

Bakalářská práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra řídicí techniky

Inteligentní servo

Václav Veselý

Vedoucí: doc. Ing. Radoslav Bortel, Ph.D.
Studijní program: Kybernetika a Robotika
Květen 2021

Poděkování

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu docentu Ing. Radoslavu Bortelovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a za pomoc při zpracování této práce.

Prohlášení

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

V Praze, 21. května 2021

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá vývojem inteligentního serva a jeho realizací. Popisuje přitom způsoby ovládání bezkartáčového motoru. Konkrétně se zabývá vektorovým řízením a jeho zjednodušením v rámci této práce. Dále je v práci zahrnut vývoj harmonické převodovky s redukčním poměrem $-1 : 150$. Ta je následně pomocí 3D tisku realizována. V neposlední řadě je v práci zobrazen návrh a realizace řídicí elektroniky pomocí desky plošných spojů. Práce je zakončena implementací řídicího a komunikačního firmwaru. Servo je pak následně řízeno pomocí uživatelského rozhraní vytvořeného v Matlabu.

Klíčová slova: bezkartáčový motor, vektorové řízení, harmonická převodovka, inteligentní servo

Vedoucí: doc. Ing. Radoslav Bortel,
Ph.D.
Katedra teorie obvodů,
Technická 1902/2,
166 27 Praha 6

Abstract

This bachelor thesis focus on the development of intelligent servo and its implementation. It describes how to control a brushless DC motor. Specifically, it deals with field-oriented control and its simplification for this work. The thesis also includes developing a harmonic drive with a reduction ratio of $-1 : 150$, which is then manufactured using 3D printing. Last but not least, the work shows the design and implementation of control electronics using a printed circuit board. The thesis ends with the implementation of control and communication firmware. The servo is then controlled using a user interface created in Matlab.

Keywords: brushless DC motor, field-oriented control, harmonic drive, intelligent servo

Title translation: Intelligent servo

Obsah

1 Úvod	1	2.4 Výběr enkodéru	10
1.1 Motivace	1	2.4.1 Inkrementální enkodér	10
1.2 Obsah práce	1	2.4.2 Absolutní enkodér	10
2 Výběr motoru, převodovky a enkodéru	3	2.4.3 Výběr enkodéru pro projekt	13
2.1 Uvedení do problematiky	3	3 Návrh a realizace převodovky	15
2.2 Výběr motoru	3	3.1 Princip a návrh převodovky	15
2.2.1 Kartáčové motory	4	3.1.1 Generátor vln	16
2.2.2 Bezkartáčové motory	4	3.1.2 Pružný člen	20
2.2.3 Výběr motoru pro projekt	5	3.1.3 Věvec	20
2.3 Výběr převodovky	5	3.2 Realizace převodovky	21
2.3.1 Převodovka se sériově-paralelně řazeným soukolím	5	3.2.1 Složení	22
2.3.2 Planetová převodovka	6	4 Návrh a realizace řídicí elektroniky	25
2.3.3 Cykloidní převodovka	7	4.1 Použité komponenty	25
2.3.4 Harmonická převodovka	8	4.1.1 Mikrokontrolér ATSAMD51J19A	25
2.3.5 Výběr převodovky pro projekt	9	4.1.2 Budič motoru DRV8332	26
		4.1.3 Magnetický enkodér AS5048A	26
		4.1.4 Napěťové úrovně	26

4.1.5 UART komunikace	26	6.2 Praktické využití	43
4.1.6 USB	27	6.3 Doporučené změny v návrhu ...	44
4.1.7 Ostatní části	27	A Literatura	45
4.2 Schéma obvodu	27	B Zadání práce	49
4.3 Deska plošného spoje.....	29		
5 Implementace řídicího a komunikačního firmwaru	31		
5.1 Hodinový signál	31		
5.2 RGB LED signalizace	32		
5.3 Aproximace polohy	33		
5.4 Komunikační firmware.....	34		
5.4.1 UART	34		
5.4.2 SPI	34		
5.5 Řídicí firmware	35		
5.5.1 Ovládání BLDC motoru pomocí budiče DRV8332	35		
5.5.2 PID regulátor	41		
6 Závěr	43		
6.1 Zhodnocení práce	43		

Obrázky

2.1 Ukázka převodovky s paralelním převodem	6	3.6 Zobrazení finální verze generátoru vln	20
2.2 Ukázka planetové převodovky	7	3.7 Zobrazení pružného členu	21
2.3 Ukázka cykloidní převodovky	8	3.8 Zobrazení věnce	21
2.4 Ukázka harmonické převodovky	9	3.9 Zobrazení finálního modelu inteligentního serva	22
2.5 Ukázka 10-ti bitového optického disku využívající Grayův kód	11	3.10 3D řez finálním modelem inteligentního serva	23
2.6 Ukázka magnetického enkodéru s diametrálně polarizovaným magnetem	12	3.11 2D náčrt finálního modelu inteligentního serva	23
2.7 Ukázka principu kapacitního enkodéru	13	3.12 Složení spodní části serva	24
3.1 Funkční princip harmonické převodovky	16	3.13 Složení horní části serva	24
3.2 Zobrazení první verze generátoru vln	17	3.14 Složené servo	24
3.3 Zobrazení druhé verze generátoru vln	18	4.1 Schéma magnetického enkodéru AS5048A	27
3.4 Zobrazení třetí verze generátoru vln	19	4.2 Schéma inteligentního serva	28
3.5 Ukázka nastavení pozice švu	19	4.3 Vrchní vrstva PCB pro inteligentní servo	29
		4.4 Spodní vrstva PCB pro inteligentní servo	29
		4.5 Osazená deska inteligentního serva	30

4.6 PCB deska magnetického enkodéru AS5048A	30
5.1 Diagram použitých hodinových signálů	32
5.2 Fázový diagram - grafické znázornění jednotlivých veličin ...	36
5.3 Zobrazení závislosti rychlosti na úhlu natočení α pro nezatížený motor	38
5.4 Zobrazení závislosti rychlosti na úhlu natočení α pro motor zatížený převodovkou	38
5.5 Zobrazení závislosti rychlosti na úhlu natočení α pro zatížené inteligentní servo	39
5.6 Zobrazení závislosti úhlu natočení α na PWM střídě pro jednotlivá měření	40
5.7 Grafické rozhraní pro ovládání inteligentního serva - PI regulátor .	41
5.8 Grafické rozhraní pro ovládání inteligentního serva - Naladěný PID regulátor	42
5.9 Grafické rozhraní pro ovládání inteligentního serva - Rozladěný PID regulátor	42



Kapitola 1

Úvod

Cílem této práce je návrh a realizace cenově dostupného serva, které si bude moci doma vytvořit každý. Jedná se o inteligentní servo, které bude dosahovat poměrně vysokých přesností a momentů sil. Servo se bude moci libovolně kaskádně zapojit a vytvořit tak robotický manipulátor.



1.1 Motivace

Motivací pro vytvoření inteligentního serva, ze kterého půjde postavit robotický manipulátor byla možnost přiblížit robotický svět veřejnosti a lidem s podobným zájmem. Dále je to z důvodu praktického aplikování a prohloubení získaných zkušeností při studiu.



1.2 Obsah práce

Celá práce začíná uvedením do problematiky. Následuje výběr jednotlivých komponent, který tuto problematiku řeší. Převážně se jedná o výběr motoru, převodovky a enkodéru, které slouží k řízení serva. Poté je v práci zobrazen vývoj harmonické převodovky. Zde je popsán princip a funkčnost jednotlivých částí. Ty jsou pak následně vytisknuty pomocí 3D tisku. Celá převodovka je

poté složena a připojena k bezkartáčovému motoru. Modelu je následně vybaven navrženou elektronikou. Ta je důkladně popsána a doplněna informacemi o fungování jednotlivých částí. Poté je vytvořen řídicí a komunikační firmware. Zde je popsána funkčnost celého modelu a jednotlivá komunikační rozhraní. Dále je stručně vysvětlen princip vektorového řízení a jeho zjednodušení pro tuto práci. Ten je následně doplněn experimentálním měřením fázového posunu mezi napětím a fázovými proudy. Práce je zakončena uživatelským rozhraním vytvořeným v Matlabu. To slouží k řízení a nastavení inteligentního serva. Respektive se jedná o nastavení úhlu a maximální velikosti otáček u serva a poté jednotlivých PID konstant regulátoru. Na závěr je práce zhodnocena a doplněna jednotlivými nedostatky. Následně je na ně navržené i jejich řešení.

Kapitola 2

Výběr motoru, převodovky a enkodéru

V této kapitole se budu zabývat problematikou celého projektu a následným výběrem komponent, který tuto problematiku bude řešit. U jednotlivých komponent následně popíši důvod jejich volby.

2.1 Uvedení do problematiky

V průmyslu se silné zpětnovazební servopohony pohybují v řádu desetitisíců korun. Navíc ke svému ovládní většinou vyžadují vysoké napětí a proudy. Cílem této práce je vytvoření inteligentního serva, které bude těmto servopohonům konkurovat. Hlavním kritériem je snížit cenu serva a přiblížit tak servopohon veřejnosti. Dalším důležitým kritériem je dosažení dostatečné přesnosti a velkého momentu sil. V neposlední řadě je důraz na použití takových proudů a napětí, které nejsou pro člověka nebezpečné.

2.2 Výběr motoru

Jelikož je v tomto projektu předpokládána práce jen se stejnosměrným napětím, budu se věnovat jen motorům, které s tímto napětím pracují.

pólové dvojice pak vytváří pohyblivé magnetické pole. Rotor krokového motoru se s tímto polem zarovnává. Krokové motory mají většinou velké množství těchto pólových dvojic a umožňují tak přesné řízení polohy bez zpětné vazby. Jednou z nevýhod tohoto krokového řízení je nutnost přivedení proudu na jednotlivé pólové dvojice, i když se motor nachází v klidové poloze. Jinak totiž může dojít ke ztrátě kroků. Při takovémto řízení tedy dochází k velké spotřebě energie. Samozřejmě se dá krokový motor řídit pomocí enkodéru podobně jako BLDC motor, ale z hlediska konstrukce a velké váhy motoru se nejedná o optimální řízení. Výhodou krokových motorů je velmi vysoký přídržný moment, poměrně snadné ovládání a při dobrém řízení i vysoká opakovatelnost kroků.

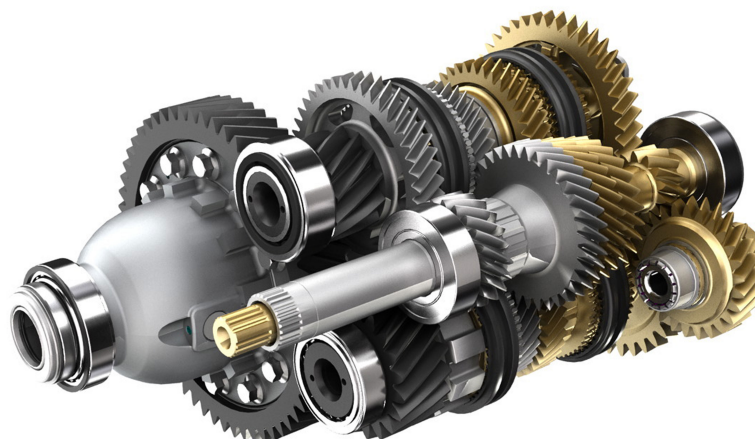
■ 2.2.3 Výběr motoru pro projekt

Velké množství profesionálních servopohonů využívá k řízení kartáčové motory. Je to z důvodu velmi nízkých cen a poměrně jednoduchého ovládání. Já jsem však zvolil motor bezkartáčový. Konkrétně přímo BLDC motor. Vybral jsem si ho z toho důvodu, že je velmi účinný. Má výbornou dynamiku a navíc dosahuje nejmenších hmotností. Jeden z dalších hlavních důvodů bylo velmi složité řízení, které vedlo na možnost prohloubení doposud získaných zkušeností.

■ 2.3 Výběr převodovky

■ 2.3.1 Převodovka se sériově-paralelně řazeným soukolím

Mezi tyto typy řadím veškeré převodovky, které se skládají z ozubených kol sériově či paralelně zapojených za sebe. Každé ozubené kolo, zde pomáhá zvýšit nebo snížit daný převod. Jednou dvojicí ozubených kol lze většinou realizovat převod s velikostí 1 až 10.

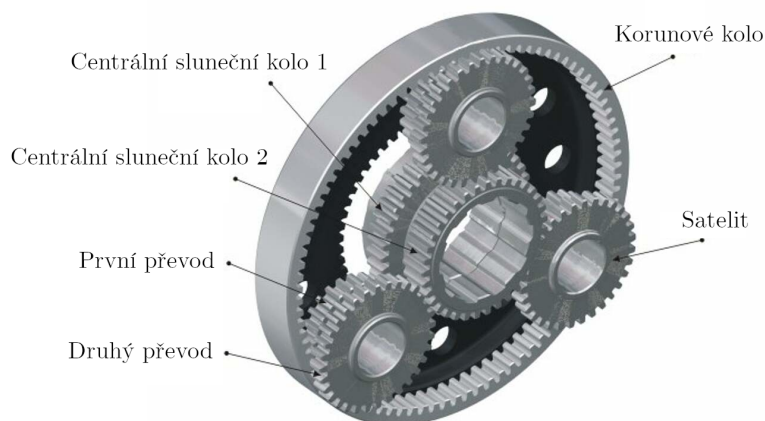


Obrázek 2.1: Ukázka převodovky s paralelním převodem
Převzato z [Wor21]

Tyto ozubené převodovky jsou jednoduché na výrobu, a proto dosahují i nižších cen. Mezi jejich nevýhody patří větší rozměry, menší momentová síla a menší přesnost. Ta je dána vůlí jednotlivých ozubených kol [IMK].

■ 2.3.2 Planetová převodovka

Jak je na obrázku 2.2 vidět, skládá se planetová převodovka ze soustavy ozubených kol s unašečem. Uprostřed soustavy je takzvané centrální sluneční kolo. To obíhá soustava satelitů, která je uzavřena korunovým kolem. Satelity jsou volně uloženy na unašeči, který je souosý s centrálním ozubeným kolem. Planetová převodovka se obecně používá jako diferenciál s dvěma stupni volnosti. Zabrzděním jednotlivých součástí planetové převodovky se mění rychlost, popřípadě i směr otáčení.

