |
| 2.1   | Ballbot .....                                                   | 7  |
| 2.2   | Enkodér .....                                                   | 9  |
| 2.2.1 | Optické enkodéry .....                                          | 9  |
| 2.2.2 | Magnetické enkodéry .....                                       | 11 |
| 2.3   | Komunikace po SPI a I <sup>2</sup> C .....                      | 17 |
| 2.3.1 | SPI.....                                                        | 17 |
| 2.3.2 | I <sup>2</sup> C .....                                          | 18 |
| 2.4   | Dostupné absolutní rotační magnetické enkodéry .....            | 19 |
| 2.4.1 | Výběr enkodéru.....                                             | 21 |
| 2.4.2 | AS5147 .....                                                    | 21 |
| 2.4.3 | Diskový magnet .....                                            | 23 |
| 2.5   | Použité knihovny a zařízení .....                               | 23 |
| 3     | Cíle řešení .....                                               | 24 |
| 4     | Postup řešení a výsledky.....                                   | 25 |
| 4.1   | Návrh DPS .....                                                 | 25 |
| 4.2   | Návrh skříně motoru .....                                       | 25 |
| 4.3   | Komunikace čipu s Raspberry Pi .....                            | 26 |
| 4.4   | Komunikace čipu s mikrokontrolérem PIC a testování AS5147 ..... | 27 |
| 4.4.1 | Měření s hřídelovou spojkou .....                               | 27 |
| 4.4.2 | Měření bez hřídelové spojky.....                                | 29 |
| 4.4.3 | Vliv vzdálenosti mezi magnetem a čipem na chybu měření .....    | 31 |
| 4.4.4 | Vliv natočení magnetu vůči ose čipu na chybu měření .....       | 32 |
| 4.4.5 | Vliv posunutí osy magnetu a středu senzoru na chybu měření..... | 32 |
| 4.4.6 | Vliv nedokonalostí uložení magnetu vůči čipu.....               | 33 |
| 4.4.7 | Měření šumu .....                                               | 33 |
| 5     | Závěr .....                                                     | 34 |
|       | Seznam použitých zdrojů.....                                    | 35 |



# 1 Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá implementací magnetického enkodéru na robota s nestabilní sférickou základnou – ballbota, v rámci projektu BB-8. Řízení takto nestabilního zařízení vyžaduje nejen věrný matematický model soustavy, ale také přesné měření vstupních mechanických veličin, mezi něž patří i natočení motorů. Na to však vestavěné enkodéry neměly dostatečné rozlišení. Jako vhodné řešení tohoto problému bylo navrženo vyměnit stávající senzory za kvalitnější, konkrétně absolutní magnetické.

Díky své robustnosti, kompaktnosti a nízkým nákladům, se dají absolutní magnetické enkodéry s úspěchem využít v mnoha technických aplikacích. Tento dokument popisuje jejich činnost a zabývá se implementací takovýchto senzorů v rámci projektu BB-8.

Dostupný laboratorní model ballbot poskytuje studentům praktické a zajímavé použití znalostí z kinematiky, dynamiky, elektroniky a teorie řízení, které získali během bakalářského studia oboru Mechatronika.

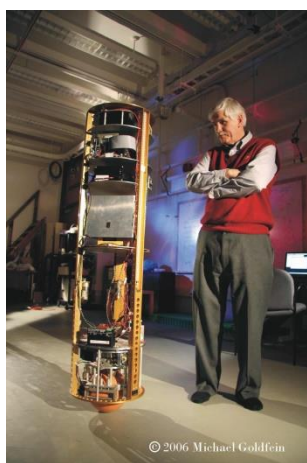
## 2 Rešerše

Na začátku rešeršní části mé bakalářské práce je podán nástin pojmu ballbot. Její stěžejní pasáž se věnuje enkodérům, především absolutním rotačním magnetickým enkodérům s dvoupólovým diskovým magnetem. Další podkapitola se týká komunikaci po sběrnicích, které jsou zmíněny v zadání bakalářské práce – tedy SPI a I<sup>2</sup>C. Poslední část je určena seznamu dostupných rotačních absolutních magnetických enkodérů a jejich parametrům.

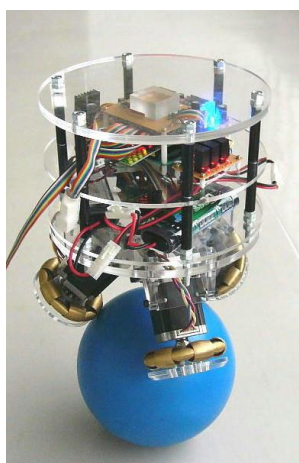
### 2.1 Ballbot

Ballbot je přirozeně nestabilní zařízení, což vyžaduje poměrně komplexní řízení se zpětnovazební smyčkou. Nepatrná kontaktní plocha zařízení se zemí umožňuje velkou manévrovatelnost, která je oproti jiným, staticky stabilním, pohyblivým vozítkům výhodou. Tyto zařízení, spoléhající se na statickou stabilitu, bývají také obvykle těžší.

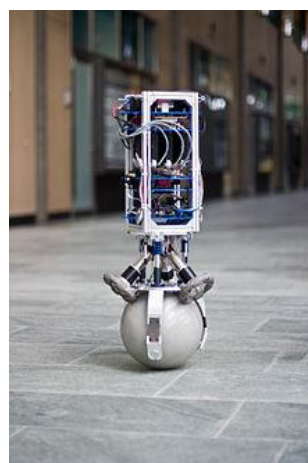
První úspěšný pokus zkonstruovat ballbot byl proveden roku 2006 na Carnegie-Mellonské univerzitě v USA (Obr. 2.2). Následoval BallIP navržený Tohoku-Gakuinskou univerzitou v Japonsku roku 2007 (Obr. 2.3). Mezi další z mnoha projektů patří například ballbot postavený dva roky poté na univerzitě v australské Adelaide, nebo The Rezero roku 2010 v Curychu (Obr. 2.4).



a,



b,



c,

Obr. 2.1: Nejznámější ballboti: a, CMU ballbot (převzato z [3]);  
b, The BallIP (převzato z [2]);  
c, The Rezero (převzato z [2])

Obecně zařízení sestává ze tří částí, a sice z koule (sférická základna), těla (řídící elektronika) a pohonného systému.

**Sférická základna** funguje pouze jako neaktivní objekt, na kterém robot balancuje – naklápěním se a rotací kolem své vlastní osy. Mělo by se jednat o pevnou sféru, neboť při sestavování matematického modelu ballbota předpokládáme nulovou deformaci (předpoklady rovinného modelu, viz [1]). Povrch by měl mít dostatečně velký

koeficient tření, aby nedocházelo k prokluzu mezi základnou a robotem (resp. pohonným systémem). Ovšem ne příliš velký, protože kromě tření mezi sférickou základnou a zemí při rotaci, která má největší význam, se všechna ostatní tření zanedbávají. U laboratorního modelu ballbot je použit gymnastický míč s průměrem 55 cm.

**Tělo robota** se skládá ze základny robota, sloužící jako nosná konstrukce, do které jsou pod 120 stupni zasazeny tři skříně na stejnosměrné motory. Na základně robota taky spočívají napájecí baterie a řídicí mikrokontrolér PIC. Tělo robota je chráněno krytem, který má na vrcholu hlavní vypínač a konektory pro UART a programování mikrokontroléru.

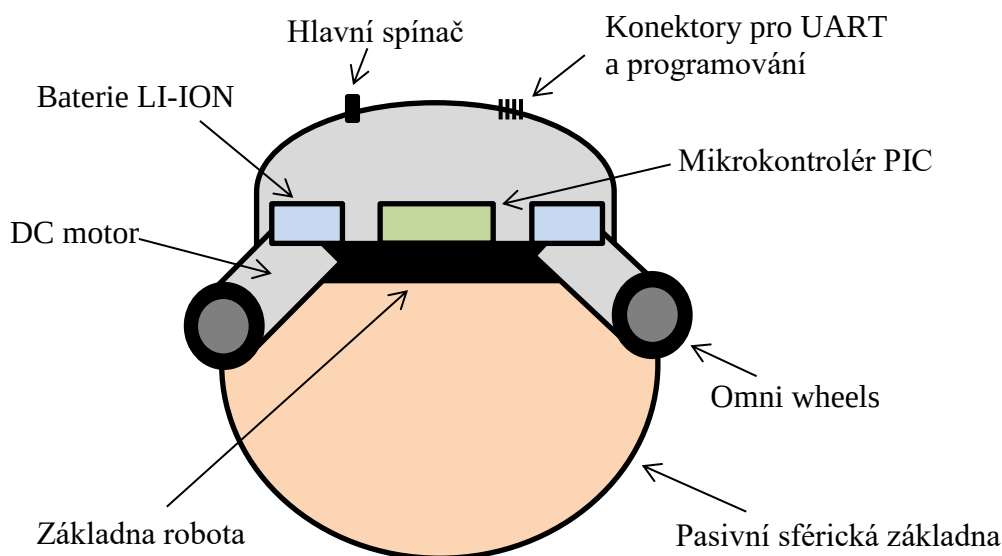
**Pohon robota** je realizován třemi stejnosměrnými motory Transmotec PG220 s planetovou převodovkou s převodovým poměrem 19:1. Každý z nich obsahuje vestavěný magnetický enkodér, tvořený dvěma Hallovými sondami, které jsou vůči sobě posunuty o 90 stupňů. Rozlišení snímače je dle údaje výrobce [5] tři pulzy na otáčku motoru a senzor, což je pro danou aplikaci značně nedostatečné. Malé rozlišení na otáčku je především nežádoucí pro derivaci takového signálu, která je potřeba pro zjištění rychlosti otáčení. Proto musí být aplikován filtr pro vyhlazení ostrých přechodů. Použitím jednoduchého RC filtru dojde ke zpoždění signálu. To s sebou nese za následek opoždění okamžité rychlosti na výstupu, které neumožňuje včasnou reakci systému. Při vyšším rozlišení je potřeba menší časové konstanty filtru, což umožňuje rychlejší odezvu.

Krouticí moment motorů je přenášán na sférickou základnu speciálním druhem všesměrových kol zvaných tzv. „omni wheels,“ které kromě rotace umožňují i axiální pohyb kola bez výrazného tření.



Obr. 2.2: Detail provedení tzv. „omni wheel“ kola (převzato z [6])

Bližší informace a detaily použitých konstrukčních prvků ballbota lze vyčíst ze zdroje [4]. Pro tuto práci však nejsou podstatné.



Obr. 2.3: Nákras laboratorního modelu ballbot

## 2.2 Enkodér

Enkodér je zařízení, které snímá polohu a převádí tuto informaci na digitální nebo analogový signál. Podle typu měřeného pohybu rozlišujeme dva typy: lineární a rotační. V lineárních aplikacích snímáme posun, v rotačních pak úhel natočení.

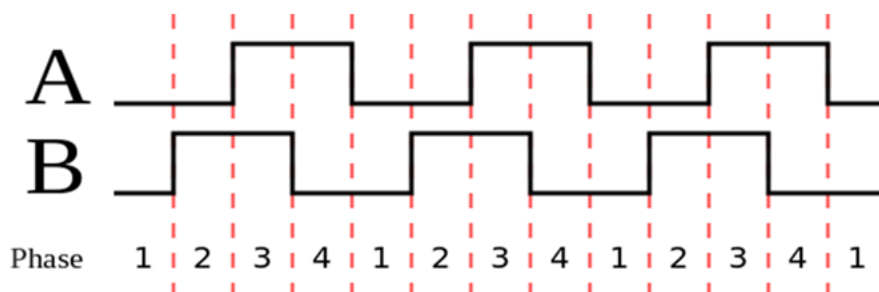
Enkodéry se dělí na inkrementální a absolutní. Jednodušší inkrementální jsou schopny poskytovat informace pouze o relativním pohybu – jeho velikosti (počtu impulsů) a směru, vůči předchozí pozici. Absolutní posun, nebo natočení je potom nutné získat pomocí reference koncovým spínačem až zpracováním signálu, například mikrokontrolérem. Naproti tomu absolutní enkodéry mají unikátní výstup pro každou jednotlivou pozici. Díky tomu lze vyčítat natočení, respektive vzdálenost vzhledem k nulové pozici senzoru a to i po vyřazení a znovu zapojení napájení. Nejčastějšími digitálními senzory jsou enkodéry *optické* a *magnetické*.

### 2.2.1 Optické enkodéry

Optické snímače pohybu jsou jednou z nejčastějších metod měření polohy. Avšak kvůli značnému zlepšení v technologii magnetických enkodérů jsou v mnoha aplikacích optické pohybové senzory nahrazovány magnetickými. Přesto jsou optické enkodéry v této bakalářské práci zmíněny na prvním místě, jelikož se na jejich principu fungování dá snadno vysvětlit základní myšlenka inkrementálních, respektive absolutních enkodérů a tyto senzory mají přes výhodný poměr ceny a vlastností u magnetických enkodérů na trhu stále své místo.

Základním prvkem optického rotačního enkodéru je disk, který je pevně upevněn na hřídeli a skládá se z po sobě jdoucích průhledných a neprůhledných úseků. Při rotaci motoru tak paprsky ze světelného zdroje – například diody LED, střídavě dopadají na fototranzistor anebo jsou přerušeny neprůhlednými úseky disku. Optický snímač (např.