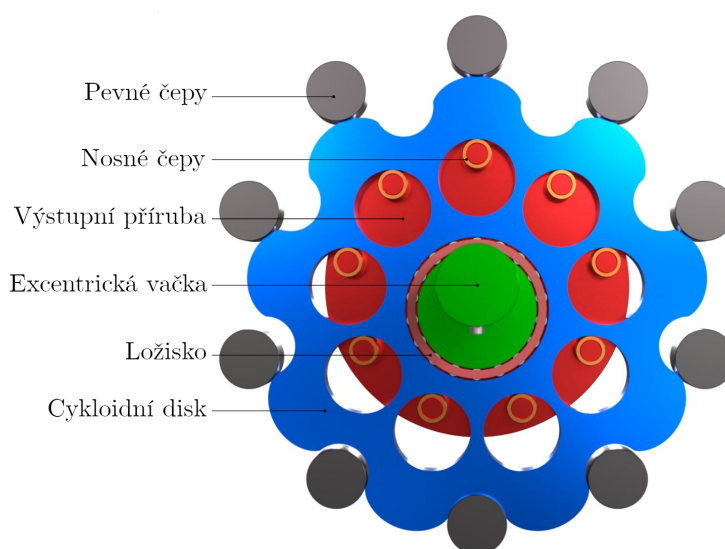


Obrázek 2.2: Ukázka planetové převodovky
Převzato z [Roh]

Jak je z modelu vidět, nejedná se o lehkou konstrukci. Celá převodovka je, kvůli vysokým požadavkům na přesnost, náročná na výrobu a velmi drahá. Na rozdíl od převodovky se sériově-paralelně řazeným soukolím je celá konstrukce více robustní. Dosahuje nižších hmotností a většího převodu na menším prostoru. Zároveň u planetové převodovky dochází k většímu kontaktu mezi jednotlivými koly a tudíž dosahuje mnohem větších momentových sil [Kub12].

■ 2.3.3 Cykloidní převodovka

Cykloidní převodovka je tvořena excentrickou vačkou, která je upnutá na vstupní hřídeli. Jak se vstupní hřídel otáčí, tak pohybuje s cykloidním diskem, který je nasazený na excentrickou vačku. Celý disk se pak odvaluje po vnitřním válečkovém ozubení. Na cykloidním disku jsou rovnoměrně vyvrtnané otvory. Ty pomocí nosných čepů slouží k přenosu rotačního pohybu na výstupní přírubu.

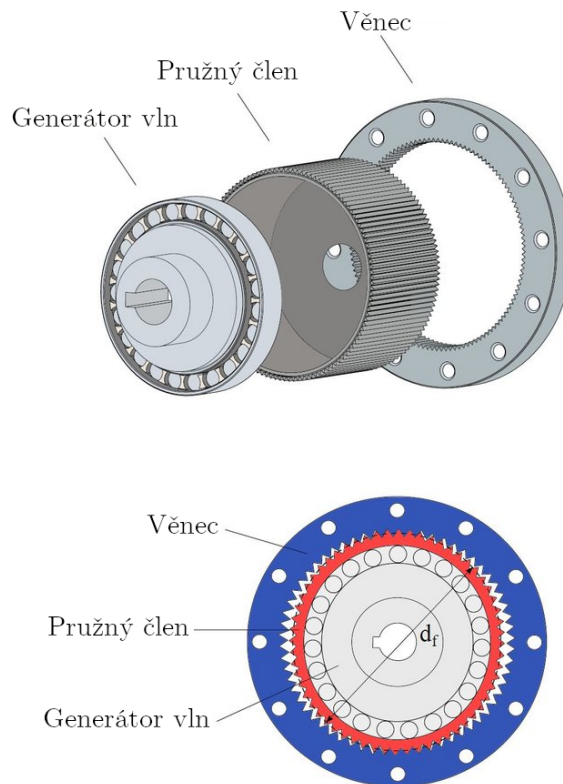


Obrázek 2.3: Ukázka cykloidní převodovky
Převzato z [TS21]

Geometrie celé cykloidní převodovky je velice náročná. Celá převodovka je velice citlivá na přesnost výroby a tudíž velmi drahá. Má však značné množství výhod. Převodovka dosahuje vysokého převodového poměru až 119:1. Zajišťuje přenos velkých kroutících momentů. Díky příznivějšímu tvaru boční křivky zubu dosahuje výjimečné životnosti. Je ideální pro aplikace, kde dochází k rázovému přetížení. Má velmi malou mechanickou vůli [Ná08].

2.3.4 Harmonická převodovka

Harmonická převodovka se skládá ze třech prvků. Prvním z nich je takzvaný generátor vln. Jedná se o eliptické ložisko, které je zasazené do pružného členu. Pružný člen je ozubené kolo s kruhovým tvarem. Při zasazení a následném otáčením generátoru vln, tak dochází k deformaci pružného členu. Celý pružný člen je pak zasazen do věnce. Ten má vždy o 2 zuby více než pružný člen. Jelikož je pružný člen zdeformovaný, zapadají jeho zuby do mezer věnce v místech hlavní eliptické osy. Při otáčení generátoru vln se pak posouvá hlavní eliptická osa a tím se posouvá i pružný člen. Při otočení generátoru vln o jednu otočku se pružný člen posune vůči věnci o 2 zuby.



Obrázek 2.4: Ukázka harmonické převodovky
Převzato z [SCLG⁺19]

Harmonické převodovky dosahují vysokého převodového poměru při malých rozměrech, až 160:1. Mají jednu z nejvyšších účinností a to až 90%. Jedna z jejich hlavních předností je, že mají téměř nulovou vůli [Bru08]. Jsou tudíž velmi přesné. Dokážou přenést velmi velký moment sil. Nevýhodou je jejich cena a citlivost na přesnost výroby.

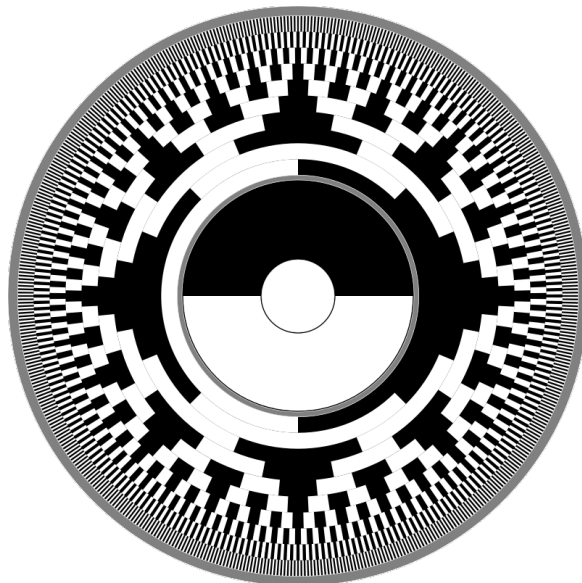
V porovnání s cykloidními převodovkami jsou účinnější, více přesné a mnohem lehčí. Mají však menší životnost, snášejí menší rázové přetížení a nedokáží přenést tak veliký moment sil [Bru08].

■ 2.3.5 Výběr převodovky pro projekt

Jelikož jeden z hlavních požadavků pro tento projekt byla co největší možná přesnost, rozhodoval jsem se rovnou mezi převodovkami cykloidními a har-

■ Optický enkodér

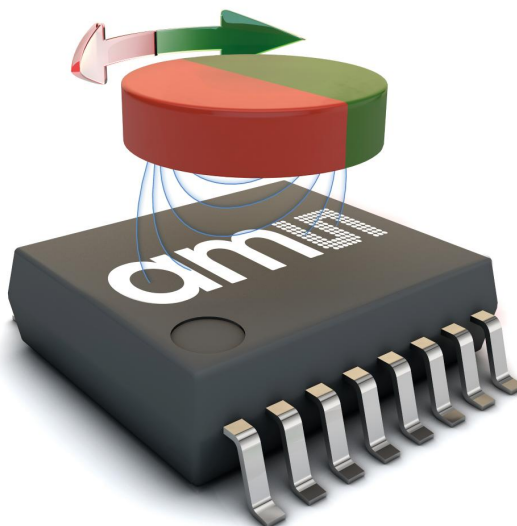
Absolutní optické enkodéry využívají optické disky, na kterých je zakódována aktuální úhlová pozice. Většinou se k tomu používá takzvaný Grayův kód a nebo binární kód. Poloha se pak z disku snímá pomocí soustavy ledek a fototranzistorů. Počet fototranzistorů pak určuje rozlišení celého enkodéru. Tyto enkodéry dosahují velice vysokých přesností. Nedopouštějí se žádných odchylek. Jsou však velmi drahé a náchylné na prach a poškození.



Obrázek 2.5: Ukázka 10-ti bitového optického disku využívající Grayův kód
Převzato z [ric18]

■ Magnetický enkodér

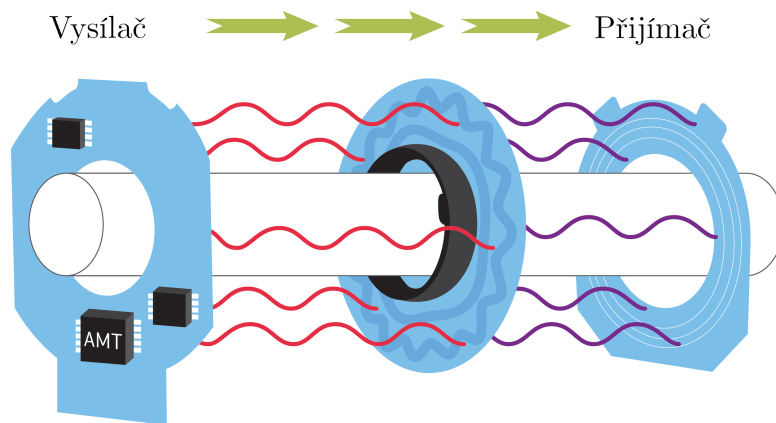
Magnetické enkodéry snímají úhel natočení magnetického pole. Využívají k tomu diametrálně polarizované magnety. Jedná se o bezkontaktní měření. Na rozdíl od optických enkodéru obsahují menší množství mechanických dílů, které by se mohli poškodit. Tyto enkodéry jsou tedy velmi robustní. Navíc dosahují velmi malých rozměrů. Už při velmi nízkých cenách dosahují vysokého rozlišení. Jejich hlavní nevýhodou je jejich nelinearita a náchylnost na rušení.



Obrázek 2.6: Ukázka magnetického enkodéru s diametrálně polarizovaným magnetem Převzato z [AG21]

■ Kapacitní enkodér

Kapacitní enkodéry se většinou skládají ze třech hlavních součástí. První z nich je vysílač, který vysílá vysokofrekvenční referenční signál. Ten se přes rotor, který obsahuje vyleptaný sinusový vzor, předvídatelným způsobem moduluje. Takto zmodulovaný signál je pak zaznamenán přijímačem, který ho dále demoduluje na aktuální pozici [Col15]. Kapacitní enkodéry dosahují o něco menšího rozlišení než enkodéry optické. Jsou ale mnohem robustnější. Na rozdíl od enkodérů magnetických je jejich závislost na poloze také lineární. Na logaritmické stupnici jsou cenově přibližně mezi optickými a magnetickými enkodéry.



Obrázek 2.7: Ukázka principu kapacitního enkodéru.
Převzato z [Smo16]

■ 2.4.3 Výběr enkodéru pro projekt

Pro tento projekt potřebuji celkem dva enkodéry. Jeden pro měření absolutní pozice serva a druhý k ovládní BLDC motoru. Nejlepší volbou pro měření absolutní pozice serva je enkodér kapacitní. Ten dosahuje takového rozlišení, které je pro řízení serva plně optimální. Navíc je v porovnání s optickými enkodéry mnohonásobně levnější, robustnější, dosahuje menších rozměrů a je programovatelný. Jelikož jsem však chtěl projekt přiblížit více veřejnosti, zvolil jsem enkodér magnetický. Jedná se o enkodér značky AS5048A. Ten dosahuje při rozlišení 14 bitů desetkrát nižší cenu než enkodér kapacitní. Jedinou nevýhodou této volby je nelinearita celého enkodéru. Ta dosahuje v nejhorší možné situaci až 1.2 stupně [AMS18]. To jsem plánoval pomocí aproximace obou hodnot z enkodérů viz podkapitola 5.3 potlačit. Pro řízení BLDC motoru jsem zvolil ten samý enkodér.

Kapitola 3

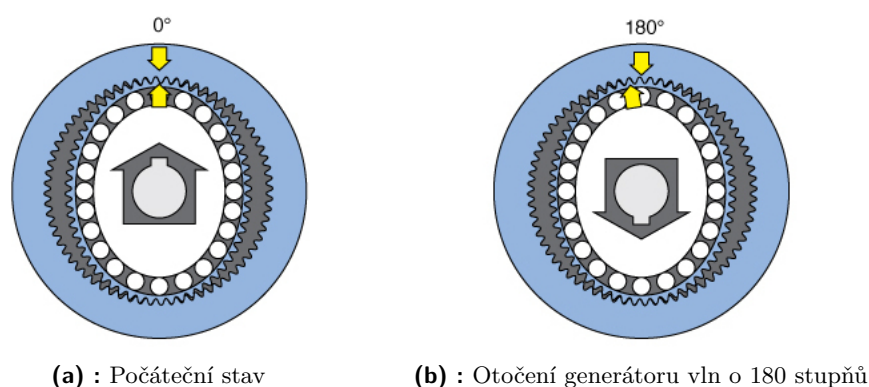
Návrh a realizace převodovky

V této kapitole nejdříve vysvětlím princip jednotlivých částí harmonické převodovky. Následně na to jednotlivé části vytvořím a celou převodovku zkompletuji.