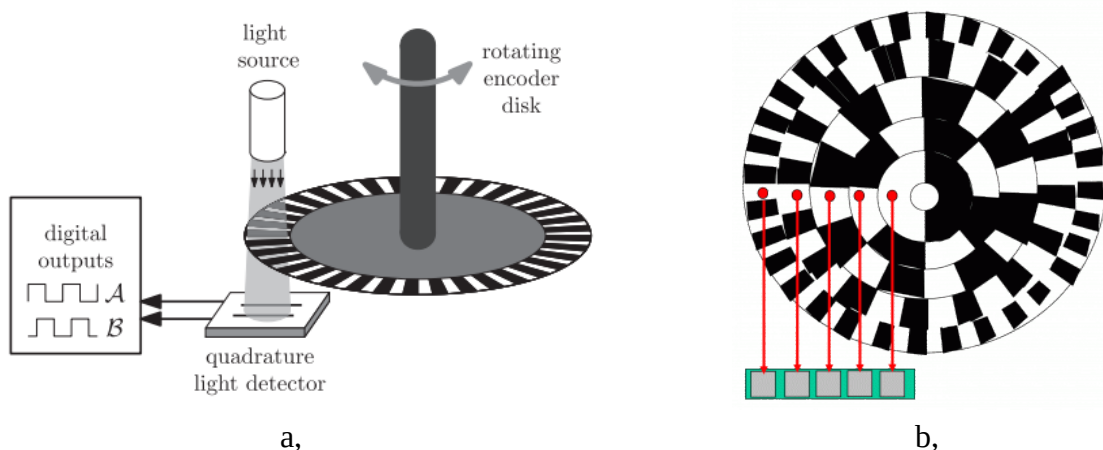
fototranzistor) intenzitu dopadajícího světla převádí na elektronický signál. Ten je zesílen a upraven na obdélníkový, jehož frekvence přímo závisí na rychlosti otáčení. Při použití alespoň dvou snímačů lze získat dva vzájemně posunuté signály, které nejčastěji označujeme písmeny A a B. Podle počtu impulsů za čas a toho, jaký signál předbíhá který, lze zjistit rychlost a smysl otáčení.



Obr. 2.4: Digitální signály inkrementálního optického enkodéru (převzato z [7])

Pokud disk enkodéru rozdělíme na několik mezikruží, můžeme docílit unikátní kombinace průhledných a neprůhledných oblastí pro každou detekovatelnou pozici, tzv. *Gray code*. Toho se využívá u absolutních optických enkodérů. Takto je sice nutné použít více fotodetektorů, ale jde přímo zjistit úhel natočení. Rozlišení enkodéru je pak dáno počtem světelných senzorů.

Přednostmi optických enkodérů jsou vysoké rozlišení a možnost jejich použití v aplikacích, kde se vyskytují silná magnetická pole. Naopak mezi nevýhody této technologie patří možnost vniknutí nečistot z okolí, které snižují kvalitu snímání, nebo poškození optického disku mechanickým namáháním například při nárazu, nebo kmitání. Oproti magnetickým enkodérům také zabírají větší objem a nejsou vhodné do teplotně náročných podmínek.

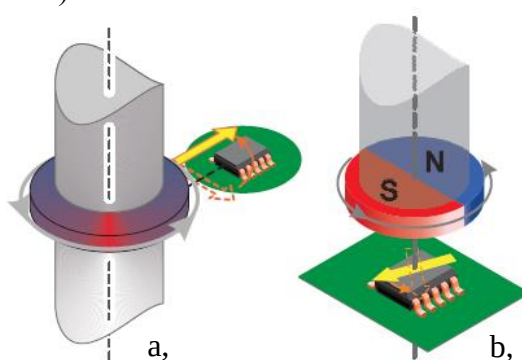


Obr. 2.5: a, Schéma inkrementálního optického enkodéru (převzato z [8]);  
b, Model optického disku absolutního optického enkodéru (převzato z [9])

## 2.2.2 Magnetické enkodéry

V technických aplikacích, jako jsou například automobily, výrobní stroje, roboty nebo domácí spotřebiče, je nutné počítat s vysokou teplotou, velkými otřesy a vibracemi, nebo omezeným prostorem. Optické enkodéry nejsou vždy, kvůli svým výše popsaným nedostatkům vhodným řešením. S úspěchem lze využít magnetické.

V podstatě existují dva základní druhy magnetických enkodérů: s mnohápólovým magnetizovaným diskem (respektive proužkem u lineárních senzorů) – kde se senzor nachází mimo osu hřídele – a dvoupólovým magnetem – u kterého je pozice senzoru na ose hřídele (viz obrázek 2.7).



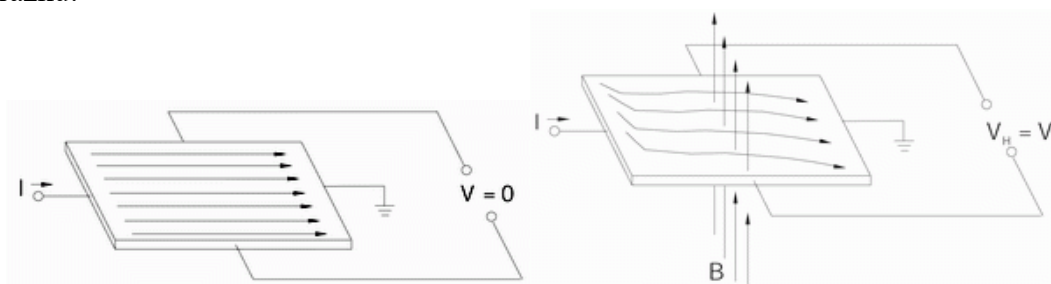
Obr. 2.6: Rotační magnetické enkodéry se senzorem: a, mimo osu – tzv. „off-axis“; b, na ose – „on-axis“, obrázek převzat z [10]

Ačkoli se tyto přístupy navzájem značně liší, oba nejčastěji jako senzory využívají Hallovy sondy, které pracují na principu *Hallova jevu*.

**Hallův jev** byl objeven a popsán americkým vědcem Dr. Edwinem Hallem v roce 1879. Ten si při jednom ze svých pokusů všiml, že pokud přiloží magnet kolmo k tenké zlaté destičce, kterou protéká proud, vzniká na jejích bocích napětí. Proud destičkou, tzv. „Hallovým elementem“, si můžeme představit jako pohyb volných nosičů elektrického náboje. Při průchodu magnetickým polem kolmým na směr jejich pohybu, působí na ně Lorenzova síla

$$F = qE + q(v \times B)$$

, která nosiče vychýlí ve směru kolmém k vektoru počáteční rychlosti. Na jedné straně destičky se akumulují částice se záporným elektrickým nábojem a vůči druhé straně vzniká rozdíl elektrického potenciálu, tedy napětí. Hallův jev je patrný z následujícího obrázku:



Obr. 2.8: Hallův jev (vlevo – elektrický obvod bez působení magnetického pole, vpravo – po přiložení magnetu), obrázky převzaty z [11]

Vniklé Hallovo napětí  $U_{\text{hall}}$  je přímo úměrné řídicímu proudu, procházejícím Hallovým elementem  $I_{\text{bias}}$  a magnetické indukci  $B$ . Velikost napětí je také ovlivněna citlivostí senzoru, která se liší pro různé způsoby jeho provedení a je více či méně závislá na několika faktorech, jako například na teplotě, vlastnostech materiálu a geometrii Hallova elementu (srovnáno s [12]). U polovodičových Hallových senzorů lze Hallovo napětí vypočítat jako

$$U_{\text{hall}} = G \cdot \frac{r_H}{n \cdot e \cdot t} \cdot I_{\text{bias}} \cdot B = S_{V_I} \cdot I_{\text{bias}} \cdot B$$

, kde  $G$  je geometrický korekční faktor (více se lze dočíst v [13]),  $r_H$  Hallův rozptylový faktor ([12, 14]),  $n$  dotování křemíku,  $e$  elementární náboj,  $t$  tloušťka Hallova elementu a  $S_{V_I}$  magnetická citlivost senzoru přepočítaná na řídicí proud.

**Hallové sondy** jsou schopny měřit magnetické pole o síle v řádu od desítek  $\mu T$  po více než  $1 T$  (srovnáno s [12]). Přitom mají velmi malou velikost. Výroba je levná a navíc nevyžaduje žádné zvláštní technologické postupy, neboť se k ní dá s úspěchem využít běžná CMOS metoda („complementary metal oxide semiconductor“) pro výrobu integrovaných obvodů (více v [12, 15]). Nevýhodami Hallových sond jsou malé napětí na bocích sondy i bez přítomnosti magnetického pole, tzv. offset, teplotní citlivost senzoru, šum a nízké hodnoty výstupního Hallova napětí, které se musí před vyhodnocením ještě zesilovat. Kromě zmíněného offsetu a šumu patří mezi důležité charakteristiky Hallových senzorů také magnetická citlivost a linearita jejich chování. Přesnost a cena Hallových senzorů se mohou lišit v závislosti na použitých metodách pro snížení a kompenzaci jejich nedostatků.

Účinnost přeměny magnetického pole v Hallovo napětí nebo proud Hallovým senzorem je dána jeho **magnetickou citlivostí**. Absolutní magnetická citlivost je rovna podílu výstupního napětí, nebo proudu a velikostí magnetické indukce. Relativní citlivost je podílem absolutní citlivosti a řídicího napájení a odpovídá velikosti výstupního napětí, nebo proudu, při magnetickém poli o velikosti  $1 T$  a jednotkovém řídicím napájení.

Běžnou velikostí **offsetu**, přepočítaného na magnetickou indukci (nejmenší hodnota, ze které je na výstupu možné vyčíst vypovídající napětí), je několik militesla. Offset je závislý na napájecím napětí, teplotě a napětí (myšleno mechanické napětí v čipu), a na řadě dalších teplotních a teplotně-elektrických jevů, z nichž některé jsou deterministické, jiné náhodné. K redukci offsetu se u Hallových senzorů vyrobených technologií CMOS používají dvě hlavní metody. Jednou z nich je párování Hallových elementů. To spočívá ve využití dvou nebo čtyř identických Hallových elementů, jejichž napájení je vůči sobě pootočeno o  $90$  stupňů (v případě 4 sond). Výsledný signál Hallova napětí je zprůměrován, zatímco offset způsobený geometrickými nepřesnostmi, vymizí. Druhou variantou je tzv. „Spinning current method“. Ta je založena na periodickém přepínání napájecích a výstupních kontaktů Hallové destičky podél os symetrie ([12], [14], [16]).

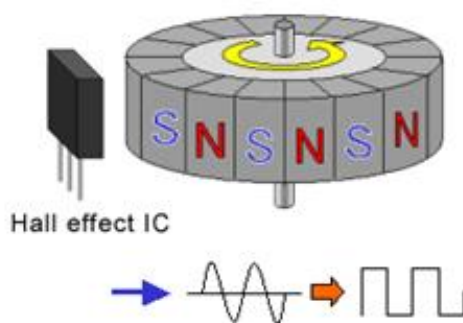


Kromě offsetu je výstupní signál znehodnocován **šumem**. Ten je závislý na frekvenci signálu a jeho hlavními zdroji jsou teplotní šum způsobený elektrickým odporem senzoru a jevy, ke kterým dochází na PN přechodech polovodiče ([17]).

**Nelinearita** Hallových sond je definována jako procentuální odchylka skutečně naměřených hodnot a jejich nejlepšího lineárního proložení. V [18] se uvádí, že mimo případ saturace nebo naopak příliš slabého magnetického pole je chování Hallových senzorů téměř lineární – desetiny a setiny procenta.

### Magnetické enkodéry s mnohapólovým diskem

Princip funkce těchto senzorů je velmi podobný jako u optických enkodérů. Hlavním rozdílem je pak to, že místo zdroje světla a fotoreceptorů, je zde zdroj magnetického pole a jako senzory nejčastěji Hallovy sondy. Spolu s hřídelí se otáčí magnetizovaný disk. V radiálním směru se vně disku nachází Hallova sonda, generující harmonický signál. Ten je zesílen a převeden na obdélníkový. Výstupem takového senzoru je tedy signál podobný optickému inkrementálnímu enkodéru. Rozlišení magnetického enkodéru s mnohapólovým diskem je dáno počtem pólu disku a množstvím senzorů po jeho obvodu.



Obr. 2.13: Magnetický rotační enkodér s mnohapólovým diskem (převzato z [19], upraveno)

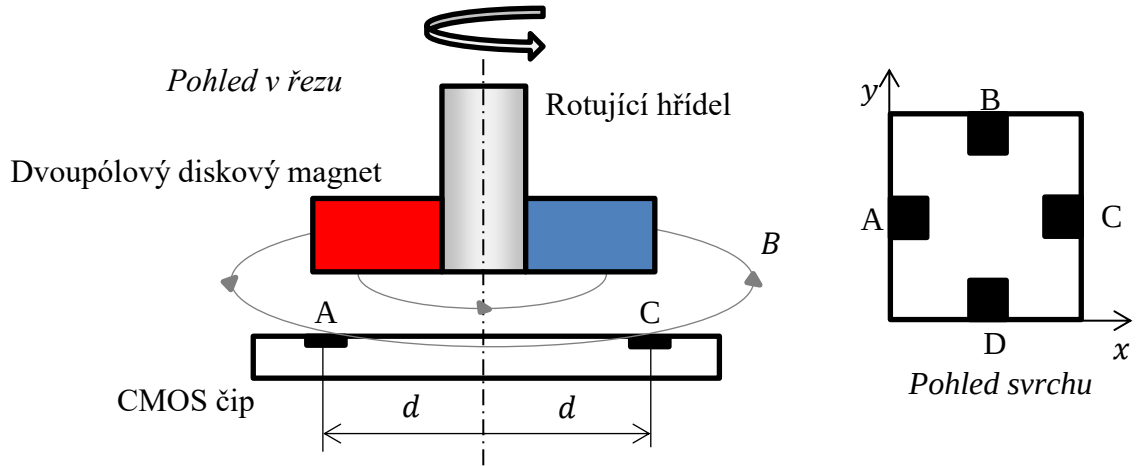
### Magnetické enkodéry s dvoupólovým magnetem

Klasický magnetický enkodér s mnohapólovým diskem vyžaduje pro přesné vyčítání polohy náročné precizní provedení disku, který spolu s umístěním senzorů mimo otáčející se hřídel nepříznivě ovlivňuje velikost celého enkodéru. Mezi nevýhody tohoto přístupu rovněž patří, že nelze přímo vyčítat absolutní natočení. Naproti tomu enkodéry založené na následně popsaném způsobu jsou velmi kompaktní a výstupní informací je přímo úhel natočení.

Stavba jednoosého integrovaného rotačního magnetického senzoru na principu Hallova jevu (myšleno citlivého pouze na složku magnetického pole kolmou na povrch čipu) je patrná z obr. 2.14. Dvoupólový diskový magnet vytváří při rotaci hřídele točivé magnetické pole, které je detekováno Hallovými elementy rozmístěnými v určité



vzdálenosti  $d$  od osy magnetu. U čipů firmy AMS (Austriamicrosystems), z níž jeden byl vybrán pro tuto bakalářskou práci, je využito čtyř Hallových elementů [20].



Obr. 2.14: Schéma jednoosého integrovaného magnetického rotačního enkodéru, písmena A, B, C a D označují Hallové elementy

Díky pokročilé kompenzaci dříve diskutovaných nedostatků Hallových sond můžeme předpokládat, že rozdíly v absolutní magnetické citlivosti jednotlivých senzorů ( $S_A$ ,  $S_B$ ,  $S_C$  a  $S_D$ ) jsou zanedbatelné [21], tedy je můžeme nahradit jedinou citlivostí, kterou označíme jako  $S_{Hall}$ . Při rotaci magnetu se na Hallových elementech vytváří napěťové signály ( $U_A$ ,  $U_B$ ,  $U_C$  a  $U_D$ ) se sinusovým průběhem, které jsou u protilehlých sond posunuté o 180 stupňů. Odečtením takovýchto signálů získáme pro směry  $x$  a  $y$  naznačené v pohledu svrchu v obr. 2.14 sinusový a kosinusový signál ( $U_x$  a  $U_y$ ) s dvojnásobnou amplitudou než u signálu jednoho Hallova elementu:

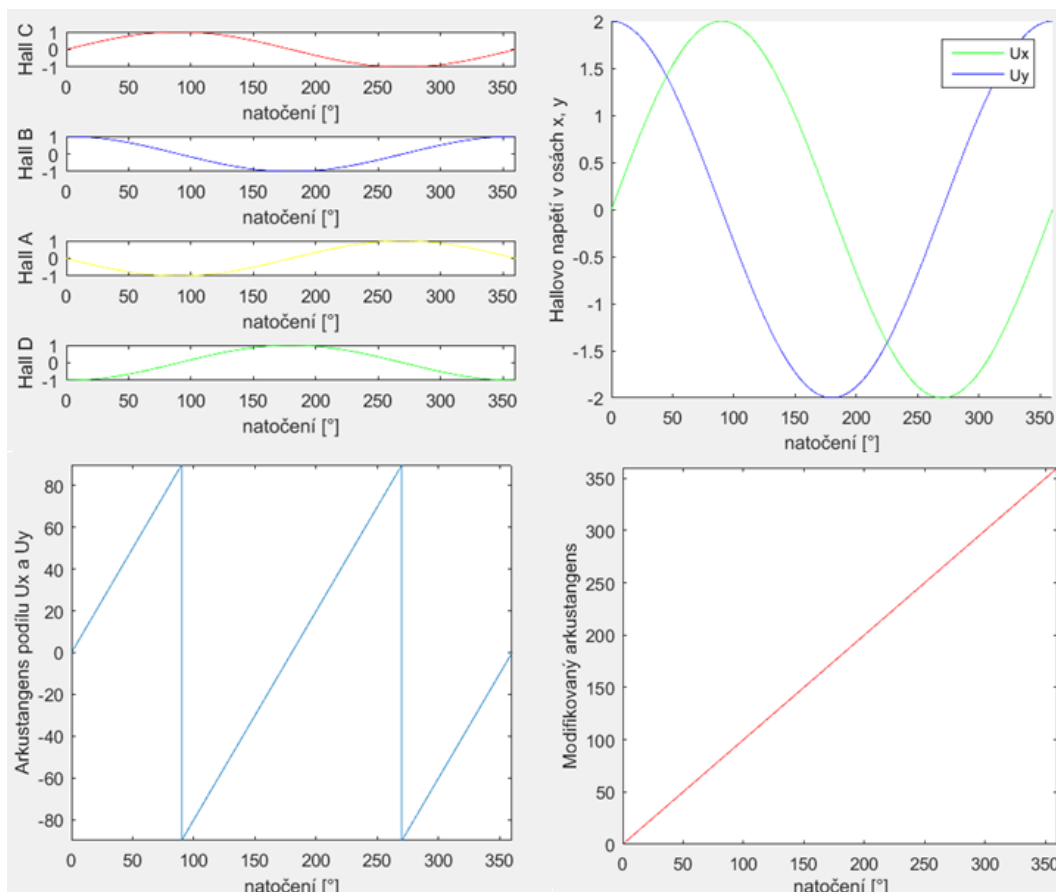
$$U_x = U_C - U_A = S_C \cdot B \cdot \sin(\phi) - S_A \cdot B \cdot \sin(\phi + 180) = 2 \cdot S_{Hall} \cdot B \cdot \sin(\phi)$$

$$U_y = U_B - U_D = S_B \cdot B \cdot \sin(\phi + 90) - S_D \cdot B \cdot \sin(\phi + 270) = 2 \cdot S_{Hall} \cdot B \cdot \cos(\phi)$$

Úhel natočení  $\phi$  je potom roven

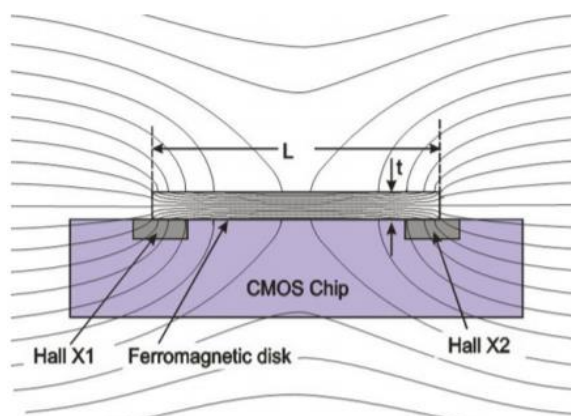
$$\phi = \arctan\left(\frac{U_x}{U_y}\right) = \arctan\left(\frac{2 \cdot S_{Hall} \cdot B \cdot \sin(\phi)}{2 \cdot S_{Hall} \cdot B \cdot \cos(\phi)}\right) = \arctan\left(\frac{\sin(\phi)}{\cos(\phi)}\right)$$

Z této rovnice je zřejmé, že detekce úhlu nezávisí na síle magnetického pole, citlivosti senzorů ani vzdálenosti mezi magnetem a čipem. Funkce arkustangens sice nabývá hodnot pouze od  $-90$  do  $90$  stupňů, avšak se znalostí znamének u napětí  $U_x$  a  $U_y$  jsme schopni tento interval rozšířit na plnou stupnici 0 až 360 stupňů [21].



Obr. 2.15: Průběhy napětí a arkustangens podílu  $U_x$  a  $U_y$  při jednom otočení magnetu

Přidáním koncentrátoru magnetického pole v podobě disku z feromagnetického materiálu (IMC – *integrated magnetic concentrator*) na povrch čipu je magnetické pole v oblasti Hallových elementů usměrněno a zesíleno. Dle [22] se magnetická indukce v místech Hallových elementů zvýší až desetkrát bez vzniku přídavného šumu. S tím je spojena i vyšší magnetická citlivost senzoru. Kromě toho, díky zakřivení podélných složek magnetického pole v oblasti IMC a Hallových sond, je možné získávat natočení osy magnetu až ve třech osách [23].

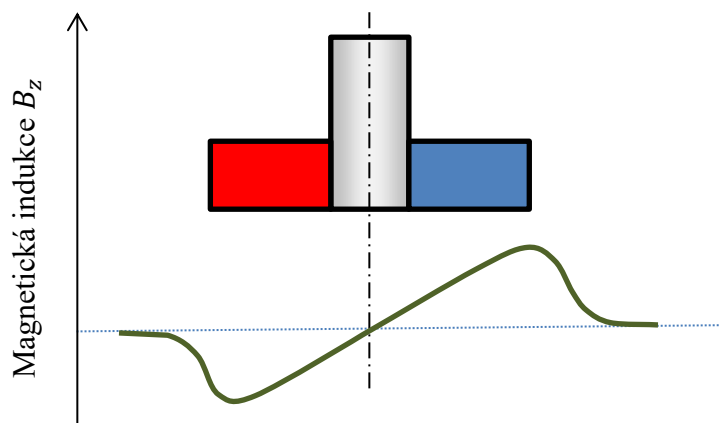


Obr. 2.16: Zakřivení magnetických siločar díky feromagnetickému disku (převzato z [22])

Hlavními vlastnostmi magnetického enkodéru jsou jeho *rozlišení*, které je dáno především rozlišením analogově digitálních převodníků (ADC) a rozlišením algoritmu, který počítá arkustangens podílu naměřených napětí [20]. A *přesnost*, která vypovídá o rozdílu mezi naměřeným a skutečným úhlem natočení a je závislá na množství faktorů jako jsou již zmiňovaný offset, rozdíl fází Hallových signálů, nelinearita, chyba při výpočtu úhlu a další. Nesouosost magnetu a čipu je další z parametrů, které nepříznivě ovlivňují chování senzoru.

**Rozdíly fází Hallových signálů** mohou být způsobeny tím, že Hallovy elementy nejsou umístěny s přesnou úhlovou roztečí mezi sebou, popřípadě časovým zpožděním mezi převody jednotlivých analogových signálů na digitální. Z tohoto důvodu se sinusový i kosinusový signál převádí paralelně (současně) dvěma ADC.

Abychom se vyhnuli **nelinearitě**, je nutné použít analogově digitální převodník, který vykazuje dostatečně lineární chování a dále použít vhodný magnet a přesně jej uložit vůči čipu. V ose magnetu je díky symetrii magnetické pole nulové. Se zvyšující se vzdáleností od středu magnetická indukce nejprve relativně lineárně roste. Pokud se Hallovy elementy nachází v tomto prostoru, platí, že detekce úhlu je nezávislá na vzdálenosti čipu a magnetu.



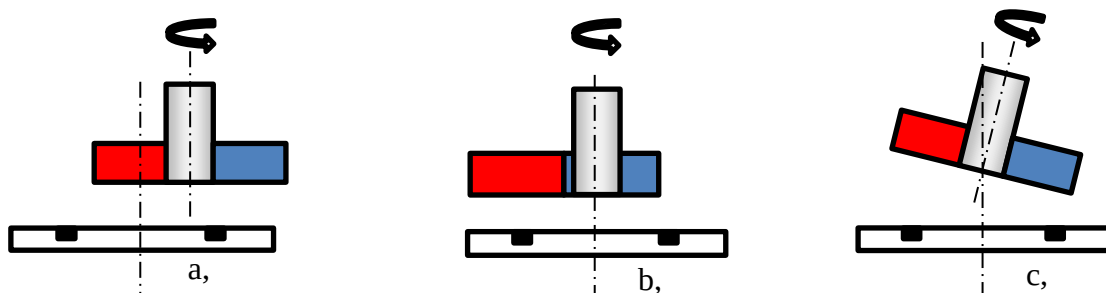
Obr. 2.17: Řez rozložením magnetické indukce pod dvoupólovým diskovým magnetem

Se zvětšujícím se průměrem magnetu klesá význam nesouososti hřídele a čipu. Naopak však klesá směrnice funkce rozložení síly magnetického pole v závislosti na vzdálenosti od osy magnetu. To má za důsledek nižší hodnoty Hallova signálu, který se, ač zatížen šumem, musí o to více zesílit. To vede ke zhoršení kvality měření úhlu.