3.1 Princip a návrh převodovky

Harmonická převodovka se viz podkapitola 2.3.4 skládá ze třech hlavních částí. Z eliptického generátoru vln, pružného členu a věnce. Otáčením generátoru vln se postupně posouvá hlavní eliptická osa a tím se posouvá i pružný člen [Dri19]. Při otočení generátoru o 180 stupňů se posune pružný člen vůči věnci o 1 zub. To je zobrazené na obrázku 3.1. Ve svém designu jsem zvolil harmonickou převodovku se statickým věncem. Redukční poměr se poté vypočte dle vztahu 3.1.

Jednotlivé díly jsem namodeloval tak, aby se pomocí pár proměnných dal celý poměr rychle změnit. Ve své práci uvádím pružný člen, který obsahuje 60 zubů a věnec, který má zubů 62. Výsledný redukční poměr samotné harmonické převodovky je tedy $-1 : 30$ viz rovnice 3.2. Jelikož jsem však vyráběl harmonickou převodovku s dutou hřídelí, potřeboval jsem motor umístit mimo osu převodovky. Motor viz podkapitola 3.2 napojuji na převodovku řemenem a získávám tak celkový redukční poměr $-1 : 150$.



Obrázek 3.1: Funkční princip harmonické převodovky
Převzato z [LLC21]

$$\text{Redukční poměr} = \frac{\text{počet zubů pružného členu} - \text{počet zubů věnce}}{\text{počet zubů pružného členu}} \quad (3.1)$$

$$\text{Redukční poměr} = \frac{60 - 62}{60} = -\frac{1}{30} \quad (3.2)$$

■ 3.1.1 Generátor vln

Generátor vln je jedna z nejdůležitějších částí celé převodovky. Jedná se o eliptické ložisko, které je uloženo v pružném členu. Toto ložisko pak otáčením deformuje pružný člen, který se pak ve věnci otáčí. Z hlediska geometrie se musí dodržet dvě věci. Za prvé to, aby byl celkový obvod eliptického ložiska roven obvodu pružného členu. A za druhé, aby hlavní eliptická osa zdeformovala pružný člen ve věnci tak, aby docházelo k minimální, popřípadě nulové, vůli.

Jednotlivé modely generátorů vln jsem testoval jak při zasazení do převodovky, tak při volném pohybu v ruce. Při zasazeném modelu v převodovce jsem testoval celkovou sílu potřebnou k otočení a pak celkovou vůli převodovky. Při otáčení v ruce jsem zkoušel celkové tření generátoru a pohyblivost jednotlivých ložisek. Z nedostatku měřících přístrojů a v důsledku nedokonalosti 3D tisku jsou uvedené informace pouze orientační.



(a) : Pohled shora

(b) : Pohled ze strany

Obrázek 3.2: Zobrazení první verze generátoru vln

■ První verze

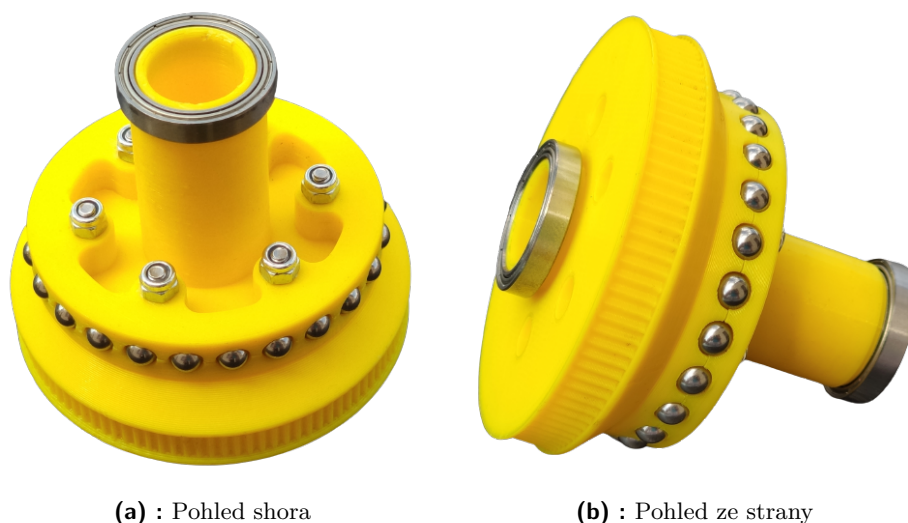
Pro první návrh generátoru vln 3.2 jsem využil ložisek SMR93ZZ. Ty jsem rovnoměrně umístil na eliptické dráze. Z hlediska velkého průměru ložiska a rychle narůstající hmotnosti modelu jsem použil menší počet ložisek. Z toho důvodu není elipsa moc spojitá, ale je rozdělena na poměrně velké diskrétní části. Jediný vliv to mělo na celkový obvod elipsy, který musel být nepárně větší než obvod u pružného členu. U ostatních modelů k tomu už nedocházelo.

Při zasazení do převodovky měl model poměrně malé tření. Často se však při otáčení zadržával. Převodovka navíc nedosahovala nulové vůle. To jsem vyřešil viz podkapitola 3.1.1. Při protáčení v ruce bylo znát, že má model malé množství ložisek a neprotáčel se tak dobře.

■ Druhá verze

Ve druhé verzi návrhu 3.3 jsem využil ložiskových kuliček s průměrem 5 milimetrů. Tyto kuličky jsem jako v předchozím případě umístil na eliptickou dráhu. Jelikož však mají kuličky menší průměr a nevyžadují k uchycení matice a šrouby, použil jsem jich více. Získal jsem díky tomu mnohem přesnější model eliptického ložiska.

Při zasazení do převodovky měl model trošku větší tření než model před-



Obrázek 3.3: Zobrazení druhé verze generátoru vln

chozí. Dosahoval ale na druhou stranu téměř nulové vůle. Při dlouhodobějším používání se na modelu pružného členu začala objevovat vyrytá linka od kuličkových ložisek. Při otáčení v ruce se model protáčet mnohem lépe než model předchozí.

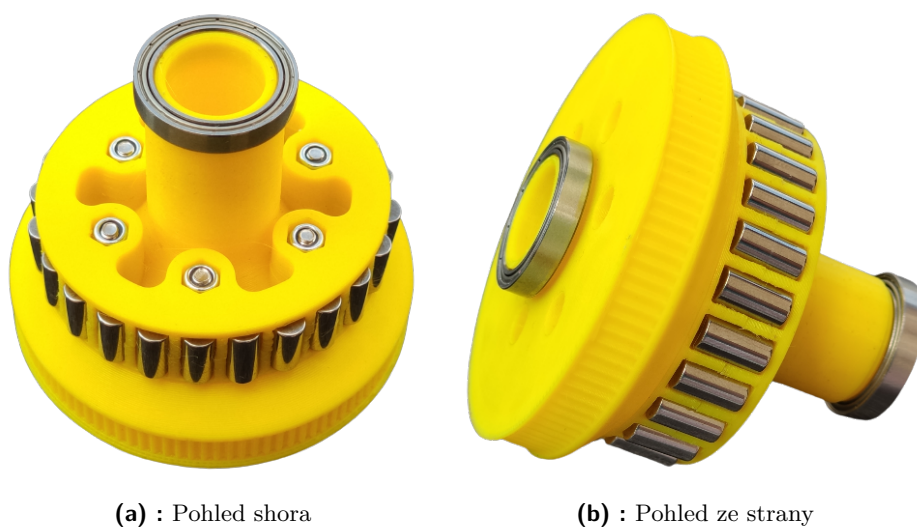
■ Třetí verze

U třetí verze 3.4 jsem nahradil ložiskové kuličky ložiskovými válečky. Použil jsem stejný počet válečků jako kuliček. Válečky jsou dlouhé 10 milimetrů a mají průměr 5 milimetrů. Mají tedy mnohem větší styčnou plochu.

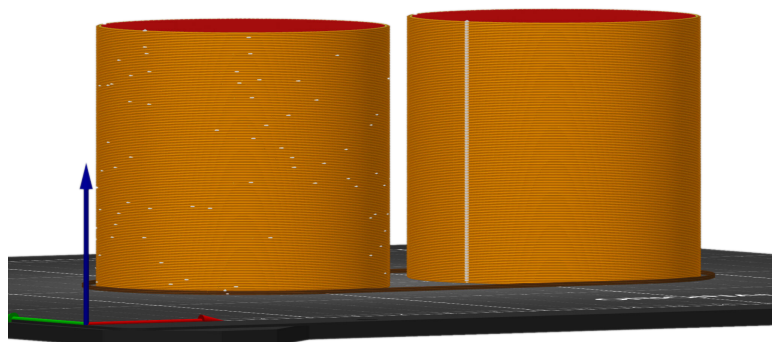
Ačkoliv se model v ruce protáčet ze všech generátorů vln nejlépe, při zasazení do převodovky dosahoval největšího tření. Při otáčení se pružný člen po ložiskových válečkách neodvaloval, nýbrž po nich klouzal. Nepomohlo tomu ani zvyšování obvodu na pružném členu a tak snižování tlaku, který na válečky působí.

■ Finální verze

U finální modelu jsem vycházel z první verze 3.1.1. Ta dosahovala na rozdíl od všech ostatních nejmenšího tření při zasazení do převodovky. Tato verze byla následně vylepšena získanými zkušenostmi. Zadrhávání modelu bylo



Obrázek 3.4: Zobrazení třetí verze generátoru vln



Obrázek 3.5: Ukázka nastavení pozice švu
Převzato z [Bas21]

vyřešeno jiným nastavením tisku. Ve výchozím nastavení tisku je pozice švu nastavená na mód "Nejbližší". Při takovémto nastavení se na pružném členu objevil šev, o který se ložiska sekala. Toto nastavení bylo změněno na režim "Náhodný". Tiskárna při tomto výběru vždy vybere pro každou vrstvu jiný počáteční bod. Výsledkem toho je bezešvý povrch za cenu méně hladkého povrchu [Bas21]. To je zobrazené na obrázku 3.5. Díky tomu už nedocházelo k zasekávání ložisek o šev.

Nulovou vůli jsem následně vyřešil prodloužením hlavní eliptické osy. Finální model generátoru vln je zobrazen na obrázku 3.6.



(a) : Pohled shora

(b) : Pohled ze strany

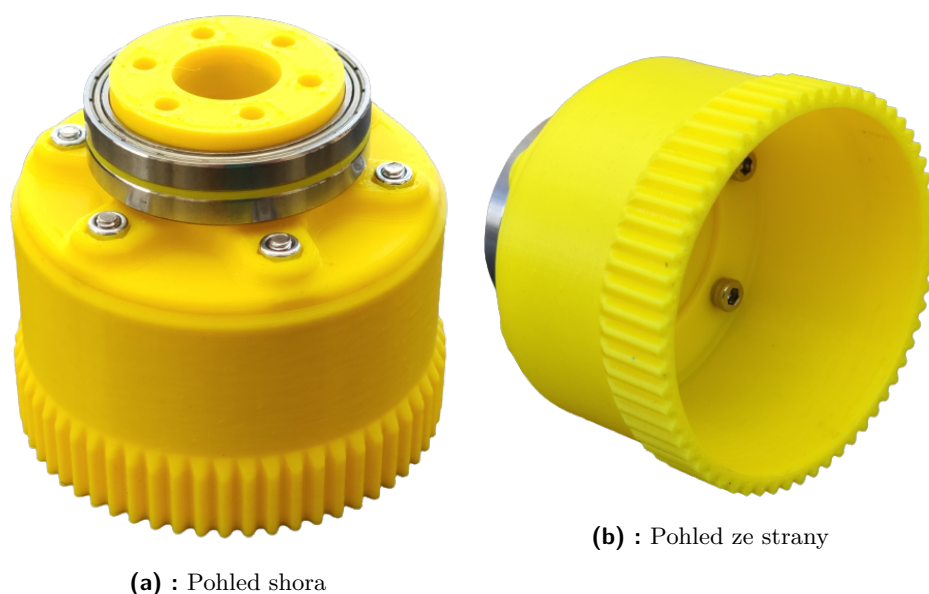
Obrázek 3.6: Zobrazení finální verze generátoru vln

■ 3.1.2 Pružný člen

Jedná se o válcovité pružné těleso s vnějším ozubením. Při deformaci generátorem vln se v místě hlavní eliptické osy zuby vsunou mezi zuby věnce. V místě vedlejší eliptické osy se naopak zuby z věnce vysunou. Z hlediska geometrie je důležité dodržet průměr pružného členu takový, aby se v místě vedlejší eliptické osy zuby nedotýkaly zubů věnce. To je zobrazené na obrázku 2.4 červenou barvou. Další důležitá věc je celková tloušťka pružného členu. Ta by měla být natolik malá, aby byl člen dostatečně pružný a dobře se deformoval. Ale ne natolik malá, aby se při přenášení větší momentové síly pružný člen nezničil. Pro tento projekt jsem stanovil optimální tloušťku stěny 1.7 milimetrů. Celkový model je zobrazen na obrázku 3.7.

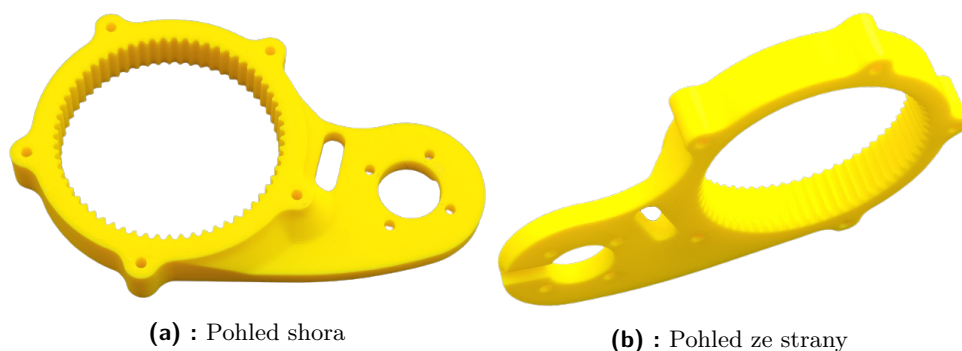
■ 3.1.3 Věnc

Věnc tvoří vnější plášť celé převodovky. Skládá se z tuhého tělesa s vnitřním ozubením. Jeho průměr určuje velikost celého serva. Z hlediska geometrie je důležité dodržet to, aby byl počet zubů vždy o dva větší než u pružného členu.