**Chyba při výpočtu** arkustangens záleží na způsobu jeho výpočtu. Jednou z nejrozšířenějších metod je CORDIC algoritmus, který využívá operace bitový posun, sčítání, odčítání a porovnávání (tato metoda je detailně popsána v [24]). CORDIC trpí především omezenou délkou slova reprezentující digitální čísla a zaokrouhlováním úhlu. Možnou variantou CORDIC je výpočet z tabulek, ale ty mají vyšší nároky na paměť a nemusí být dostatečně přesné [18].

**Nesouosost magnetu a čipu** může být způsobena posunutím osy otáčení od středu čipu (obr. 2.18-a), nesouměrností magnetu kolem osy otáčení (obr. 2.18-b), nebo natočením osy magnetu vůči ose čipu (obr. 2.18-c). Dopady těchto nepřesností na chybu měření

úhlu se liší v závislosti na vzdálenosti mezi čipem a magnetem a na rozměrech a síle magnetu ([38]).



Obr. 2.18: Nesouosost magnetu a čipu

## 2.3 Komunikace po SPI a I<sup>2</sup>C

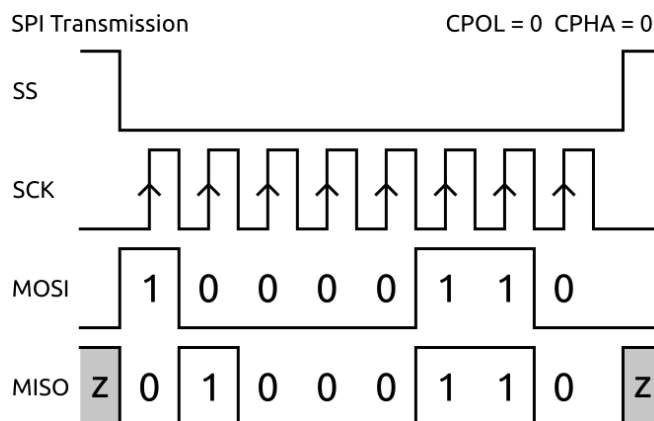
Komunikace mezi dvěma a více zařízeními je umožněna pomocí tzv. sběrnice, což je soustava vodičů, která zajišťuje přenos řídicích instrukcí a dat. Posílání signálů se řídí systémem pravidel, který nazýváme komunikační protokol. Co se týče digitálních dat, rozeznáváme *sériový* přenos, který v konkrétním okamžiku umožňuje posílání právě jednoho bitu. A *paralelní*, jenž umožňuje v jednom čase posílat více bitů najednou. Mezi nejznámější a stále hojně využívané sériové sběrnice patří SPI a I<sup>2</sup>C. Tato kapitola vysvětluje základní termíny těchto přenosů a zabývá se jejich podstatou.

### 2.3.1 SPI

SPS (*Serial Peripheral Interface*) využívá takzvanou dvoukanálovou komunikaci. To znamená, že odesílaná a přijímaná data putují dvěma různými cestami, v případě SPI současně – hovoříme pak o *full-duplex* přenosu. Kromě dvou zmiňovaných signálů, které označujeme MOSI (Master Out Slave In) a MISO (Master In Slave Out), je SPI standardně vybavena ještě hodinovým signálem SCK a SS (Slave Select) [25].

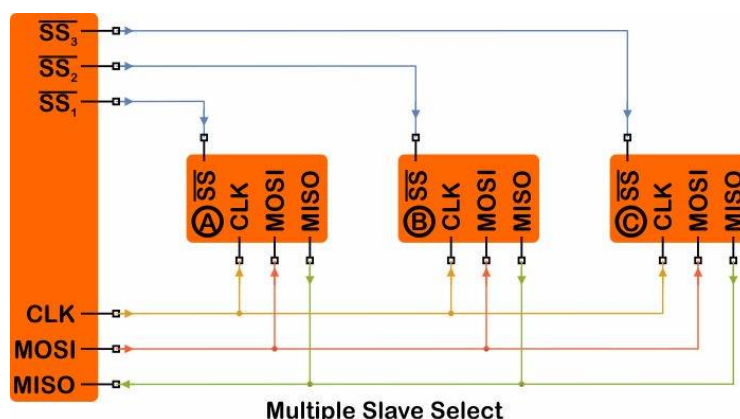
Jedno ze zařízení (uzlů), které spolu komunikují, nazýváme *master*. Typicky se jedná o mikrokontrolér, který vlastně celou komunikaci řídí. Všechny ostatní uzly označujeme jako *slave*. Zatímco master má oprávnění komunikovat s jakýmkoli jiným zařízením, slave může hovořit pouze s uzlem master. SPI může fungovat v několika módech, před jejím použitím je tedy nutné nastudovat technickou dokumentaci periferie a vše správně nastavit [26].

Přenos začíná změnou signálu SS (většina zařízení je aktivních, pokud je SS nastaven na nízkou hodnotu, tedy logickou nulu). Dle časování a logiky SCK rozlišujeme čtyři módy, které jsou určeny kombinací dvou parametrů a to jsou CPOL (Clock Polarity) – ten určuje, při jaké z logických úrovní signálu je čip nečinný. A CPHA (Clock Phase) – zdali jsou datové signály snímány při náběžných, nebo sestupných hranách hodinového signálu [27].



Obr. 2.18: Časování SPI protokolu pro mód 0 (CPOL i CPHA jsou nastaveny na nulu), převzato z [26]

V režimu pro více než dvě zařízení, má každý uzel slave unikátní SS, všechny ostatní signály jsou sdíleny. Celkové zapojení je patrné z obrázku 2.18. Z důvodu sdílených datových cest pokud komunikace probíhá full-duplex, může master komunikovat najednou maximálně s jednou periferií.



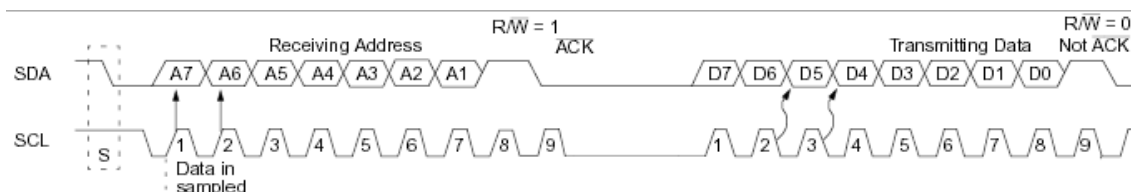
Obr. 2.19: Zapojení více zařízení přes sběrnici SPI, převzato z [27]

V případě mé bakalářské práce jako zařízení slave slouží čipy magnetického enkodéru, které jsou řízeny uzlem master – mikrokontrolérem dsPIC33FJ128MC804 firmy Microchip.

## 2.3.2 I<sup>2</sup>C

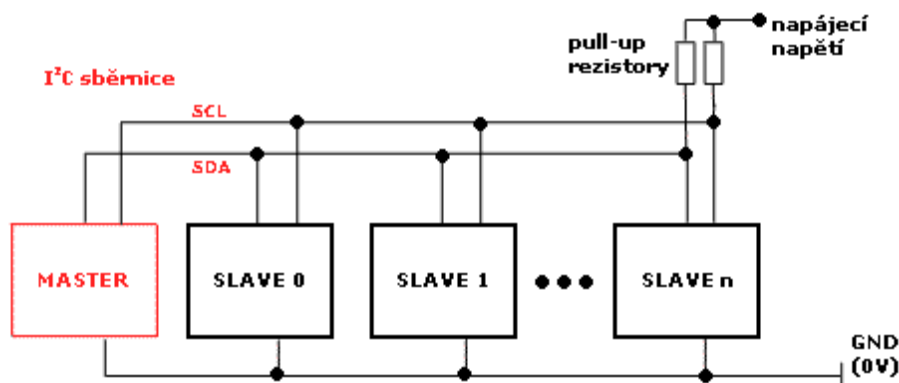
I<sup>2</sup>C (*Inter-integrated Circuit*) oproti SPI využívá i v případě více připojených zařízení pouze dva vodiče – obousměrný datový SDA a hodinový SCL, což klade malé nároky na počet pinů mikrokontrolérů. Naopak nevýhodou je, že v jeden okamžik se data mohou pouze buďto odesílat, nebo přijímat, není tedy možný režim full-duplex, komunikace je pomalejší a protokol poněkud složitější.

Nejčastěji, podobně jako u SPI, pracuje jeden uzel jako master a ostatní zařízení v režimu slave. Každému takovému uzlu je přiřazena unikátní adresa o délce sedmi, nebo desíti bitů. Komunikaci začíná master nastavením datového signálu do logické nuly, zatímco hodinový signál zůstává na vysoké hodnotě. Tento stav nazýváme startovním bitem. Následuje adresa uzlu, se kterým chce master komunikovat. Tato zpráva je ukončena bitem, který určuje, zdali chce master data k periférii odeslat – logická 0, nebo přijmout – logická 1. V následujícím cyklu hodin uzel, jehož adresa souhlasí, odešle potvrzující bit, tzv. ACK (*acknowledge*). Pokud potvrzení není odesláno, může to znamenat, že uzel s danou adresou se v síti nenachází, popřípadě z nějakého důvodu není připraven komunikovat. Po odeslání všech dat master změní SDA na vysokou hodnotu, zatímco hodinový signál je po celou dobu v logické jedničce (srovnáno s [28], [29]).



Obr. 2.20: Komunikace přes I<sup>2</sup>C s využitím sedmibitové adresy (převzato z [28])

Protože se za klidový stav bere, když jsou oba signály v logické jedničce, musí být na každý vodič připojeno napájecí napětí přes pull-up rezistory. To zajišťuje vysokou hodnotu napětí na obou vodičích v případě, že jsou všechny uzly sběrnice nečinné. Takovéto zapojení je patrné z obrázku 2.20.



Obr. 2.21: Zapojení I<sup>2</sup>C sběrnice pro více než dva uzly s pull-up rezistory (převzato z [30])

## 2.4 Dostupné absolutní rotační magnetické enkodéry

Tato podkapitola udává finální výčet kusově dostupných absolutních rotačních magnetických enkodérů pro český trh a jejich parametry pro srovnání.

| Název                                  | AS5048                                                                                          | AS5147                                                                                           | MLX90363                                                                                                                           |
|----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Cena <sup>1</sup>                      | 164 – 191                                                                                       | 223                                                                                              | 99 – 245                                                                                                                           |
| Rozlišení                              | 14 bit / 360 °                                                                                  |                                                                                                  |                                                                                                                                    |
| Výrobce                                | ams [32]                                                                                        |                                                                                                  | Melexis [33]                                                                                                                       |
| Balení                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>14-pin TSSOP (5 x 6,4) mm</li> </ul>                     |                                                                                                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>8-pin SOIC (4,8 x 5,8) mm</li> <li>16-pin TSSOP (6,4 x 4,9) mm</li> </ul>                   |
| Napájení                               | 3,3 V nebo 5 V režim                                                                            |                                                                                                  |                                                                                                                                    |
| Možné výstupy                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>SPI</li> <li>I<sup>2</sup>C</li> </ul>                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>SPI</li> <li>UVW, ABI</li> <li>PWM</li> </ul>             | <ul style="list-style-type: none"> <li>SPI</li> </ul>                                                                              |
| Indukce magnetického pole <sup>2</sup> | 30 / 70                                                                                         | 35 / 70                                                                                          | 24 / 126                                                                                                                           |
| Šum                                    | max. 0,06 °                                                                                     | max. 0,068 °                                                                                     | max. (0,07 až 0,25) ° <sup>3</sup>                                                                                                 |
| Teplotní extrém <sup>4</sup>           | -40 / 150                                                                                       |                                                                                                  |                                                                                                                                    |
| Potřebné komponenty                    | Kondenzátory:<br>10 µF a 100 nF                                                                 | Kondenzátory:<br>1 µF a 100 nF                                                                   | Kondenzátory:<br>47 nF a 100 nF                                                                                                    |
| Referenční magnet a jeho umístění      | Průměr: (6 až 8) mm<br>Výška: více než 2,5 mm<br><br>Vzdálenost magnetu a čipu: (0,5 až 2,5) mm | Průměr: 8 mm<br>Výška: 3 mm<br><br>Typ magnetu: N35H<br><br>Vzdálenost magnetu a čipu: neuvedeno | Neuvedeno<br><br>Základními požadavky jsou především souosost a dodržení intervalu síly magnetického pole v oblasti Hallových sond |
| Technická dokumentace                  | viz [34]                                                                                        | viz [35]                                                                                         | viz [36]                                                                                                                           |

Tab. 2.1: Finální seznam kusově dostupných absolutních rotačních magnetických enkodérů

<sup>1</sup> Dle ceníku Mouser electronics [31], uvedeno v CZK (zaokrouhleno na koruny)

<sup>2</sup> Složka magnetického pole kolmá na povrch čipu minimální / maximální hodnota [mT]

<sup>3</sup> Podle typu aplikovaného filtru a teploty prostředí

<sup>4</sup> Minimální / maximální teplota okolí [°C]

Kromě vlastností popsaných v tabulce Tab. 2.1 je záhodno uvést ještě některé další přednosti uvedených enkodérů.

*Integrovaná diagnostika* AS5147 umožňuje zjistit, zdali je síla aplikovaného magnetického pole v intervalu povolených hodnot. K měření tedy není potřeba žádné další zařízení. Velikost magnetické indukce v okolí Hallových sond pak může být jednoduše upravena vzdáleností magnetu a čipu, popřípadě výměnou magnetu.

Zesilování analogového signálu, odstraňování šumu, převádění na digitální a počítání arkustangens způsobuje stále zpoždění mezi časem, kdy byl úhel naměřen a okamžikem, kdy se tato informace dostala na výstup. Tato časová prodleva způsobuje nepřesnosti v měření, které jsou tím větší, čím vyšší úhlovou rychlostí se magnet otáčí. Součin časové prodlevy a úhlové rychlosti se nazývá *dynamic angle error*. AS5147 automaticky zjišťuje úhlovou rychlost magnetu, násobí ji časovou prodlevou celého obvodu a kompenzuje tak zmíněnou nepřesnost (*dynamic angle error compensation - DAEC<sup>TM</sup>*).

MLX90363, podobně jako AS5147 podporuje diagnostiku síly magnetického pole přes SPI. Navíc díky magnetickému koncentrátoru, jehož funkce byla dříve vysvětlena, je senzor citlivý nejen na složku magnetické indukce kolmou k povrchu čipu, nýbrž také na magnetické pole v rovině enkodéru. To umožňuje získání informace o natočení ve všech třech osách (*TriAxis® technologie*) a použití senzoru například v 3D konzolích. Pro aplikaci enkodér motoru však tato vlastnost není potřeba.

## 2.4.1 Výběr enkodéru

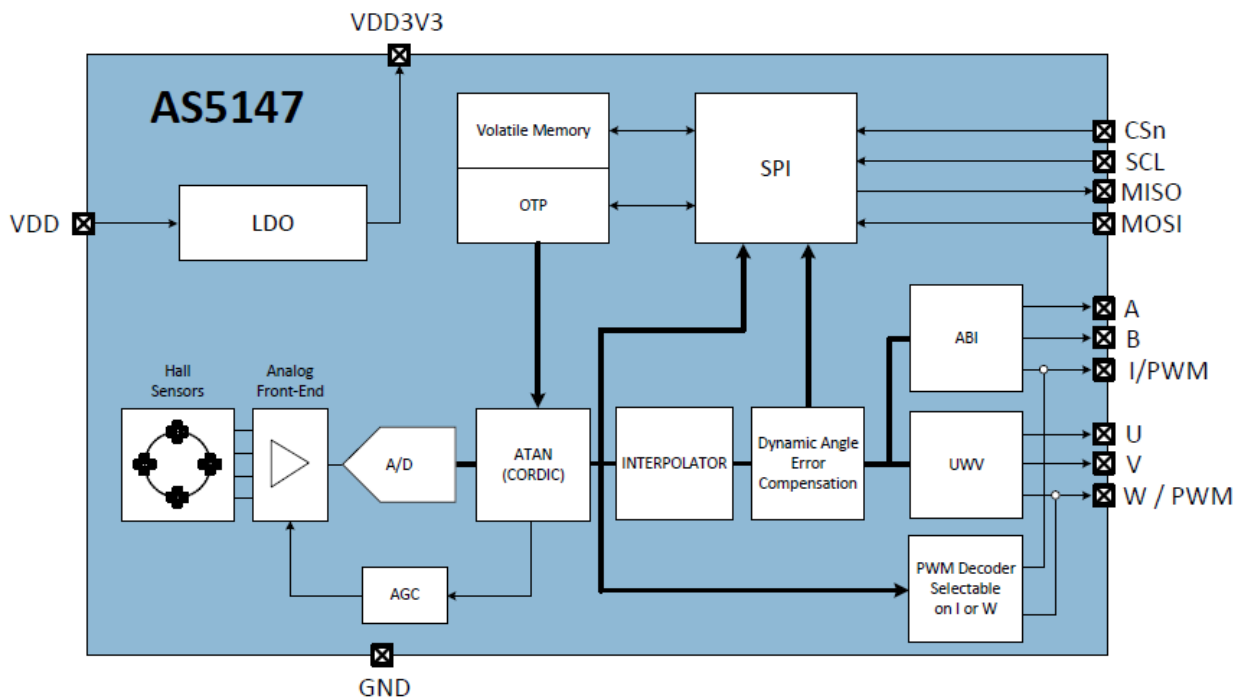
Logický požadavek dostupnosti ve skutečnosti splňovalo velmi málo čipů. Dalším důležitým parametrem, který zúžil seznam vhodných enkodérů, byl typ výstupu. Mnoho enkodérů poskytovalo pouze analogový výstup, popřípadě PWM, nebo synchronní sériovou komunikaci SSI. Při výběru senzoru byly vzaty v úvahu také další vlastnosti jako rozlišení, cena, napájecí napětí a vhodný typ magnetu. Ale z tabulky Tab. 2.1 je vidět, že se v těchto parametrech jednotlivé enkodéry mezi sebou nijak zvláště neliší. Nakonec byl vybrán čip AS5147 od firmy *ams*.

## 2.4.2 AS5147

Kromě vysokého rozlišení a nenáročné implementace patří mezi jeho hlavní výhody integrovaná diagnostika síly magnetického pole a kompenzace dynamické chyby měření úhlu DAEC<sup>TM</sup>. Celkem čtrnáct pinů čipu umožňuje vyčítat polohu – jak absolutní přes SPI a PWM, tak inkrementálně, popřípadě komutační signál UVW s nastavitelným počtem pólů stroje, který se dá využít pro řízení bezkartáčového stejnosměrného motoru. Prostřednictvím SPI příkazů lze programovat trvalou paměť čipu a nastavit tak například nulovou pozici enkodéru. Pro provoz senzoru a vyčítání úhlu natočení však tato přídatná nastavení nejsou nezbytně nutná.

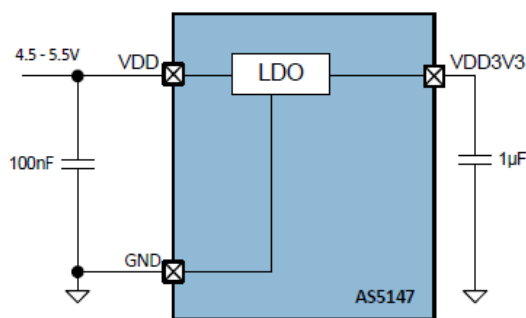


Obrázek 4.1 zobrazuje blokové schéma čipu, které koresponduje s poznatky získanými v rešeršní části bakalářské práce. Funkce arkustangens je u AS5147 získávána algoritmem CORDIC.



Obr. 4.1: Blokové schéma AS5147 (převzato z [35])

AS5147 bude pracovat v napájecím režimu 5 voltů. Přídavné kondenzátory jsou napojeny dle schématu na obrázku 4.2. Během testování bylo konstantní napětí odebíráno z pinů Raspberry PI a studentské sady EduKitu.



Obr. 4.2: Zapojení AS5147 v režimu napájení na 5 voltů (převzato z [35])

Rozlišení AS5147 je 14 bitů, což odpovídá 16384 polohám na otáčku. Nejmenší naměřitelná změna úhlu magnetu je tedy méně než 0,022 stupně, v praxi je však relevantní hodnota kvůli nepřesnostem měření (šumu, nepřesnost uložení magnetu) o něco vyšší.

### 2.4.3 Diskový magnet

Kvůli omezené nabídce kusového prodeje není použit magnet přesně doporučených parametrů (viz. Tabulka 2.1), nýbrž NP114 [37] s vlastnostmi, uvedenými v tabulce 2.2.

|                           | Referenční magnet pro AS5147 | NP114 |
|---------------------------|------------------------------|-------|
| <b>Materiál</b>           | N35                          | N38   |
| <b>Vnější průměr [mm]</b> | 8                            | 6     |
| <b>Výška [mm]</b>         | 3                            | 2,5   |

Tab. 2.2: Srovnání referenčního magnetu s použitým

Rozdíly nejsou tolik závažné. Navíc, díky integrované diagnostice magnetického pole AS5147, se dá síla magnetického pole v oblasti Hallových sond upravit změnou vzdálenosti magnetu od čipu.

## 2.5 Použité knihovny a zařízení

Tato podkapitola uvádí stručný přehled použitých knihoven a zařízení v praktické části této bakalářské práce.

**Spidev** – modul pro Python, který umožňuje základní half-duplex (pouze čtení, nebo zápis) a full-duplex komunikaci s SPI periferiemi.

**RPi.GPIO** – modul pro Python, který obsahuje třídu pro práci se vstupy a výstupy Raspberry Pi.

**MPLAB® Device Blocks for Simulink** – knihovna pro Simulink, která umožňuje práci se zařízeními firmy Microchip. Pro danou aplikaci je automaticky vygenerován kód, zkompileován a odeslán na mikrokontrolér.

**Simulink Desktop Real-Time** – poskytuje real-time běh modelů vytvořených v Simulink na počítačích s operačními systémy Windows a Mac OS X.

**Karta MF624** – zajišťuje připojení periférií k osobnímu počítači. Poskytuje několik digitálních a analogových vstupů a výstupů, převodníky mezi digitálním a analogovým signálem a enkodérové vstupy.

**PIC Edu Kit** – set elektronických zařízení a desek plošných spojů pro účely výuky v Mechatronické laboratoři. Byla použita při SPI komunikaci mezi AS5147 a mikrokontrolérem PIC.

### 3 Cíle řešení

Cílem této bakalářské práce je vyrobit a implementovat enkodérovou jednotku na zařízení ballbot. K tomu bylo potřeba:

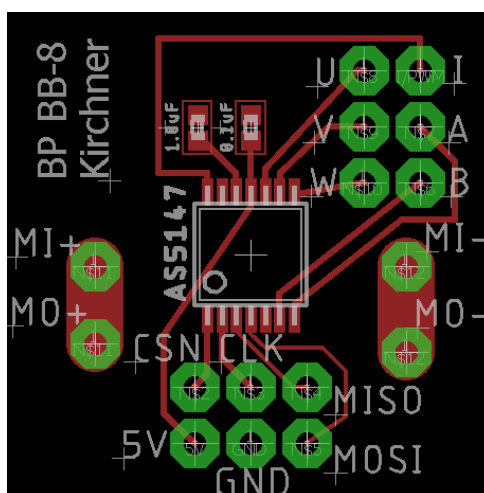
- obstarat vhodný absolutní rotační magnetický enkodér (tato část je již rozebrána v předchozí kapitole *Rešerše*) a k němu navrhnout a nechat vyrobit *desku plošných spojů*.
- napájet potřebné součástky a čip senzoru na desku plošných spojů a zhotovit kabeláž pro SPI komunikaci a napájení motoru
- navrhnout a nechat vyrobit *skříň pro motor*, která vyhovuje požadavkům umístění magnetu vůči senzoru a reflektuje omezení konstrukce již zhotoveného robota z minulých let
- otestovat funkčnost enkodérové jednotky pomocí SPI sběrnice na Raspberry Pi
- naprogramovat komunikaci SPI mezi senzorem a řídícím mikrokontrolérem PIC
- provést několik měření při různých nepřesnostech uložení magnetu vůči senzoru
- posoudit chování magnetického enkodéru, zdali vyhovuje požadavkům

## 4 Postup řešení a výsledky

V této kapitole je popsán návrh desky plošných spojů pro čip AS5147 a skříně pro motor. Další podkapitola se věnuje komunikaci SPI mezi čipem a Raspberry PI. Na závěr je rozebrána komunikace s mikrokontrolérem PIC a zhodnocení provedených měření.

### 4.1 Návrh DPS

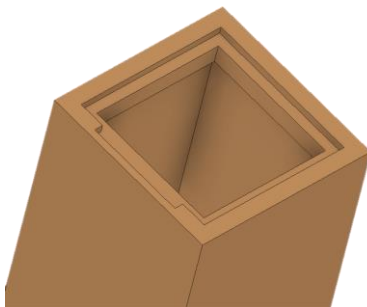
Deska plošných spojů byla navržena v prostředí EAGLE 8.4.1 od společnosti Autodesk podle schématu zapojení na obrázku 4.2 tak, aby se z pinů, potřebných pro SPI komunikaci, dal vyvést MLW kontakt. Podobně jsou uspořádány piny pro další druhy komunikace, i když nebyly využity. Mezi kontakty MI a MO vede cesta pro výkonový signál na motor.