(a) : Pohled shora

(b) : Pohled ze strany

Obrázek 3.7: Zobrazení pružného členu

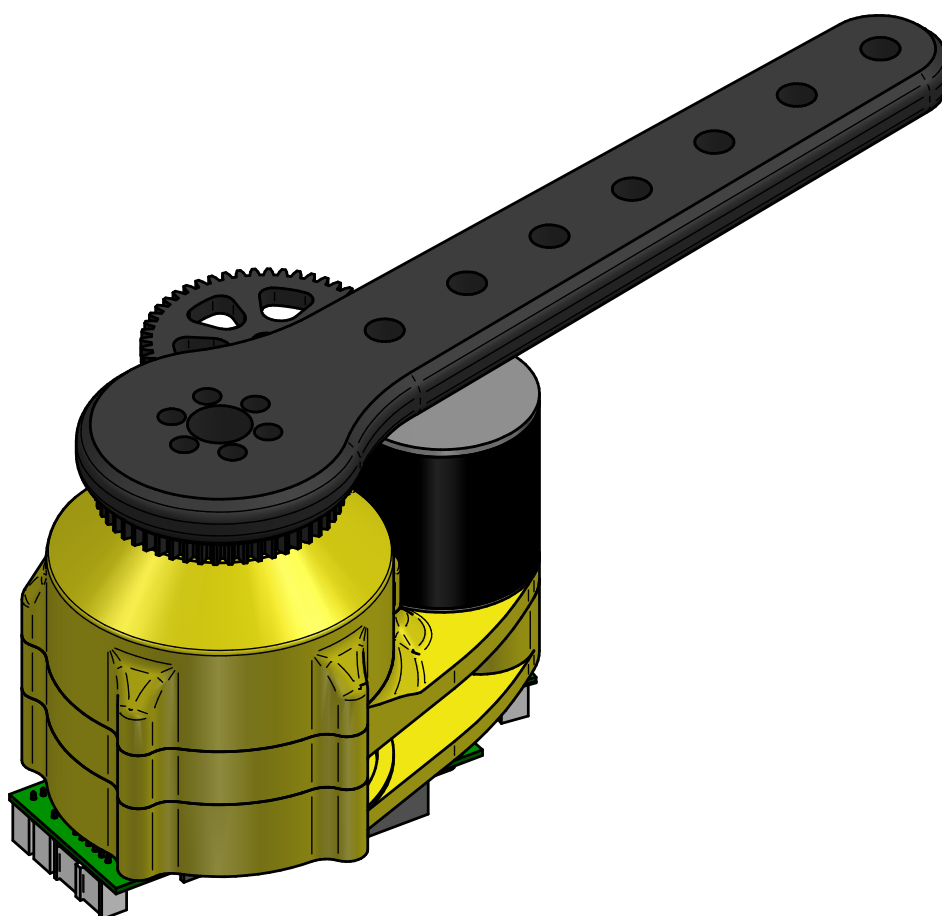
(a) : Pohled shora

(b) : Pohled ze strany

Obrázek 3.8: Zobrazení věnce

3.2 Realizace převodovky

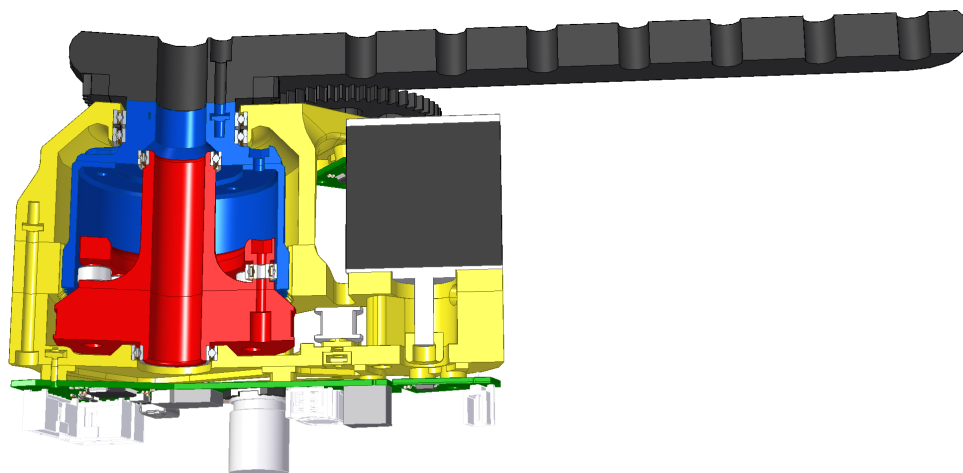
Na obrázku 3.9 je zobrazený finální model inteligentního serva. Na obrázku 3.10 je pak zobrazený řez 3D modelem. Červenou barvou je zde zobrazený generátor vln 3.6, modrou barvou pružný člen 3.7 a žlutou barvou věnec 3.8 a celkový plášť serva. Na obrázku 3.11 je pak tento řez zobrazený ve 2D nákresu. Jak je z obrázků vidět, je celá převodovka navrhována s dutou hřídelí. To je zamýšleno pro budoucí využití na robotický manipulátor. Serva se viz podkapitola 5.4.1 dají napojovat na sebe. Dutá hřídel slouží k tomu, aby se mohly serva nezávazně otáčet a nezničit si přitom kabely. Motor je tedy připevněný mimo osu otáčení a je na ni přiveden pomocí gumového řemene GT2. Gumový řemen je poté možné libovolně napnout.



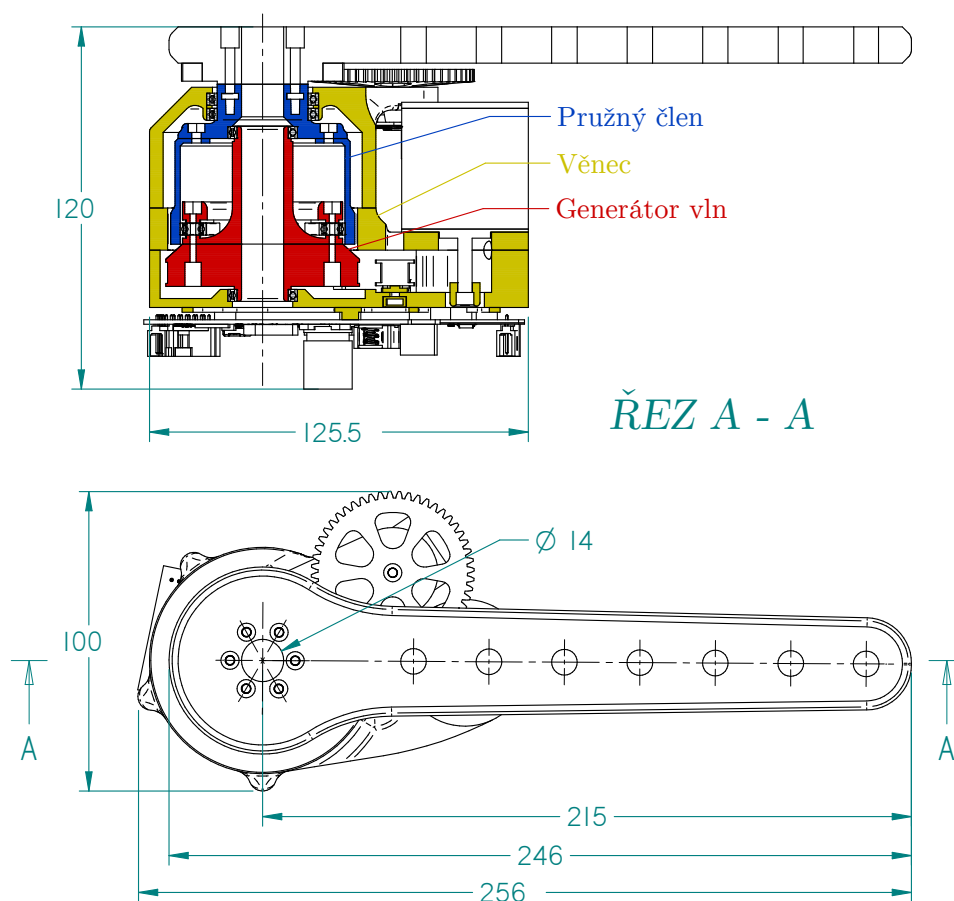
Obrázek 3.9: Zobrazení finálního modelu inteligentního serva

■ 3.2.1 Složení

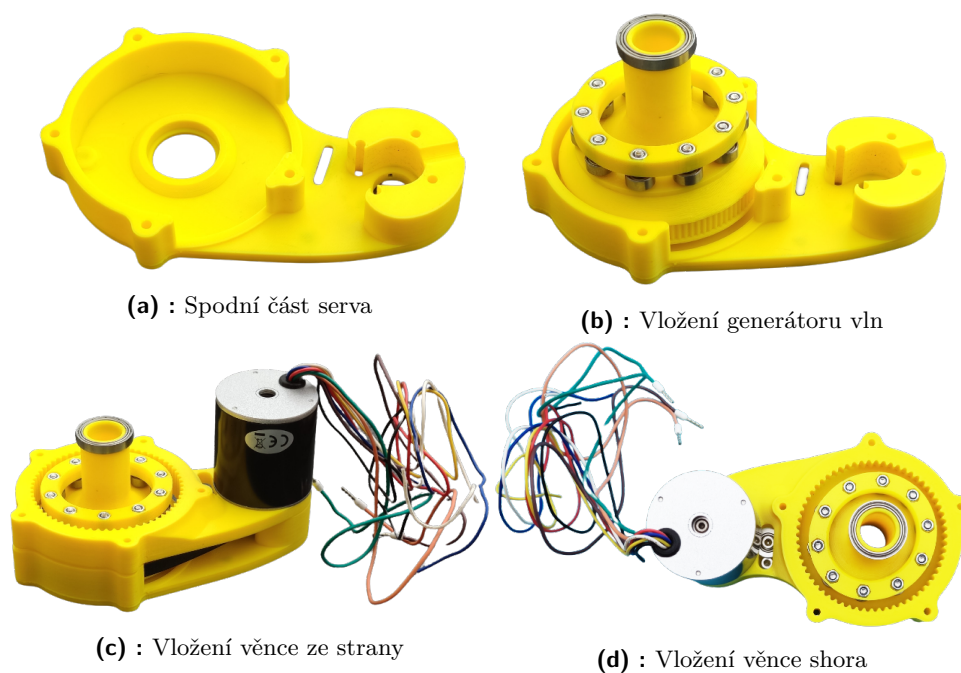
Celkový model se skládá z 19 dílů tištěných na 3D tiskárně Original Prusa i3 MK3S. Jednotlivé díly jsou vytištěné ze žlutého Prusament PLA filamentu. Rameno je tištěné z černého Prusament PETG filamentu. Na obrázcích 3.12 je zobrazen průběh složení spodní části serva. Pro ukotvení generátoru vln na osu otáčení byly použity ložiska 6703ZZ. Pro ukotvení pružného členu do horní části serva 3.13 jsem využil ložisek 6706ZZ. Na obrázcích je dále znázorněno převádění absolutní polohy serva mimo osu otáčení. Celkový model inteligentního serva je zobrazený na obrázcích 3.14.



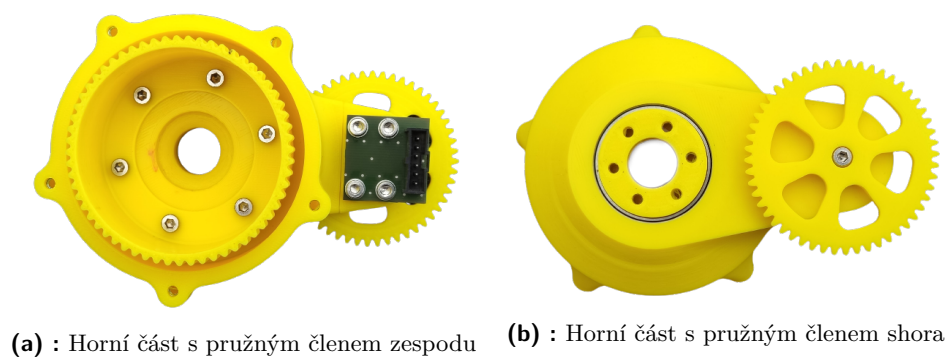
Obrázek 3.10: 3D řez finálním modelem inteligentního serva



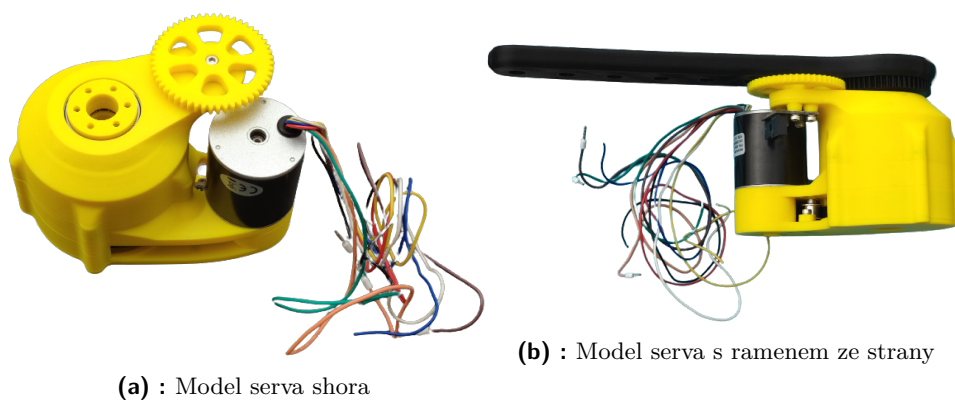
Obrázek 3.11: 2D náčrtek finálního modelu inteligentního serva



Obrázek 3.12: Složení spodní části serva



Obrázek 3.13: Složení horní části serva



Obrázek 3.14: Složené servo

Kapitola 4

Návrh a realizace řídicí elektroniky

V této kapitole se zaměřím na jednotlivé komponenty použité v obvodu. Zmíním jejich funkce a způsob ovládání. Dále popíši jednotlivé napěťové úrovně, které se v obvodu nacházejí. Závěrem zobrazím schéma obvodu a jednotlivé vrstvy desky plošných spojů. V kapitole 5 poté vysvětlím funkčnost celého obvodu.

4.1 Použité komponenty

4.1.1 Mikrokontrolér ATSAM51J19A

Jedná se o mikrokontrolér používající 32-bitový ARM® Cortex®-M4 procesor. Jádro mikrokontroléru dokáže běžet až na 120 MHz. Obsahuje 51 vstupně-výstupních pinů. Dále obsahuje 24-bitový čítač se šesti porovnávacími kanály. Tento čítač dokáže běžet až na frekvenci 200 MHz. Je tedy vhodný pro vytváření vysokofrekvenční pulsně šířkové modulace s vysokým rozlišením [MIC21].

■ 4.1.2 Budič motoru DRV8332

Jedná se o výkonný třífázový budič motoru. Tento budič dokáže pracovat až s 500 kHz spínací frekvencí. Napětí u motoru může dosahovat až 50 V s průběžným proudem na jedné fázi kolem 8 A. Tento budič je vhodný na ovládání téměř jakéhokoliv malého bezkartáčového motoru. Se správným řízením může dosahovat účinnosti až 97 %. V obvodu je použit s napěťovým regulátorem NCV8674DS120G. Ten umožňuje vstupní napětí maximálně 45 V. Dále jsem budič omezil na maximální proud 5 A.

■ 4.1.3 Magnetický enkodér AS5048A

Jedná se o absolutní magnetický rotační enkodér s udávaným rozlišením 14 bitů. Tento enkodér poskytuje výstup pomocí pulsně šířkové modulace, I²C a SPI. Já se rozhodl používat 16-bitové SPI rozhraní. Toto rozhraní používám na hodinové frekvenci 32 MHz, což je frekvence externího oscilátoru.

■ 4.1.4 Napěťové úrovně

Vstupní napětí do desky limituje první napěťový regulátor NCV8674DS120G. Ten je omezený na maximální vstupní napětí 45 V. Toto napětí je dále přivedeno na budič motoru DRV8332, který pomocí něj řídí motor. Výstupem regulátoru je 12 V, které slouží jako zdroj napětí pro budič. Dále je na výstup připojen regulátor napětí LDK220U33R. Ten vytváří výstup o hodnotě 3.3 V, který slouží jako zdroj napětí pro mikrokontrolér. Pro vytvoření napěťové úrovně pro UART používám regulátor LDK320ADU50R. Ten slouží k vytvoření napětí o hodnotě 5 V.

■ 4.1.5 UART komunikace

Pro minimalizaci kabelů vedených mezi jednotlivými servy jsem zvolil polo-
viční duplex. Ten jsem zapojil jak do sběrnice topologie tak do zřetězené topologie. Ve finálním modelu bych viz podkapitola 5.4.1 využil topologie obě. Pro vytvoření více robustní komunikace jsem hladinu napětí posunul pomocí řízeného dvoucestného převodníku úrovní SN74LVC1T45DBVR na hladinu 5V.

4.1.6 USB

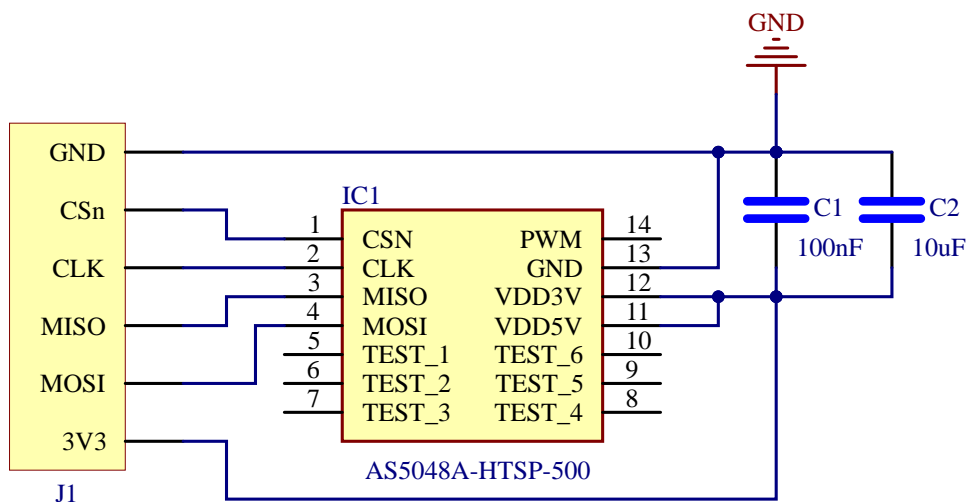
Pro přenos dat mezi servem a počítačem využívám univerzální sériovou sběrnici. Tu jsem odstínil pomocí RC filtru a ESD ochranných diod.

4.1.7 Ostatní části

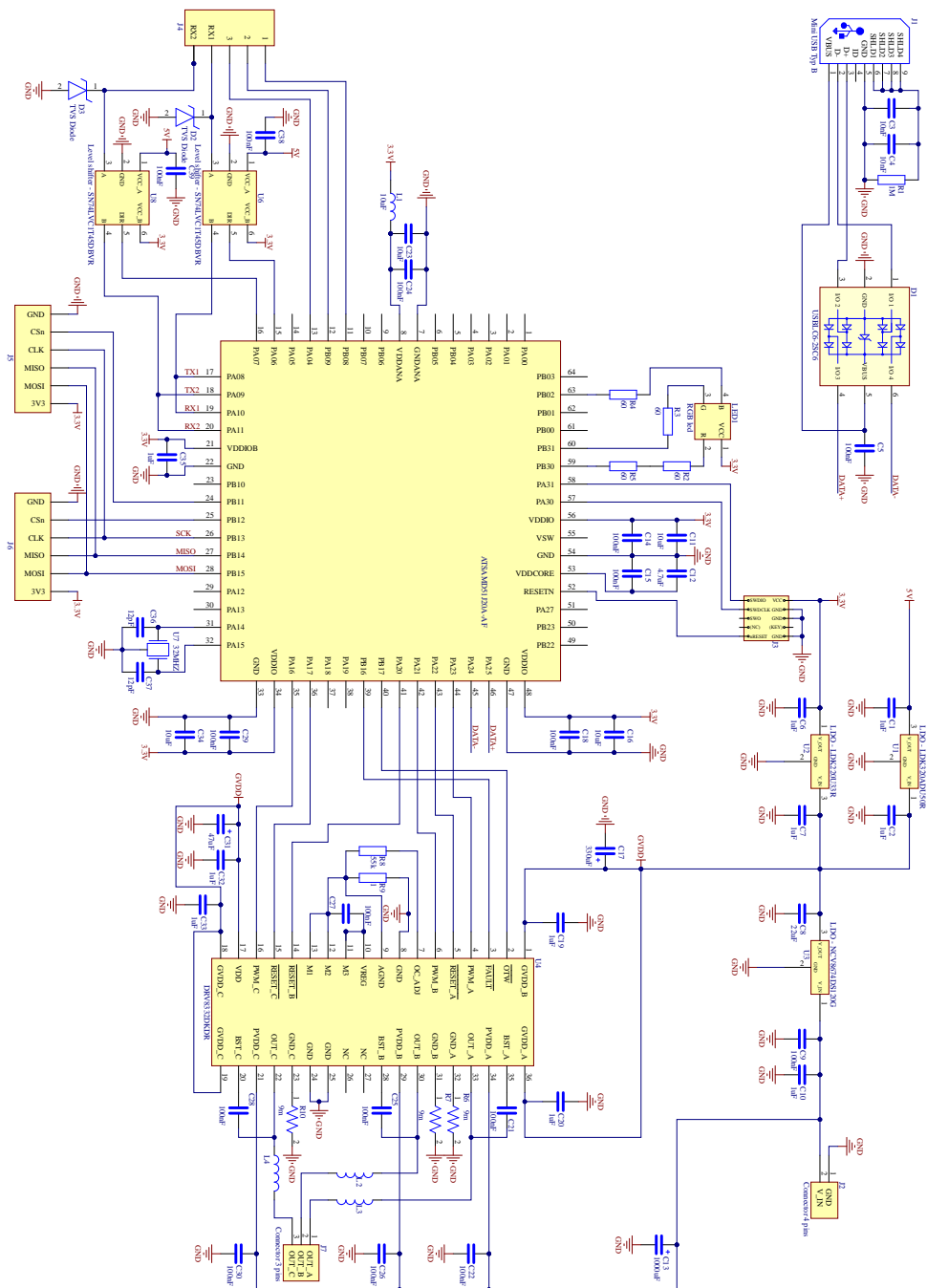
Jako zdroj hodin pro celé servo používám externí krystalový oscilátor s frekvencí 32 MHz. Dále využívám signalizační RGB LED diodu HSMF-C116. Konektory jsem zvolil z řady C-Grid III 90136 a COMBICON.

4.2 Schéma obvodu

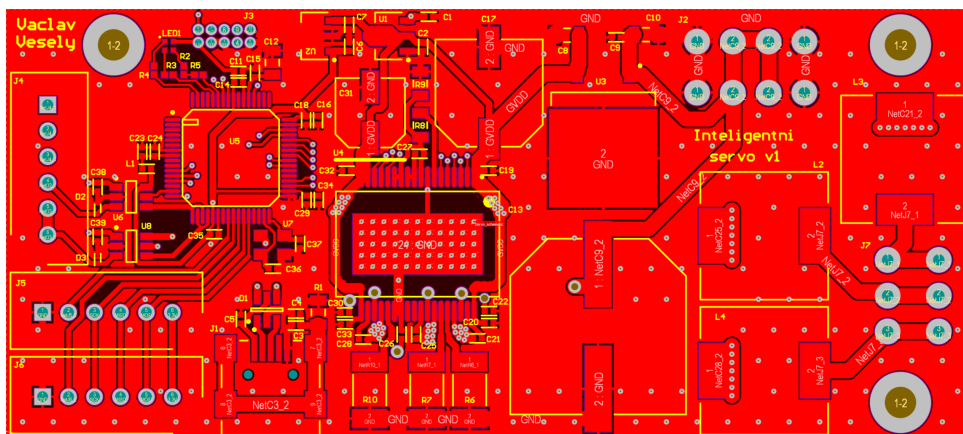
Na obrázku 4.1 je zobrazeno zapojení magnetického enkodéru AS5048A. Na obrázku 4.2 je zobrazeno schéma celého obvodu.



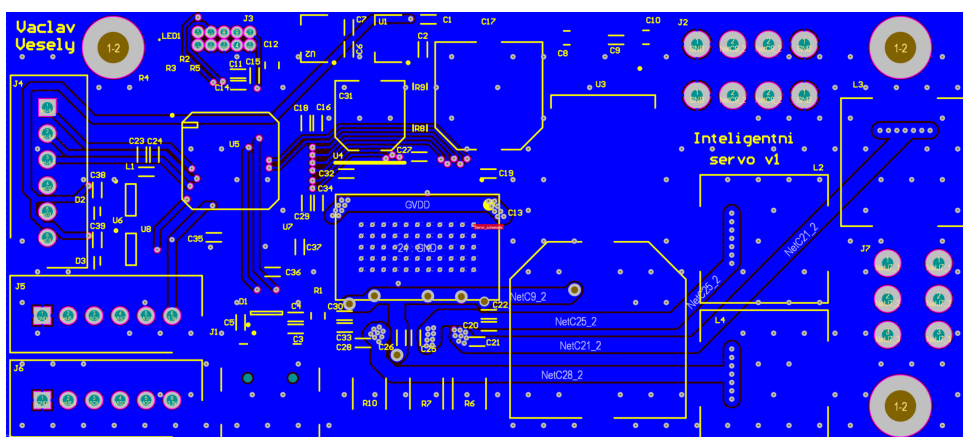
Obrázek 4.1: Schéma magnetického enkodéru AS5048A



Obrázek 4.2: Schéma inteligentního serva



Obrázek 4.3: Vrchní vrstva PCB pro inteligentní servo



Obrázek 4.4: Spodní vrstva PCB pro inteligentní servo

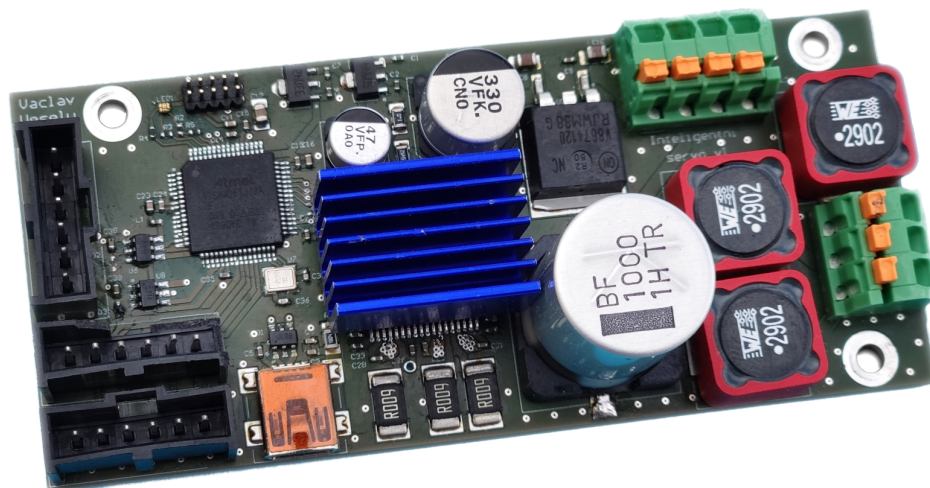
4.3 Deska plošného spoje

Inteligentní servo

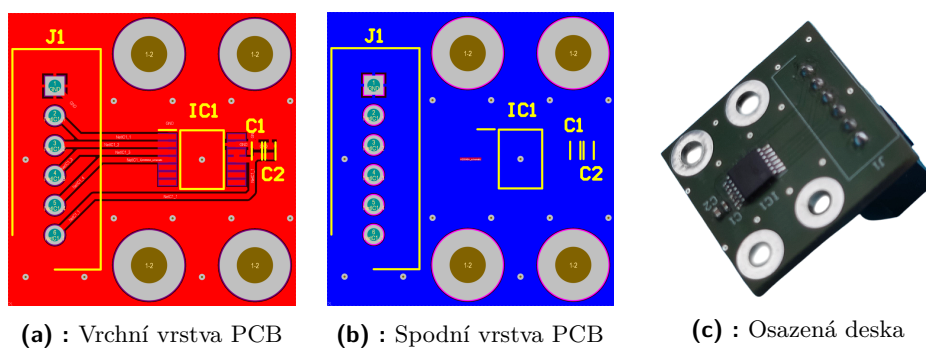
Obrázek 4.3 znázorňuje vrchní vrstvu PCB desky, obrázek 4.4 vrstvu spodní. Na obrázku 4.5 je už deska osazená.