Obr. 4.3: Návrh DPS pro AS5147 v prostředí EAGLE Autodesk

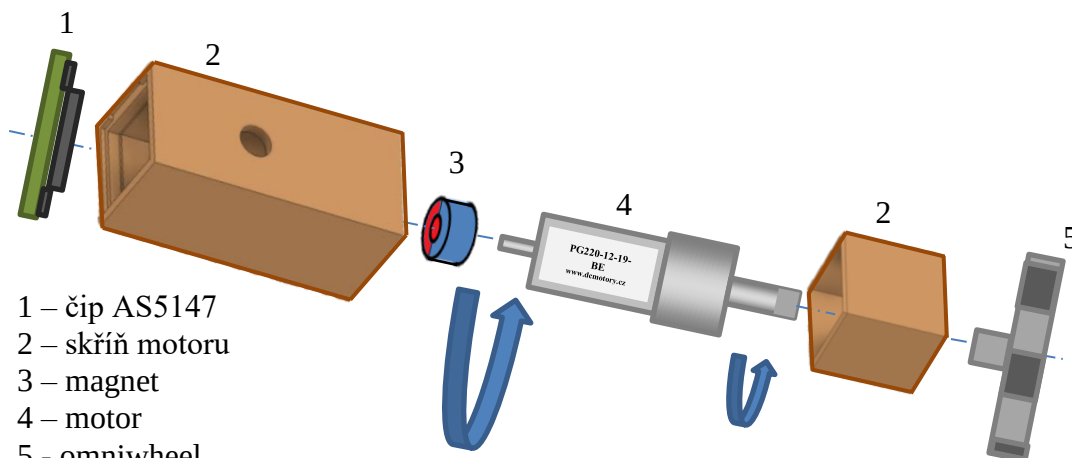
### 4.2 Návrh skříně motoru

Skříně motoru se vsouvají do nosné konstrukce ballbota, zmiňované v kapitole 2.1. Kromě této funkce, nový návrh navíc zajišťuje co nejpřesnější uložení čipu vůči poloze magnetu. K tomu slouží drážka zobrazená na obrázku 4.4.



Obr. 4.4: Drážka pro přesné uložení DPS, resp. čipu enkodéru

Skříň se kvůli montáži sestává ze dvou částí. Byla navržena v programu Autodesk Inventor Professional 2018 a vytisknuta na 3D tiskárně. Celkové uložení skříně, motoru, magnetu a desky plošných spojů je patrné z obrázku 4.5. Šipkami je naznačena rozdílná rychlost rotace hřídeli motoru díky Planetově převodovce, která je v něm vestavěná.



- 1 – čip AS5147
- 2 – skříň motoru
- 3 – magnet
- 4 – motor
- 5 – omniwheel

Obr. 4.5: Celkové uložení soustavy motoru

### 4.3 Komunikace čipu s Raspberry Pi

Funkčnost čipu byla nejprve testována na Raspberry Pi s využitím knihoven spidev, time a RPi.GPIO.

```
import spidev # import spidev knihovny
import time # import time knihovny
import RPi.GPIO as GPIO # import GPIO knihovny

spi = spidev.SpiDev() # vytvoření SPI
spi.open(0, 1)
```

Obr. 4.6: Importování potřebných knihoven pro SPI komunikaci

Data se přenáší vždy po dvou osmibitových číslech. Prvních 14 z nich ukládají informaci o úhlu natočení.

```
mask = 0b0011111111111111 # maska pro získání bitů [0:13], které
definují úhel

def angle(resp_k): # vrací úhel

    angle_tic = resp_k & mask # bitová operace pro získání úhlu
    angle = round( ((360 * angle_tic) / 16384), 2) # převod tiku na
    úhel

    return angle
```

Obr. 4.7: Převod hexadecimálního čísla na úhel natočení

Hodinový signál, odesílání a přijímání dat po vodičích se přímo řídí knihovnou spidev. Komunikace běží ve smyčce, dokud není přerušena vstupem z klávesnice.

```
def message(to_send): # SPI komunikace

    GPIO.output(3, GPIO.LOW) # začíná výměna dat nastavením SS low
    resp = spi.xfer(to_send) # full-duplex komunikace
    GPIO.output(3, GPIO.HIGH) # končí komunikace nastavením SS high

    resp_k = (resp[0]<<8) + resp[1] # převod do hexadecimální soustavy

    return resp_k

# end message

try:
    while True:

        to_send = [0x3F, 0xFF] # adresa příkazu pro měření úhlu
        resp_k = message(to_send)
        fi = angle(resp_k)

        print(fi) # zobrazí úhel natočení

        time.sleep(0.1) # pauza

# end while

except KeyboardInterrupt: # ruční ukončení programu
    spi.close()

# end try

spi.close()
```

Obr. 4.8: Komunikace SPI ve smyčce

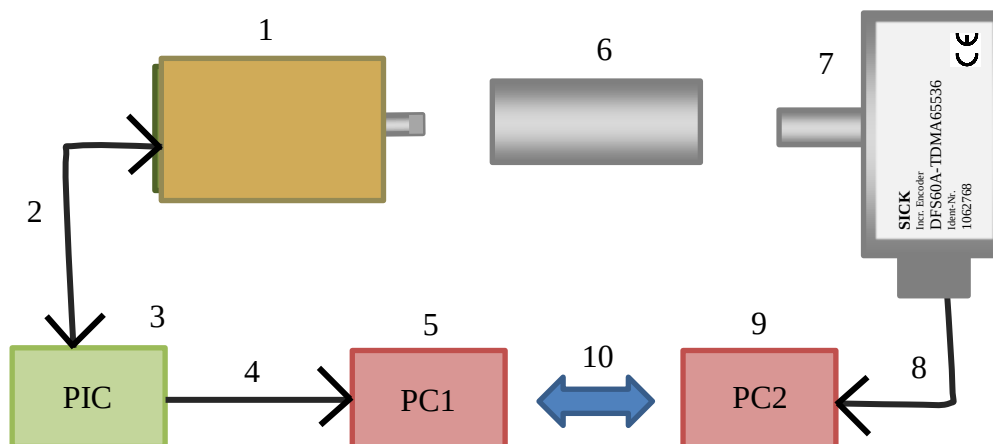
## 4.4 Komunikace čipu s mikrokontrolérem PIC a testování AS5147

Závěrem praktické části mé bakalářské práce byl zprovozněn SPI přenos mezi AS5147 a mikrokontrolérem dsPIC33FJ128MC804 a bylo provedeno srovnání nového magnetického enkodéru a průmyslového optického inkrementálního DFS60A-TDMA65536 s rozlišením 16 bitů. SPI komunikace byla vytvořena v prostředí MathWorks Simulink pomocí knihovny MPLAB® Device Blocks for Simulink.

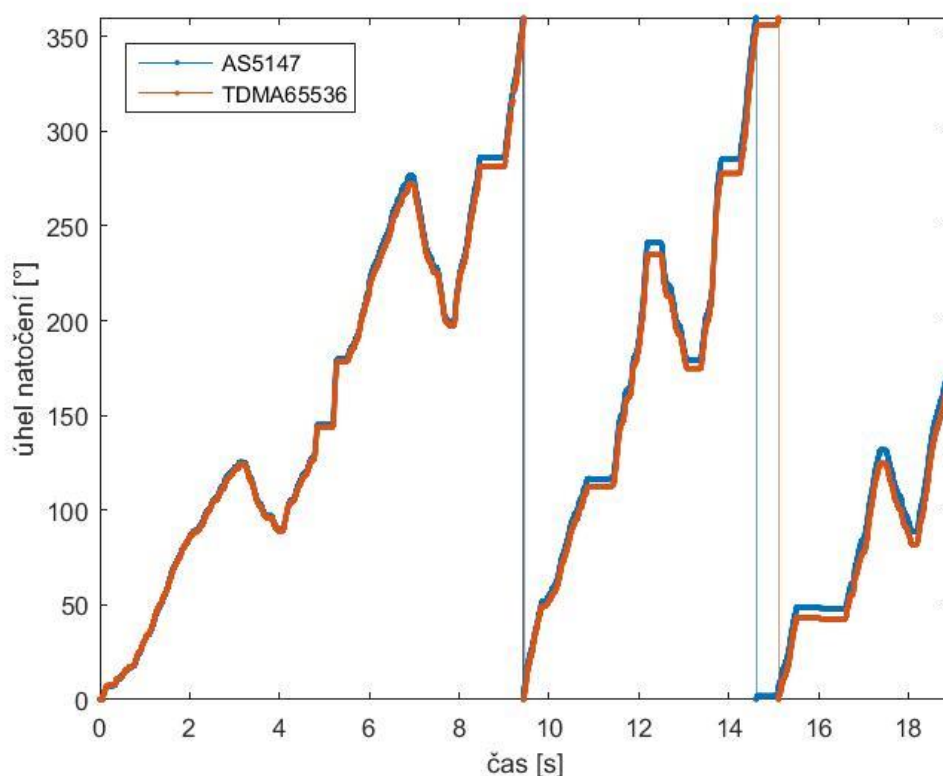
### 4.4.1 Měření s hřídelovou spojkou

Prvotní testování bylo provedeno dle soustavy na obrázku 4.9. Magnetický enkodér (1) komunikuje přes SPI sběrnici (2) s mikrokontrolérem PIC (3). Informace o natočení jsou pak přes UART (4) posílány do počítače PC1 (5). Pohyb hřídele motoru (1) je přenášen hřídelovou spojkou (6) na průmyslový enkodér (7). Před samotným

testováním byla vyjmuta Planetova převodovka motoru z důvodu odstranění vůle mezi jejími ozubenými koly. Průmyslový snímač otáček poskytuje inkrementální signál o natočení přes kartu MF-624 do počítače PC2 (9). Data z magnetického a optického senzoru jsou následně upravena a srovnána (10).



4.9: Schéma sestavy pro testování AS5147 s použitím hřídelové spojky



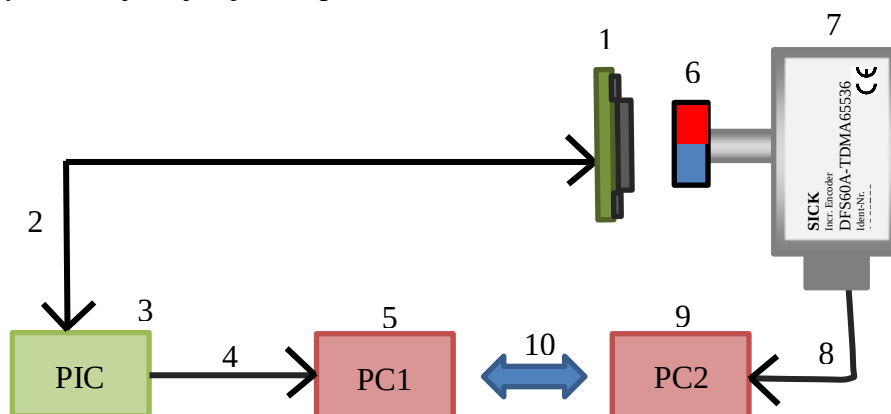
Obr. 4.10: Srovnání dat AS5147 a TDMA65536 s použitím hřídelové spojky

Zatímco na začátku měření (obr. 4.10) jsou signály obou enkodérů téměř shodné, postupem času se rozcházejí a vniká mezi nimi odchylka až sedm stupňů. Dospělo se k závěru, že tato chyba může být způsobena konstrukčními nedokonalostmi – hlavně nesouosostí hřídele motoru a hřídele optického enkodéru a možným prokluzem na hřídelové spojkce. Tomu by odpovídal fakt, že odchylka vykazuje známky

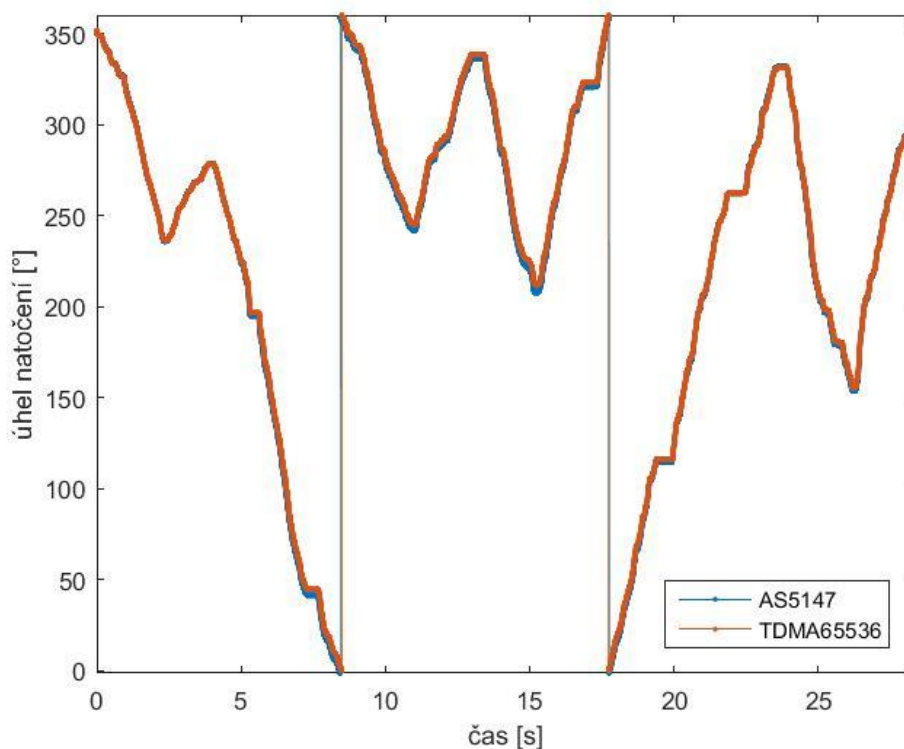
kumulativního chování, jelikož se soustavou otáčelo převážně v jednom směru. Z těchto důvodů bylo rozhodnuto zjednodušit měřicí konstrukci a provádět rotaci do obou možných směrů.