Magnetický enkodér AS5048A

Na obrázcích 4.6 je zobrazená PCB deska magnetického enkodéru AS5048A.



Obrázek 4.5: Osazená deska inteligentního serva



(a) : Vrchní vrstva PCB

(b) : Spodní vrstva PCB

(c) : Osazená deska

Obrázek 4.6: PCB deska magnetického enkodéru AS5048A

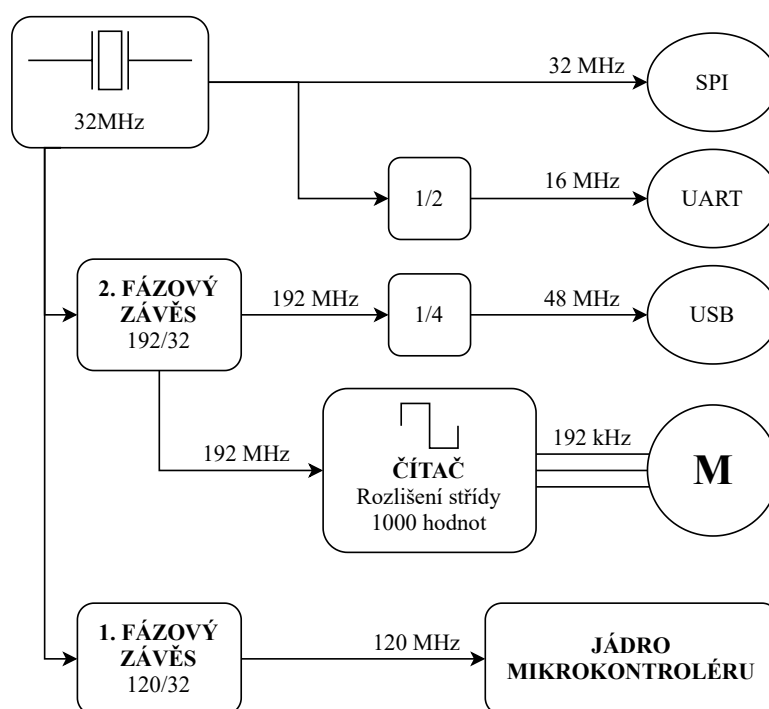
Kapitola 5

Implementace řídicího a komunikačního firmwaru

V této kapitole nejdříve popíši všechny použité hodinové signály. Následně na to vysvětlím použitou RGB LED signalizaci. Poté popíši jednotlivé komunikační rozhraní. Dále vysvětlím způsob řízení bezkomutátorového motoru. V neposlední řadě ukáži způsob, jak se dá experimentálně určit fázový posun mezi fázovými proudy a napětím. Na závěr ukáži uživatelské rozhraní, ve kterém inteligentní servo řídím.

5.1 Hodinový signál

Jako referenční zdroj hodin používám krystalový oscilátor o hodnotě 32 MHz. Ten přes první fázový závěs násobím konstantou $120/32$ a získávám tak 120 MHz zdroj hodin pro mikrokontrolér. Dále přes druhý fázový závěs získávám obdobným způsobem 192 MHz hodiny pro čítač. Ačkoliv má čítač maximální frekvenci hodin 200 MHz, zvolil jsem tuto hodnotu z toho důvodu, že po vydělení hodin konstantou 4 získávám i hodiny pro univerzální sériovou sběrnici. Hodiny pro SPI rozhraní získávám přímo z krystalového oscilátoru. Hodiny z krystalového oscilátoru dále dělím konstantou 2 a získávám tak 16 MHz hodiny pro UART. To je zobrazené na obrázku 5.1.



Obrázek 5.1: Diagram použitých hodinových signálů

5.2 RGB LED signalizace

Na desce používám RGB LED diodu HSMF-C116 řízenou pomocí čítačů. Dioda signalizuje jednotlivé stavy, ve kterých se servo můžu ocitnout.

Modrá barva

Pokud na diodě svítí jasně modrá barva, nachází se servo v kalibrační fázi. Zde se na servu kalibruje hodnota, která určuje úhel mezi první fází bezkartáčového motoru a počátečním úhlem enkodéru. Ta se dále používá pro řízení motoru.

■ Zelená barva

Pokud na servu svítí jasně zelená barva, je servo zkalibrované a připravené k používání. Při spuštění uživatelského rozhraní zobrazeného v kapitole 5.5.2 tato barva zhasne.

■ Červená barva

Jasně červená, periodicky blikající barva znázorňuje problém při čtení enkodéru. V takovém případě se servo zastaví a čeká na vyřešení problému.

■ Ostatní barvy

Dále je na servu připravená možnost pro signalizaci úhlu. Ta je určená přes barevný model HSV. Jednotlivým barvám modelu odpovídá aktuální úhel na servu. Dále je připraven režim, který pomocí jasu bíle barvy určuje odchylku referenčního úhlu od aktuálního úhlu serva.

■ 5.3 Aproximace polohy

V této práci bylo počítáno s aproximací aktuální polohy serva pomocí obou enkodérů. To bylo zamýšleno z důvodu zvýšení rozlišení servopohonu a potlačení nelinearit a hysterézi enkodérů. První enkodér totiž měří polohu servopohonu s rozlišením stopadesátkrát větším než ten druhý. Na druhou stranu druhý enkodér měří přesnou polohu ramena, která není zatížena pružnostmi materiálů a vůlemi gumového řemene. Pro aproximaci polohy bylo využito komplementárního filtru s proměnlivými váhami. Při aplikaci tohoto filtru se došlo k poznatku, že převodovka vytvořená na 3D tiskárně nedosahuje lineárního průběhu a aproximace polohy pomocí obou enkodérů nelze použít. Proto se od aproximace polohy opustilo a výsledná poloha se určuje jen z druhého enkodéru.

■ 5.4 Komunikační firmware

■ 5.4.1 UART

Ke komunikaci mezi servy používám asynchronní sériové rozhraní UART. Spojení je realizované pomocí polovičního duplexu. Tato komunikace je realizována s modulační rychlostí 1 Mb/s. Servo umožňuje dva druhy zapojení. V prvním režimu jsou serva zřetěžená a mohou komunikovat jen se servy vedle sebe. V druhém zapojení jsou serva připojená na sběrníkovou topologii a komunikují mezi sebou a s počítačem. U prvního zapojení tak mohou mít serva stejný kód a samy zjistí, kde v řetězu se nacházejí. Navíc dokáží snadno rozpoznat nově připojená serva. U tohoto způsobu komunikace však dochází k dopravnímu zpoždění. U druhého způsobu, kdy jsou serva připojená do sběrníkové topologie, už k dopravnímu zpoždění nedochází. Serva ale nedokáží snadno rozpoznat nově připojená zařízení a ani nepoznají, kde v řetězu se nacházejí. Musí mít tedy unikátní kód se svým identifikátorem. Z nedostatku serv nebyla tato funkcionality plně implementována. V budoucích verzích už bude změna těchto topologií řešena samotným servem pomocí analogového přepínače. Díky tomu budou moci serva rozpoznat kde se nacházejí, budou mít stejný kód, dokážou rozpoznat nově připojená zařízení a nebudou mít žádné dopravní zpoždění.

■ 5.4.2 SPI

SPI rozhraní používám pro komunikaci s magnetickým enkodérem AS5048A. Enkodér komunikuje přes 16 bitové zprávy. První bit ze zprávy označuje vždy sudou paritu. Druhý bit se pak liší pro zprávy přijaté a odeslané. Při odeslané zprávě tento bit určuje, zdali se jedná o čtecí či zapisovací instrukci. Při přijaté zprávě tento bit vždy označuje, zdali se předchozí zpráva povedla přijmout a zdali enkodér vykonal instrukci správně. Ostatních 14 bitů určují buď požadovanou instrukci nebo přijaté data [AMS18]. Přijatá data jsou pomocí mikrokontroléru kontrolována a při chybě čtení je servo zastaveno viz podkapitola 5.2.

■ 5.5 Řídicí firmware

■ 5.5.1 Ovládání BLDC motoru pomocí budiče DRV8332

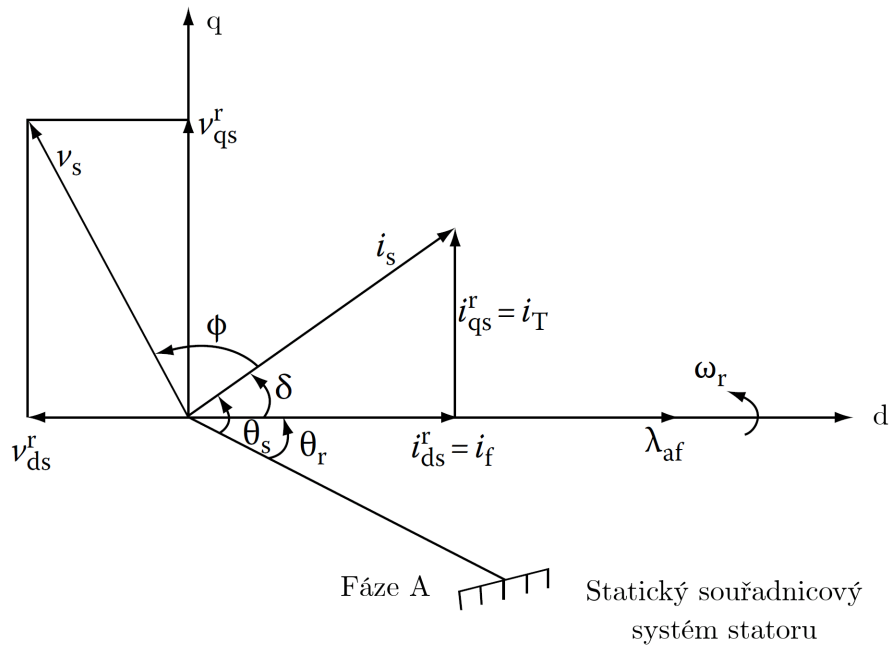
Pro řízení bezkomutátorových motorů se používá převážně šestikrokové a vektorové řízení. Šestikrokové řízení se používá pro motory pracující ve vysokých otáčkách. Při nižších otáčkách způsobuje většinou trhavý pohyb. K jeho implementaci stačí znát přibližnou polohu rotoru. To se většinou určuje pomocí třech hallových sond a nebo pomocí zpětného elektromotorického napětí. U vektorového řízení je implementace o něco složitější. Je potřeba znát přesnou polohu rotoru. Toto řízení však umožňuje hladký pohyb motoru při jakýchkoliv otáčkách [Bru20]. Navíc umožňuje větší momentovou sílu pro daný úhel. Jelikož potřebuji přesně kontrolovat polohu motoru, rozhodl jsem se pro řízení vektorové.

■ Vektorové řízení

Při vektorovém řízení dochází k ovládní vektoru magnetické indukce statoru. Jeho směr a velikost je pak určena hodnotami fázových proudů [Kri10]. Ty mají tvar viz rovnice 5.1. Kde proměnná $i_s = \|\mathbf{i}_s\|$ odpovídá velikosti vektoru magnetické indukce statoru. Proměnné $\theta_r = p\theta$ odpovídá elektrickému úhlu natočení rotoru. Proměnná p znázorňuje počet pól párů motoru a proměnná θ mechanický úhel natočení rotoru. Úhel mezi vektorem magnetické indukce statoru \mathbf{i}_s a vektorem magnetické indukce rotoru je dán proměnnou δ [Bru20].

$$\begin{aligned} i_a &= i_s \sin(\theta_r + \delta), \\ i_b &= i_s \sin\left(\theta_r + \delta - \frac{2\pi}{3}\right), \\ i_c &= i_s \sin\left(\theta_r + \delta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (5.1)$$

Při znalosti pozice rotoru pak vektorové řízení umožňuje kontrolovat moment rotoru a tím pak jeho pozici, rychlost a úhlové zrychlení. Pro snadnější řízení motoru se používá Clarkova a Parkova transformace. Ta umožňuje přetransformovat proudy 5.1 z třífázového systému spjatého se státorem do dvoufázového ortogonálního systému spjatého s rotorem [Bru20]. To je zapsané rovnicemi 5.2



Obrázek 5.2: Fázový diagram - grafické znázornění jednotlivých veličin
Převzato z [Kri10]

$$\begin{aligned} i_T &= i_s \sin(\delta), \\ i_f &= i_s \cos(\delta) \end{aligned} \quad (5.2)$$

Kde proud i_T odpovídá momentotvornému proudu a proud i_f tokotvornému. Jednotlivé složky jsou zobrazené na obrázku 5.2. Pro řízení motoru do maximálních otáček je složka i_f nenulová a používá se pro odbuzení magnetického pole rotoru. Pro řízení motoru s maximální možnou momentovou silou, jako je to u tohoto serva, se využívá tvrzení 5.3 [Kri10].

$$\begin{aligned} i_T &= i_s, \\ i_f &= 0, \\ \delta &= 90^\circ \end{aligned} \quad (5.3)$$

Jelikož je však možné pomocí mikrokontroléru a budiče motoru DRV8332 vytvořit jen napětí na jednotlivých fázích, přechází rovnice 5.1 na rovnice 5.4. Proměnné ϕ odpovídá fázový posun mezi fázovými proudy a napětími [Kri10].

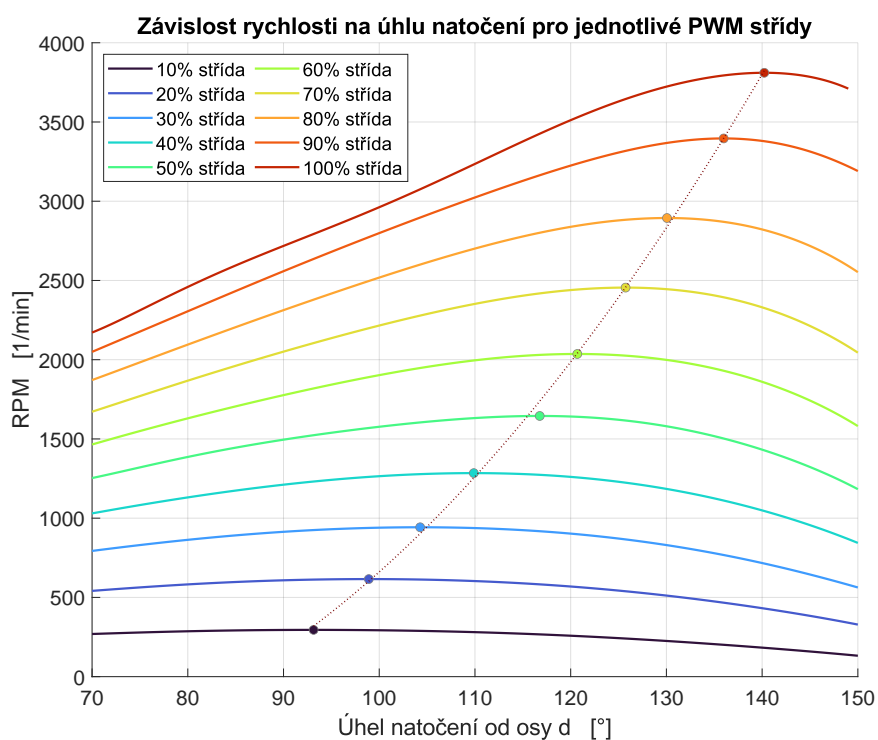
$$\begin{aligned}
 v_a &= v_s \sin(\theta_r + \delta + \phi), \\
 v_b &= v_s \sin(\theta_r + \delta + \phi - \frac{2\pi}{3}), \\
 v_c &= v_s \sin(\theta_r + \delta + \phi + \frac{2\pi}{3})
 \end{aligned}
 \tag{5.4}$$

Jelikož však v obvodu na obrázku 4.2 nedokáži měřit velikost proudu na jednotlivých fázích motoru a tím pak určit fázový posun mezi proudem a napětím, určuji tento fázový posun ϕ experimentálně. To je zobrazené v podkapitole 5.5.1.

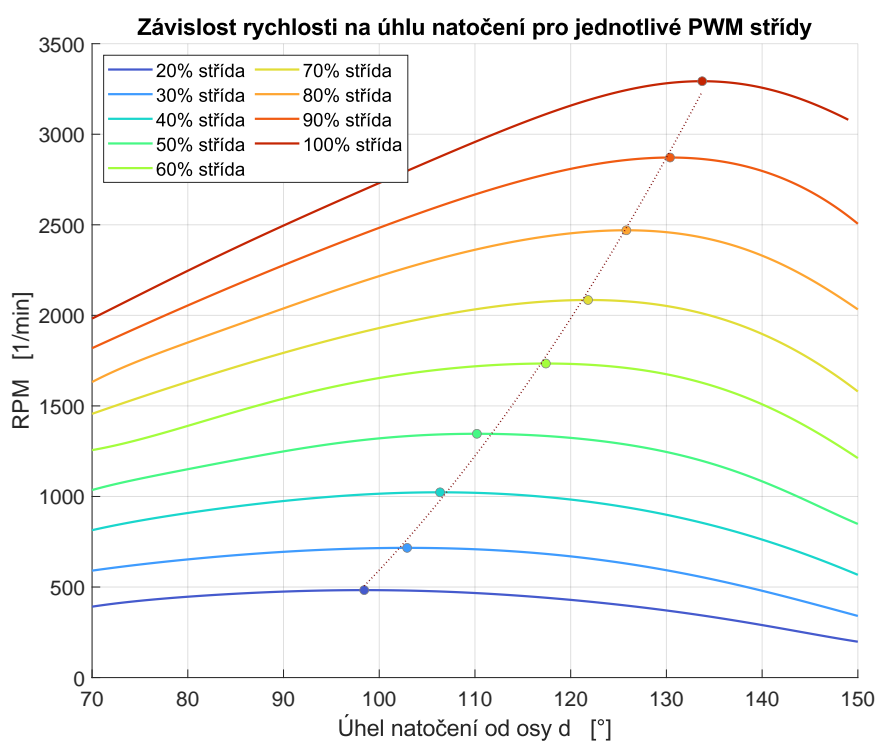
■ Experimentální měření fázového posunu

Kvůli chybějícímu měřicímu obvodu na desce určuji fázový posun mezi napětím a proudem experimentálně. Vycházím při tom z rovnic 5.4. Velikost napětí v_s řídím změnou střídy pulsně šířkové modulace. Proměnné δ a ϕ jsem sloučil do jedné proměnné α , která označuje celkový úhel mezi osou d a vektorem napětí \mathbf{v}_s , zobrazený na obrázku 5.2. Tento úhel α postupně měním pro jednotlivé střídy v intervalu $[70, 150]$ a měřím při tom průměrnou rychlost otáček motoru. Takto nalezené body dále prokládám křivkou a hledám úhel, ve kterém nabývá rychlost maxima. Takovéto měření jsem nejdříve provedl pro nezatížený motor běžící na prázdno. Výsledek měření je zobrazený na obrázku 5.3. Na obrázku 5.4 je zobrazený průběh pro motor, zasazený v převodovce. Jak je z obrázku patrné, celkové otáčky se snížily. Celkový pokles odpovídá přibližně 14.8%. To je způsobené třením vzniklém na převodovce. Tato hodnota koreluje i s naměřenou maximální hodnotou momentu sil. Teoretická maximální hodnota momentu sil pro použitý motor vychází na $M_t = 9.45 Nm$. Naměřená maximální hodnota momentu sil vyšla $M_m = 8 Nm$. Jedná se o 15.34% ztráty vzniklé na převodovce. Jak je dále z obrázků patrné, tak se celkový úhel natočení α pro jednotlivé střídy snížil.

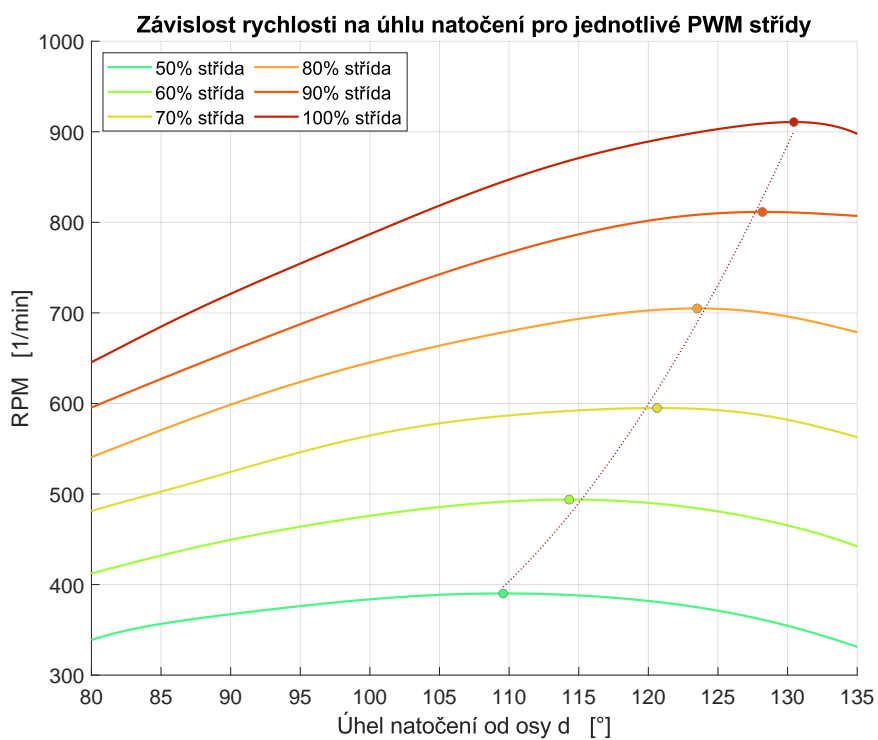
Dále jsem provedl měření pro celkově zatížené servo. Aby byly měření konzistentní, zatížil jsem servo rovnoměrně zvýšením tření na převodovce. Výslednému měření odpovídá obrázek 5.5. Jak je z obrázku patrné, výsledná rychlost motoru poměrně hodně poklesla. Na druhou stranu úhel, kdy motor dosahuje maximálních otáček se téměř nezměnil.



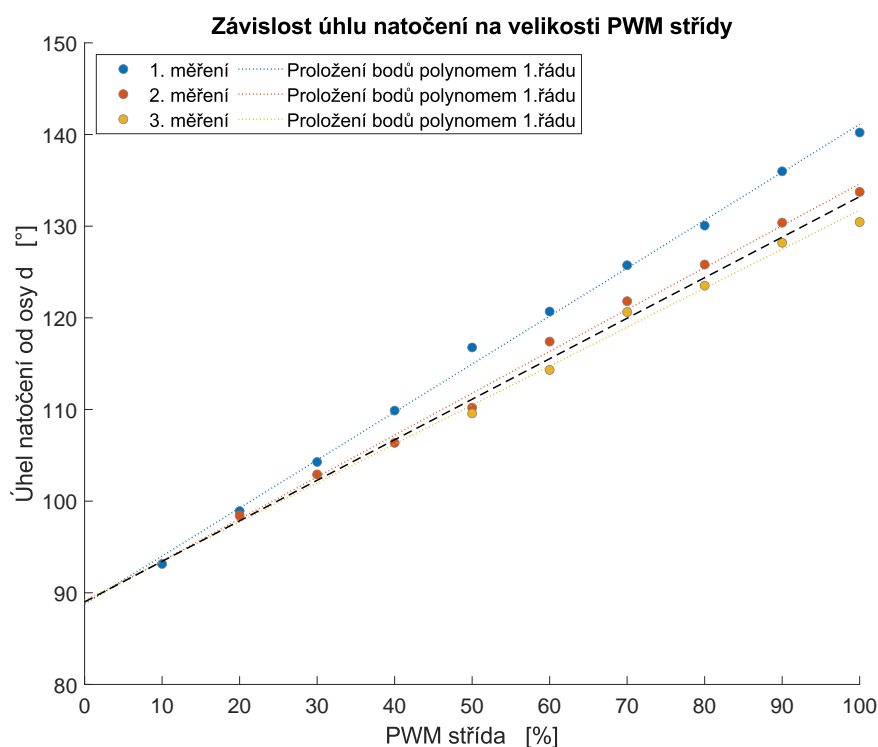
Obrázek 5.3: Zobrazení závislosti rychlosti na úhlu natočení α pro nezatížený motor



Obrázek 5.4: Zobrazení závislosti rychlosti na úhlu natočení α pro motor zatížený převodovkou



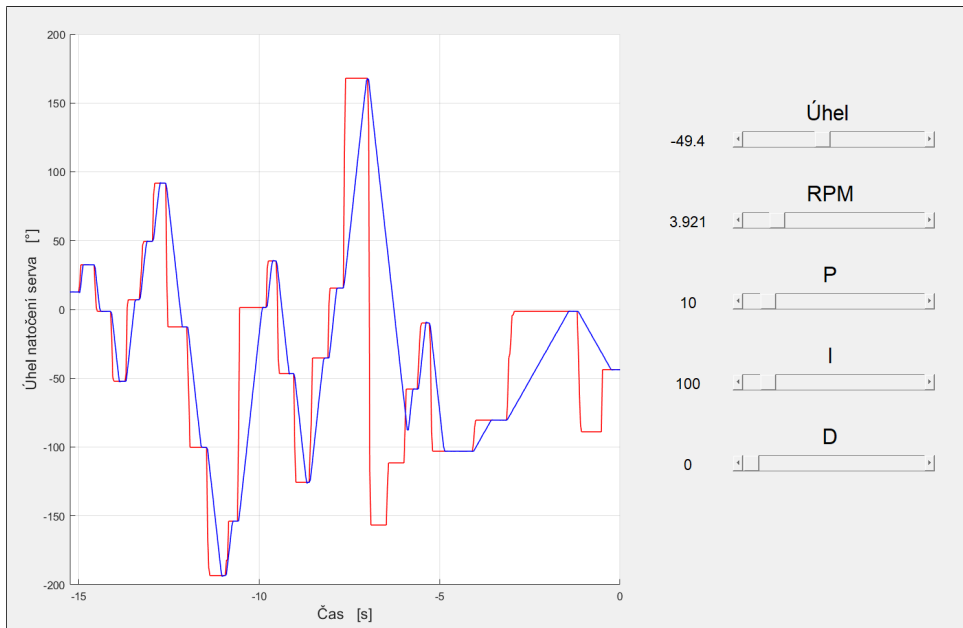
Obrázek 5.5: Zobrazení závislosti rychlosti na úhlu natočení α pro zatížené inteligentní servo



Obrázek 5.6: Zobrazení závislosti úhlu natočení α na PWM střídě pro jednotlivá měření

Dále jsem na obrázku 5.6 zobrazil závislost úhlu natočení na velikosti střídý pulsně šířkové modulace pro jednotlivá měření. Jak je z obrázku vidět, docházelo kvůli nenulové složce proudu i_f u prvního měření k odbuzení magnetického pole rotoru. Díky tomu motor dosahoval větších otáček za cenu menší momentové síly. Při zatíženém motoru se závislost úhlu natočení α na velikosti PWM střídý téměř nemění. Naměřená data z posledních dvou měření jsem zprůměroval a proložil polynomem prvního řádu. Ten je zobrazen černou čerchovanou čarou. Výsledný polynom 5.5 jsem použil k určování fázového posunu mezi fázovými proudy a napětími. Proměnné pwm odpovídá velikost použité střídý.