#### 4.4.2 Měření bez hřídelové spojky

Oproti měření popsanému v 4.4.1 byla odebrána hřídelová spojka a motor se skříní. Diskový magnet (6) je nyní připevněn přímo na hřídel optického enkodéru. Poloha čipu AS5147 (1) je zajištěna stojanem. Schéma sestavy je zobrazené na obrázku 4.11. Datové cesty zůstávají stejné jako u předchozího měření.

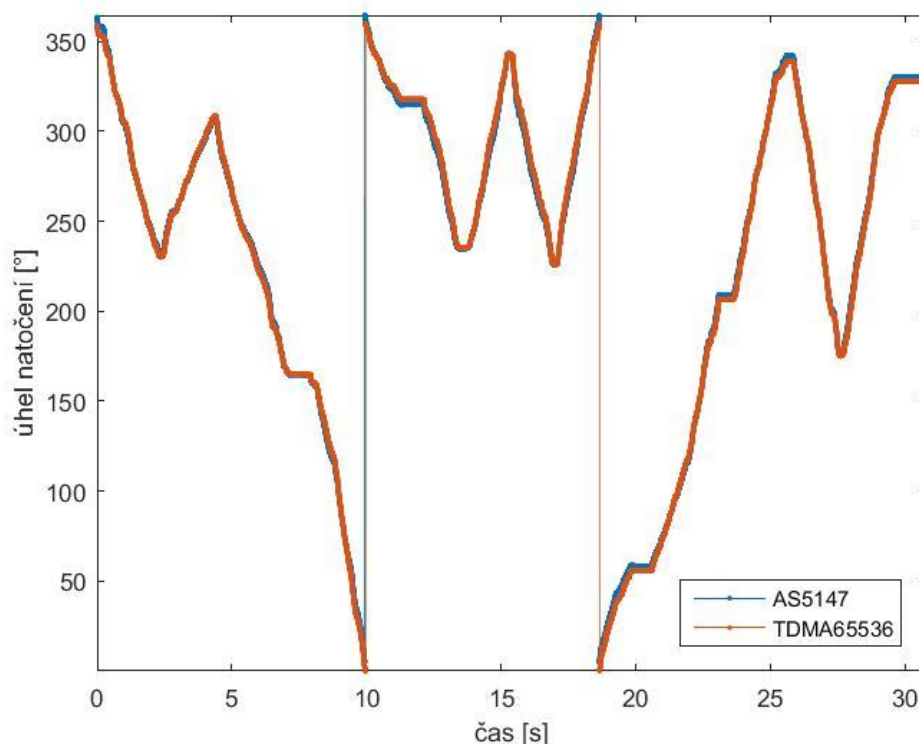


Obr. 4.11: Schéma sestavy pro testování AS5147 bez hřídelové spojky



Obr. 4.12: Srovnání dat AS5147 a TDMA65536, souose, vzdálenost magnetu a čipu 4 mm

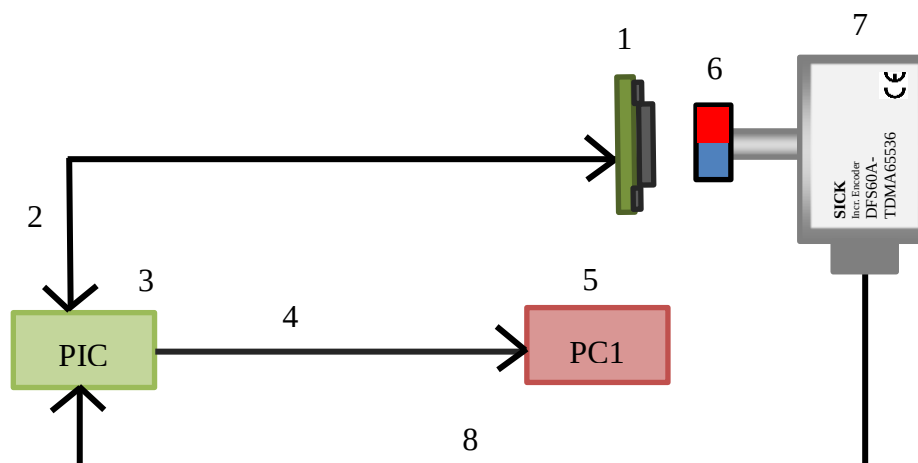




Obr. 4.13: Srovnání dat AS5147 a TDMA65536, posunuto, naklopeno, vzdálenost 8 mm

V případě přímé vazby magnetu na hřídel enkodéru došlo ke značnému zlepšení, které je patrné z obrázku 4.12. Bylo provedeno několik měření pro různé vzdálenosti mezi čipem a magnetem, natočení magnetu vůči rovině enkodéru a nesouososti magnetu a hřídele optického senzoru. Na obrázku 4.13 jde vidět výsledek měření, když byla osa hřídele posunuta přibližně o 1 mm vůči středu senzoru a natočena o  $8^\circ$  vůči ose senzoru. Vzdálenost mezi čipem a magnetem byla nastavena na 8 mm.

Odchylka mezi dvěma signály je srovnatelná s chybou u předchozího měření s ideálními podmínkami. To by vypovídalo o větší robustnosti magnetického enkodéru, než byla předpokládána. Během měření se taky objevila námitka, že použití karty MF-624, může zkreslovat data z optického senzoru nezaznamenáním všech impulsů (tiků). Z těchto důvodů bylo rozhodnuto provést měření znovu, tak aby signály obou enkodérů byly zpracovávány výhradně mikrokontrolérem, který vykazuje lepší *real-time* chování, než osobní počítač s operačním systémem Windows a kartou MF-624. Schéma měření je zobrazeno na obrázku 4.14. Komunikace mezi AS5147 a mikrokontrolérem zůstává totožná s předchozími měřeními. Výstupy optického senzoru jsou vedeny na digitální piny mikrokontroléru (8). Signály obou enkodérů jsou přiváděny přes UART (4) do počítače (5), kde jsou opět upraveny a srovnány.



Obr. 4.14: Schéma sestavy pro testování AS5147 bez použití karty MF-624

Takto bylo provedeno několik měření pro různé vzdálenosti mezi magnetem a čipem AS5147, natočení a posunutí jejich os, aby byly zjištěny příspěvky jednotlivých jevů na chybu měření.

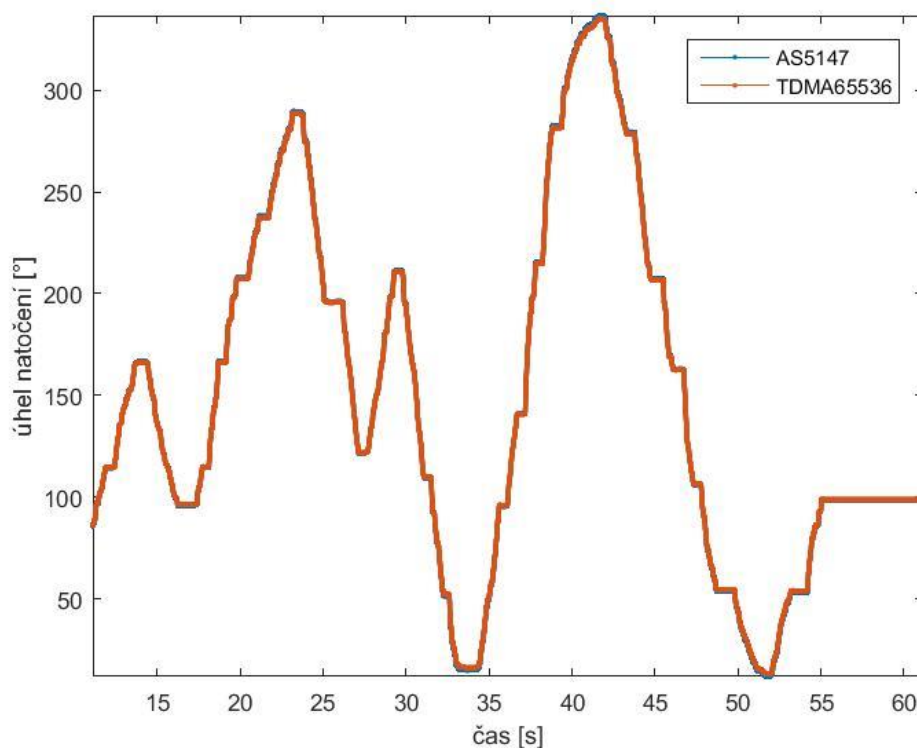
#### 4.4.3 Vliv vzdálenosti mezi magnetem a čipem na chybu měření

Celkem tři měření, naznačují, že ideálních výsledků se dosahuje, je-li magnet vzdálen asi 4 mm od plochy čipu. Tato větší vzdálenost odpovídá faktu, že byl použit silnější magnet (viz 2.4.3).

| Vzdálenost [mm] | RMS [ $^{\circ}$ ] <sup>5</sup> | Maximální odchylka [ $^{\circ}$ ] |
|-----------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| 2               | 0.760                           | 1.709                             |
| 4               | 0.722                           | 1.593                             |
| 10              | 2.198                           | 3.626                             |

Tab. 4.1: Odchylky v závislosti na vzdálenosti mezi magnetem a čipem

<sup>5</sup> RMS - Root Mean Square



Obr. 4.15: Srovnání dat AS5147 a TDMA65536, souose, kolineárně, vzdálenost 4 mm

#### 4.4.4 Vliv natočení magnetu vůči ose čipu na chybu měření

Byla provedena dvě měření pro natočení přibližně  $5^\circ$  a  $10^\circ$  (v jedné ose). Je logické, že nejmenší chyby dosáhneme při nulovém natočení.

| Natočení [°] | RMS [°] | Maximální odchylka [°] |
|--------------|---------|------------------------|
| 5            | 1.110   | 1.897                  |
| 10           | 2.072   | 4.516                  |

Tab. 4.2: Odchylky v závislosti na natočení magnetu vůči ose čipu

#### 4.4.5 Vliv posunutí osy magnetu a středu senzoru na chybu měření

Ideální stav je, pokud osa magnetu prochází středem čipu. Byly změřeny odchylky pro posun 2 mm a 3 mm.

| Posun [mm] | RMS [°] | Maximální odchylka [°] |
|------------|---------|------------------------|
| 2          | 2.381   | 4.323                  |
| 3          | 4.789   | 6.971                  |

Tab. 4.3: Odchylky v závislosti na posunutí os magnetu a středu senzoru

#### 4.4.6 Vliv nedokonalostí uložení magnetu vůči čipu

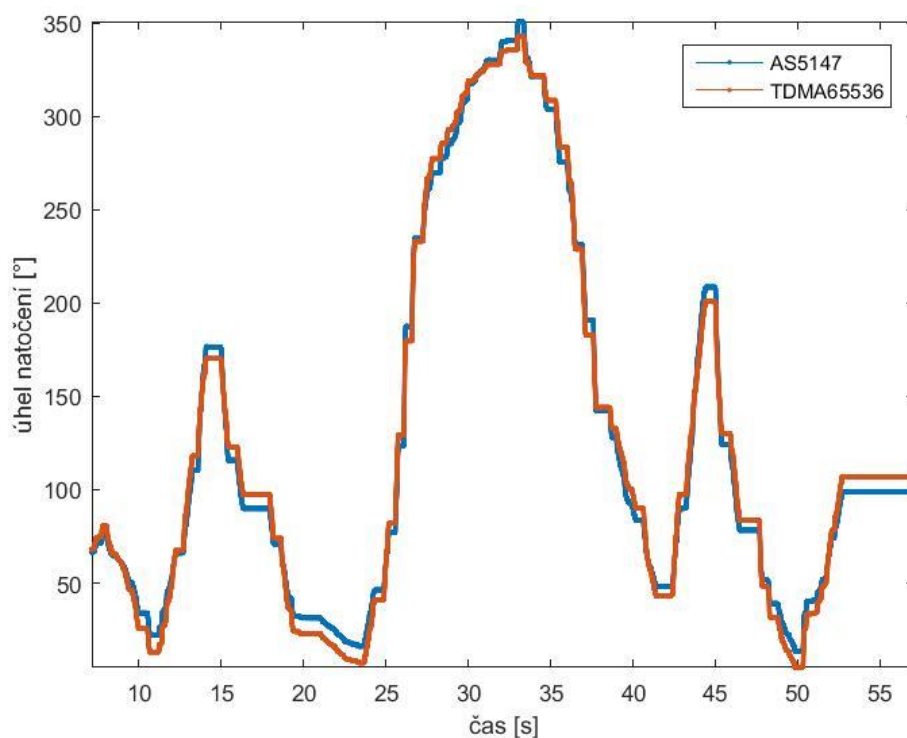
Dle dat v předchozích kapitolách největších odchylek bylo dosaženo posunutím osy magnetu vůči středu čipu. Díky uložení DPS enkodéru v drážce motorové skříně by v praxi nemělo být toto posunutí a tedy ani chyba měření velké.

Vzdálenost mezi čipem a magnetem má ze tří zmiňovaných faktorů nejmenší vliv na chybu měření. Při velké vzdálenosti, klesá přesnost měření a roste vliv šumu.