$$\alpha = \delta + \phi = \max(90, 0.4422 \cdot pwm + 89.0068) \quad (5.5)$$



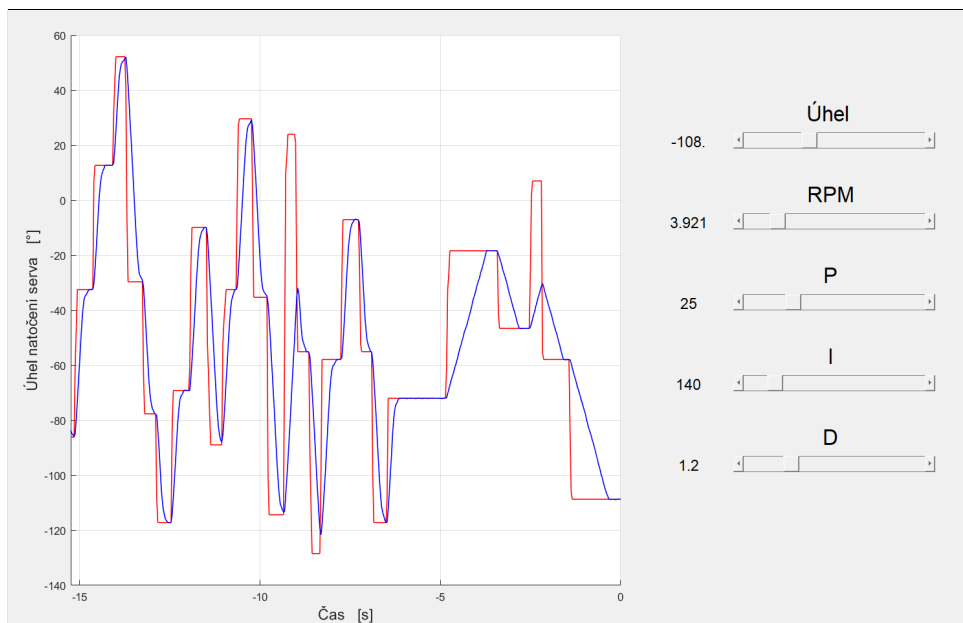
Obrázek 5.7: Grafické rozhraní pro ovládání inteligentního serva - PI regulátor

5.5.2 PID regulátor

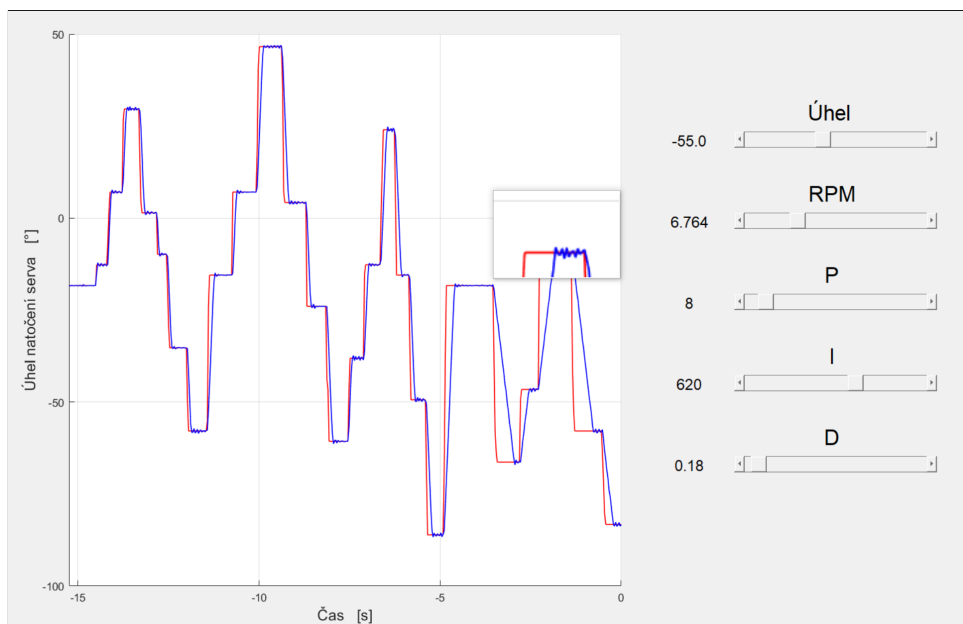
K řízení serva používám PID regulátor. Tomu nejprve vygeneruji trajektorii, která je omezena maximální velikostí otáček serva. Tuto trajektorii pak PID regulátor sleduje. Pro ovládání serva jsem vytvořil uživatelské rozhraní v Matlabu. Uživatel zde může měnit úhel natočení serva, maximální velikost otáček a jednotlivé konstanty PID regulátoru. Na obrázcích je červenou barvou zobrazený referenční úhel a modrou barvou aktuální úhel serva. Dále je na obrázcích demonstrována změna maximální velikosti otáček. K té dochází v čase kolem -4 sekundy. Na obrázku 5.7 je zobrazený PI regulátor. Na obrázku 5.8 je naladěný PID regulátor a na obrázku 5.9 rozladěný PID regulátor.

V tomto rozhraní si může uživatel najít jednotlivé PID konstanty pro libovolný bezkomutátorový motor, které pak použije ve svém projektu. Pro mnou použitý motor [mB] vyšly PID konstanty nejlépe viz 5.6:

$$\begin{aligned} k_P &= 10, \\ k_I &= 100, \\ k_D &= 0 \end{aligned} \tag{5.6}$$



Obrázek 5.8: Grafické rozhraní pro ovládání inteligentního serva - Naladěný PID regulátor



Obrázek 5.9: Grafické rozhraní pro ovládání inteligentního serva - Rozladěný PID regulátor

Kapitola 6

Závěr

V této práci jsem navrhl a zrealizoval cenově dostupné inteligentní servo. Nejdříve jsem pro něj provedl výběr komponent. Dále jsem k němu navrhl a zrealizoval harmonickou převodovku s redukčním poměrem $-1 : 150$. Poté jsem k servu vytvořil řídicí elektroniku. Nakonec jsem naimplementoval řídicí a komunikační firmware. Celou práci se všemi soubory přikládám přiloženou ve webovém Git repositáři [Ves].

6.1 Zhodnocení práce

V této práci se mi povedlo vytvořit cenově dostupné servo, které by se svým chováním dalo nazvat i inteligentním. Samotná převodovka se pohybuje v rozmezí 450 až 550 korun. Elektronika i s motorem dále vychází na přibližně 3200 korun. Věřím, že s přiloženými soubory si bude moci doma toto servo vytvořit každý. Dále se mi povedlo prakticky aplikovat a prohloubit doposud získané zkušenosti, což byla má hlavní motivace.

6.2 Praktické využití

Co se týká praktického využití, tak tento projekt není úplně vhodný pro budoucí používání v robotickém manipulátoru. Servo s ramenem váží 670

gramů. Jeho maximální naměřená momentová síla je 8Nm. Z toho důvodu bych nedoporučoval zapojovat více jak 3 serva dohromady. Tato práce je vhodná pro pedagogické účely a pro jakékoliv projekty, u kterých je potřeba získat velkou sílu z malého motoru. Například by se servo dalo dobře použít jako naviják nebo pro otevírání nějakého ventilu.

6.3 Doporučené změny v návrhu

Pro budoucí použití plánuji vyměnit konektory z řady C-Grid III 90136 za Micro-MaTch konektory od firmy TE Connectivity [Con21]. Dále plánuji použít menší součástky feritových korálek a kondenzátorů. Pro komunikaci serva s počítačem plánuji využívat jen UART rozhraní. USB sběrnici plánuji kompletně odstranit. Co se dále UART rozhraní týká, plánuji přidat analogový přepínač, který bude přepínat mezi sběrníkovou topologií a zřetězením. Díky tomu bude servo moci nezávisle sledovat nově připojená zařízení, rozpozná, kde v řetězu se nachází a nebude mít díky sběrníkové topologii žádné dopravní zpoždění. Dále plánuji využít kapacitního enkodéru místo AS5048A enkodéru umístěného na výstupu serva. Jak se z měření ukázalo, dosahuje tento enkodér nelinearit a hysterézí, které pro přesné měření polohy nejsou vůbec vhodné. V poslední řadě plánuji přidat obvod na měření proudu na fázích motoru. Díky tomu se bude moci tento obvod využít s jakýmkoliv motorem a nebude se muset experimentálně určovat fázový posun viz podkapitola 5.5.1.

Příloha A

Literatura

- [AG21] AMS AG, *As5140h rotary sensor*, [online], 2021, [vid. 2021-05-12], Dostupné z: <https://ams.com/as5140h>.
- [AMS18] AMS, *As5048a/as5048b*, January 2018, Magnetic Rotary Encoder - (14-Bit Angular Position Sensor), Datasheet, Dostupné z: https://ams.com/documents/20143/36005/AS5048_DS000298_4-00.pdf/910aef1f-6cd3-cbda-9d09-41f152104832.
- [Bas21] Prusa Knowledge Base, *Pozice švu*, [online], March 2021, Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/article/pozice-svu_151069.
- [Bru08] Jan Brus, *Deskripce různých druhů převodovek harmonic-drive*, October 2008, Bakalářská práce, Vysoké učení technické v Brně, Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/handle/11012/14626>.
- [Bru20] Ondřej Brunner, *Vozítka s všesměrovým pohybem a bezkomutátorovými motory*, Jun 2020, Bakalářská práce, České vysoké učení technické v Praze, Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/87629>.
- [Col15] Danielle Collins, *What are capacitive encoders and where are they suitable?*, Motion Control Tips (2015), Dostupné z: <https://www.motioncontroltips.com/faq-what-are-capacitive-encoders-and-where-are-they-suitable/>

- [Con21] TE Connectivity, *Konektory, micro-match*, Jan 2021, Dostupné z: <https://www.te.com/global-en/products/connectors/pcb-connectors/wire-to-board-connectors/ffc-fpc-ribbon-connectors/intersection/micro-match.html?tab=pgp-story>.
- [Dri19] Harmonic Drive®, *Harmonic drive® high-precision strain wave gearing*, December 2019, Datasheet, Dostupné z: https://www.harmonicdrive.net/_hd/content/documents/GENERAL-catalog.pdf.
- [IMK] Ph.D. Ing. Milan Klapka, *Konstruování strojů*, Přednáška, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, Dostupné z: <https://docplayer.cz/13448278-0zubena-kola-konstruovani-stroju-strojni-soucasti-www-shigley-cz.html>.
- [Kri10] R. Krishnan, *Permanent magnet synchronous and brushless dc motor drives*, CRC Press/Taylor and Francis, 2010, ISBN 978-0-8247-5384-9, Dostupné z: https://eee.sairam.edu.in/wp-content/uploads/sites/6/2019/07/R.-Krishnan_Permanent_Magnet_Synchronous_and_Brushless_DC_Motor_Drives__Mechanical_Engineering__Marcel_Dekker__.pdf.
- [Kub12] Libor Kubeček, *Násobič krouticího momentu*, May 2012, Bakalářská práce, Technická univerzita v Liberci, Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/80329>.
- [LLC21] Harmonic Drive LLC, *Harmonic gear harmonic drive® strain wave gear principle*, [online], 2021, [vid. 2021-05-12], Dostupné z: <https://www.harmonicdrive.net/technology>.
- [mB] Bezkartáčový motor 42BLR43-24-01, *24v 2000rpm 0.062nm 13w 0.91a round d42x43mm*, Dostupné z: <https://www.omc-stepperonline.com/download/42BLR43-24-01.pdf>.
- [MIC21] MICROCHIP, *Atsamd51j19a*, 2021, 32-bit ARM® Cortex®-M4F MCUs with 1 Msps 12-bit ADC, QSPI, USB, Ethernet, and PTC, Datasheet, Dostupné z: <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/ATSAMD51J19A>.
- [Ná08] Jan Nádvorník, *Deskripce převodovek typu cyclo-drive*, May 2008, Bakalářská práce, Vysoké učení technické v Brně, Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/handle/11012/6368>.
- [ric18] ric5sch, *Gray-code as compact disk label*, [online], Oct 2018, [vid. 2021-05-12], Dostupné z: <https://openclipart.org/download/309259/1540875307.svg>.

- [Roh] Rohloff, *Planetary gear system*, [online], [vid. 2021-05-12], Dostupné z: <https://www.rohloff.de/en/experience/technology-in-detail/planetary-gear-system>.
- [SCLG⁺19] Elias Saerens, Stein Crispel, Pablo Lopez Garcia, Tom Verstraten, Vincent Ducastel, Bram Vanderborcht, and Dirk Lefeber, *Scaling laws for robotic transmissions*, *Mechanism and Machine Theory* **140** (2019), 601–621.
- [Smo16] Jeff Smoot, *Digital technology boosts the reliability of rotary-encoder designs.*, [online], Oct 2016, [vid. 2021-05-12], Dostupné z: <https://www.motioncontroltips.com/kinds-encoder-features-boost-ruggedness-solid-state-electronics-maybe/>.
- [TS21] Tec-Science, *Construction of the cycloidal disc of a cycloidal drive - tec-science*, [online], Mar 2021, [vid. 2021-05-12], Dostupné z: <https://www.tec-science.com/mechanical-power-transmission/planetary-gear/construction-of-the-cycloidal-disc/>.
- [Ves] Václav Veselý, *Bakalářská práce - inteligentní servo*, Git repositář, Dostupné z: https://gitlab.com/WenceslawCZ/Bakalarska_prace.
- [Wor21] Gear World, *Gear world*, [online], 2021, [vid. 2021-05-12], Dostupné z: <http://www.gearworld.co.in/images/6.jpg>.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Veselý** Jméno: **Václav** Osobní číslo: **474718**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra řídicí techniky**
Studijní program: **Kybernetika a robotika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Inteligentní servo

Název bakalářské práce anglicky:

Intelligent servo

Pokyny pro vypracování:

- Navrhněte a zrealizujte inteligentní servo.
- Proveďte výběr motoru, převodovky a enkodéru.
 - Navrhněte řídicí elektroniku.
 - Implementujte řídicí a komunikační firmware.

Seznam doporučené literatury:

- [1] C. Xia.: Permanent Magnet Brushless DC Motor Drivers and Controls. Wiley, 2012.
[2] Dorf, C.R., Bishop, R.H.: Modern Control Systems, Prentice Hall, 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: **04.02.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: _____

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2022**

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