V praxi je výsledná chyba měření součtem chyb jednotlivých příspěvků. Bylo provedeno měření ve vzdálenosti 4 mm, s posunem 2 mm a natočením  $8^\circ$  v obou možných směrech rotace.

| Kombinace mechanických nepřesností | RMS [ $^\circ$ ] | Maximální odchylka [ $^\circ$ ] |
|------------------------------------|------------------|---------------------------------|
|                                    | 6.410            | 9.376                           |

Tab. 4.4: Odchylka při kombinace mechanických nepřesností



Obr. 4.16: Srovnání dat AS5147 a TDMA65536, kombinovaná nesouosost

#### 4.4.7 Měření šumu

Bylo také provedeno asi hodinové měření, jehož cílem bylo zjistit význam šumu signálu. Z celkem 16 měření byla spočítána směrodatná odchylka měřeného úhlu  $\sigma_\phi = 0,019^\circ$ .

## 5 Závěr

Jako vhodný enkodér pro zařízení ballbot byl vybrán čip AS5147 od firmy ams s rozlišením 14 bitů. Oproti stávajícímu senzoru polohy s rozlišením 6 pulzů na otáčku došlo ke zlepšení s faktorem 2730. Nyní je možné sledovat natočení s krokem přibližně  $0,022^\circ$ , což je, pro danou aplikaci, jistě více než dostatečné. Především to také umožní použití menší časové konstanty filtru pro získávání derivace polohy – rychlosti otáčení a tedy i rychlejší odezvu řízení.

Kromě rozlišení je zásadním parametrem senzoru jeho přesnost. Důvody vzniku nepřesnosti a také cesty její kompenzace jsou rozebrány v rešeršní části tohoto dokumentu. Jedním z těchto faktorů, který jsme schopni do jisté míry ovlivnit, je přesnost uložení magnetu vůči čipu. Pro posunutý, natočený a vzdálený magnet od ideálního postavení byla spočítána průměrná odchylka mezi naměřenou a skutečnou hodnotou až  $6,43^\circ$ .

Díky vhodné konstrukci skříně pro motor, jejíž návrh byl také součástí práce, by dle provedených měření neměla průměrná chyba činit více než  $0,8^\circ$ . Průměrná hodnota šumu je zanedbatelná ( $\sigma_\phi = 0,019^\circ$ ). To činí implementovanou enkodérovou jednotku značně robustní a tedy splňující požadavky uvedené v zadání a dále rozebrané v rešerši. AS5147 navíc podporuje SPI komunikaci, takže je i vyčítání úhlu mikrokontrolérem PIC s použitím MPLAB® Device Blocks for Simulink poměrně snadné.

Laboratorní model ballbot dále poskytuje velké množství možných vylepšení, které by mohly být náplní dalších bakalářských, nebo diplomových prací. Jako je implementace senzorů pro měření dalších mechanických veličin, např. zrychlení ballbota. Dále řízení robota v terénu, plánování trasy, snímání a vyhodnocování obrazu a další.

## Seznam použitých zdrojů

- [1] FANKHAUSER, Péter a Corsin GWERDER. *Modeling and control of a ballbot* [online]. Zurich, 2010. Bakalářská práce. Swiss Federal Institute of Technology Zurich. Vedoucí práce Stefan Leutenegger, Francis Colas.
- [2] *Ballbot*. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Ballbot#cite\\_note-Rezero1-4](https://en.wikipedia.org/wiki/Ballbot#cite_note-Rezero1-4) Seznam obrázků
- [3] *Dynamically-Stable Mobile Robots in Human Environments*. Dynamically-Stable Mobile Robots in Human Environments - Projects - Microdynamic Systems Laboratory [online]. Ballbot Trac, 2013 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <http://www.msl.ri.cmu.edu/projects/ballbot/>
- [4] ŠPILA, Filip. *Návrh konstrukce a řízení nestabilního robota se sférickou základnou*. Brno, 2017. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojíního inženýrství. Vedoucí Ing. Tomáš Spáčil.
- [5] *DC motor série PG220 s planetovou převodovkou*. In: Stejnoseměrné Motory.cz [online]. Brno: Ing. Jiří Gross [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://www.dcmotory.cz/dc-motory-planetova-prevodovka/serie-pg220.html>
- [6] *Omni wheels. Omni wheel arduino robot kits, buy arduino kit for education* [online]. Nexus Automation Limited, 2016 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <http://www.microrobo.com/58mm-lego-compatible-omni-wheel.html>
- [7] *AN-1158 Rotary Encoder to Analog Converter*. Dialog Semiconductor [online]. Dialog Semiconductor, 2017 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <http://www.silego.com/products/561/312/Rotary-Encoder-to-Analog-Converter.html>
- [8] *DC Motor Speed Control using Encoder Feedback. Hi, I am Bharat* [online]. Bharat Joshi, 2016 [cit. 2018-04-26]. Dostupné z: <https://bharat-robotics.github.io/blog/dc-motor-speed-control/>
- [9] *Rotační enkodéry pro řízení pohonů a pohybu*. Automatizace.HW.cz [online]. HW server, 2017 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/rotacni-enkodery-pro-řízení-pohonu-a-pohybu.html>
- [10] *Advanced On-Chip Linearization in the A1332 Angle Sensor IC*. In: *Allegro MicroSystems, LLC - High Performance Semiconductors* [online]. Worcester (USA): Allegro MicroSystems, © 2018 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <https://www.allegromicro.com/en/Design-Center/Technical-Documents/Hall-Effect-Sensor-IC-Publications/Advanced-On-Chip-Linearization-A1332-Angle-Sensor-IC.aspx>

- [11] *Magnetické senzory přiblížení - 2. díl*. Automatizace.HW.cz | Elektronika v automatizaci [online]. Praha: HW server, ©1997-2014 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/magneticke-senzory-priblizeni-2-dil.html>
- [12] HEIDARI, Hadi. *Current-Mode High Sensitivity CMOS Hall Magnetic Sensors*. Pavia, 2015. Doktorská práce. University of Pavia. Vedoucí práce Prof. Franco Maloberti.
- [13] GEOMETRY INFLUENCE ON THE HALL EFFECT DEVICES PERFORMANCE. *U.P.B. Sci. Bull., Series A* [online]. 2010, **72**(4), 257-271 [cit. 2018-04-11]. Dostupné z: [https://www.scientificbulletin.upb.ro/rev\\_docs\\_arhiva/rez824.pdf](https://www.scientificbulletin.upb.ro/rev_docs_arhiva/rez824.pdf)
- [14] BANJEVIC, Mirjana. *High Bandwidth CMOS Magnetic Sensors Based on the Miniaturized Circular Vertical Hall Device*. Lausanne, 2011. Doktorská práce. École polytechnique fédérale de lausanne, À la faculté sciences et techniques de l'ingénieur.
- [15] *CMOS Working Principle and Applications*. ElProCus - Electronic Projects for Engineering Students - ElProCus is an educational website on electronic projects for ECE and EEE students. [online]. Tarun Agarwal, 2015 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <https://www.elprocus.com/cmos-working-principle-and-applications/>
- [16] A CMOS Current-Mode Magnetic Hall Sensor With Integrated Front-End. *IEEE TRANSACTIONS ON CIRCUITS AND SYSTEMS-I: REGULAR PAPERS*, [online]. IEEE, 2015, 2004-, **62**(5), 1270-1278 [cit. 2018-04-11]. ISSN 1549-8328. Dostupné z: <http://ims.unipv.it/~franco/JournalPaper/140.pdf>
- [17] POPOVIC, R.S, Z RANDJELOVIC a D MANIC. Integrated Hall-effect magnetic sensors. *Sensors and Actuators A: Physical* [online]. 2001, **91**(1-2), 46-50 [cit. 2018-05-25]. DOI: 10.1016/S0924-4247(01)00478-2. ISSN 09244247. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924424701004782>
- [18] MENG, Bumin, Yaonan WANG, Wei SUN a Xiaofang YUAN. *A Novel Diagnosis Method for a Hall Plates-Based Rotary Encoder with a Magnetic Concentrator*. *Sensors* [online]. 2014, **14**(8), 13980-13998 [cit. 2018-04-13]. DOI: 10.3390/s140813980. ISSN 1424-8220. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1424-8220/14/8/13980>
- [19] Detection of rotation speed. In: *AKM - Asahi Kasei Microdevices - Mixed Signal, Magnetic Sensors* [online]. Tokyo: Asahi Kasei Microdevices Corporation [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: [https://www.akm.com/akm/en/product/add/magnetic\\_sensors/0029/](https://www.akm.com/akm/en/product/add/magnetic_sensors/0029/)
- [20] Understanding Integrated Hall Effect Rotary Encoders. *Sensors Magazine | Sensor technology news and real-world sensor application* [online]. Newton: Questex, © 2018 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <https://www.sensormag.com/components/understanding-integrated-hall-effect-rotary-encoders>

- [21] Angular position sensing with 2-Axis Hall IC 2SA-10. *DPIA Udine | Dipartimento Politecnico di Ingegneria e Architettura* [online]. Udine: Dipartimento Politecnico di Ingegneria e Architettura, 2004 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <http://www.diegm.uniud.it/petrella/Azionamenti%20Elettrici%20II/Sensori%20e%20trasduttori/Data%20Sheet%20-%202SA-10.pdf>
- [22] High Resolution Hall Magnetic Sensors. *PROC. 29th INTERNATIONAL CONFERENCE ON MICROELECTRONICS* [online]. 2014, 69-74 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.lib.vutbr.cz/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6842087&tag=1>
- [23] Integrated Hall Magnetic Angle Sensors. *Electronic Components and Materials* [online]. 2014, **44**(4), 257-263 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <http://studylib.net/doc/18790476/integrated-hall-magnetic-angle-sensors>
- [24] Volder J.E. The CORDIC Trigonometric Computing Technique. *IRE Transactions on Electronic Computers* 1959; **8**, 330–334.
- [25] Externí sériové sběrnice SPI a I<sup>2</sup>C. *Root.cz - informace nejen ze světa Linuxu* [online]. Praha: Internet Info, 2018 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <https://www.root.cz/clanky/externi-seriove-sbornice-spi-a-i2c/>
- [26] Serial Peripheral Interface (SPI). *Welcome to Embedded Micro | Embedded Micro* [online]. Littleton: Embedded Micro, 2018 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <https://embeddedmicro.com/blogs/tutorials/serial-peripheral-interface-spi>
- [27] Back to Basics: SPI (Serial Peripheral Interface). *All About Circuits - Electrical Engineering & Electronics Community* [online]. Boise: EETech Media, 2017 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/spi-serial-peripheral-interface/>
- [28] Komunikace po sériové sběrnici I<sup>2</sup>C. *Root.cz - informace nejen ze světa Linuxu* [online]. Praha: Internet Info, 2018 [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <https://www.root.cz/clanky/komunikace-po-seriove-sbornici-isup2supc/>
- [29] I<sup>2</sup>C. *SparkFun Electronics* [online]. Niwot: SparkFun Electronics [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/i2c>
- [30] Stručný popis sběrnice I<sup>2</sup>C a její praktické využití k připojení externí eeprom 24LC256 k mikrokontroléru PIC16F877. *Vývoj.HW.cz | Vše o elektronice a programování* [online]. Praha: HW server s.r.o, 2014 [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/navrh-obvodu/strucny-popis-sbornice-i2c-a-jeji-prakticke-vyuziti-k-pripojeni-externi-eeeprom-24lc256>
- [31] *Mouser Electronics Česká republika – distributor elektronických součástek* [online]. Mansfield: Mouser Electronics, 2018 [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/>



[32] *Ams - environmental sensors, light sensors, image sensors, audio sensors, optical sensors - sensing is life* [online]. Premstaetten: ams, 2018 [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <http://ams.com/eng>

[33] *Semiconductor Solutions - Inspired Engineering #Melexis* [online]. Novi: Melexis, 2017 [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <https://www.melexis.com/en>

[34] AS5048A High-Resolution Position Sensor. *Ams - environmental sensors, light sensors, image sensors, audio sensors, optical sensors - sensing is life* [online]. Premstaetten: ams, 2018 [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <http://ams.com/eng/Products/Magnetic-Position-Sensors/Angle-Position-On-Axis/AS5048A>

[35] AS5147 Rotary Sensor. *Ams - environmental sensors, light sensors, image sensors, audio sensors, optical sensors - sensing is life* [online]. Premstaetten: ams, 2018 [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <http://ams.com/eng/Products/Magnetic-Position-Sensors/Angle-Position-On-Axis/AS5147>

[36] Download datasheet for MLX90363. *Semiconductor Solutions - Inspired Engineering #Melexis* [online]. Novi: Melexis, 2017 [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <https://www.melexis.com/en/documents/documentation/datasheets/datasheet-mlx90363>

[37] Magnet NP114 - 6Mx2x2,5 N38. *Magnet, neodymový magnet, magnetické pásky a fólie, separátory - Neomag.cz* [online]. Ostrava: PS Media [cit. 2018-04-26]. Dostupné z: <http://www.neomag.cz/cz/katalog/neodymove-magnety/prstence/magnet-np114-6mx2x2-5/>

[38] METZ, M., A. HABERLI, M. SCHNEIDER, R. STEINER, C. MAIER a H. BALTES. Contactless angle measurement using four Hall devices on single chip. In: *Proceedings of International Solid State Sensors and Actuators Conference (Transducers '97)* [online]. Chicago: IEEE, 1997, s. 385-388 [cit. 2018-05-06]. DOI: 10.1109/SENSOR.1997.613665. ISBN 0-7803-3829-4. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/613665/>