

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA APLIKOVANÝCH VĚD
KATEDRA KYBERNETIKY

Bakalářská práce

Návrh systému automatického řízení pohybu pro
mechatronický model stolního fotbalu

Plzeň, 2020

Martin Jandík

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta aplikovaných věd
Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Martin JANDÍK**
Osobní číslo: **A17B0549P**
Studijní program: **B3918 Aplikované vědy a informatika**
Studijní obor: **Kybernetika a řídicí technika**
Téma práce: **Návrh systému automatického řízení pohybu pro mechatronický model stolního fotbalu**
Zadávací katedra: **Katedra kybernetiky**

Zásady pro vypracování

1. Navrhněte vhodné mechanické uspořádání zjednodušeného modelu stolního fotbalu s kamerovým systémem pro detekci pohybu míčku a dvouosým manipulátorem ovládajícím pohyb fotbalisty.
2. Vytipujte sestavu pohonů pro řízení pohybu fotbalisty s využitím krokových nebo stejnosměrných elektrických motorů. Seznamte se s technikami řízení těchto pohonů.
3. Navrhněte algoritmus pro plánování pohybu hráče na základě odhadované trajektorie míčku. Otestujte na simulačním modelu v prostředí Matlab/Simulink.
4. Realizujte navrženou strategii řízení na mechatronickém modelu s využitím vhodných HW a SW prostředků.

Rozsah bakalářské práce: **30-40**
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam doporučené literatury:

Melichar, Goubelj, Lineární systémy 1,2, ZČU 2018
Vukosavic, Digital Control of Electrical Drives, Springer 2011

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Martin Goubelj, Ph.D.**
Katedra kybernetiky

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2019**
Termín odevzdání bakalářské práce: **25. května 2020**

Radová

Doc. Dr. Ing. Vlasta Radová
děkanka



J. Psutka

Prof. Ing. Josef Psutka, CSc.
vedoucí katedry

PROHLÁŠENÍ

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě aplikovaných věd Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a výhradně s použitím odborné literatury a pramenů, jejichž úplný seznam je její součástí.

V Plzni dne

.....

Martin Jandík

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Martinu Goubejovi Ph.D. za cenné profesionální rady a připomínky. Dále Ing. Lubošovi Šmídlovi Ph.D. za umožnění realizace této práce a mým nejbližším, za podporu při studiu.

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je návrh a realizace systému automatického řízení pohybu pro mechatronický model stolního fotbalu. Úvodní část se zaměřuje na seznámení s problematikou a předkládá různé možnosti řešení daného problému. Druhá část popisuje rozdělení jednotlivých aktuátorů a jejich výhody nebo nevýhody. Třetí část sestavuje matematický model stejnosměrného motoru a představuje teorii řízení pomocí PID regulace i s jejími nedostatky. Na samotném závěru je popsáno řízení jednotlivých reálných regulačních smyček, kde je kladen důraz na agresivitu řízení. Výsledky z měření a modelu jsou nakonec srovnávány.

Klíčová slova

Stejnoseměrný motor, návrh řídicího systému, kaskádní regulátor

Abstract

Main point of this bachelor thesis is the design and implementation of an automatic motion control system for a model of table football. The beginning part is focused to getting acquainted with issue and introduces different methods, how to solve this problem. The second part describes division of individual actuators and their advantages and disadvantages. The third part is designing mathematical model of DC motor and presents control theory of PID controller and its shortcomings. The last part describes control of individual control loops, where the emphasis is on the aggressiveness of the control. The results from the measurement and the model are compared in conclusion.

Keywords

DC motor, design of control system, cascade controller

Obsah

1	Úvod	10
2	Návrh modelu stolního fotbalu	11
2.1	Seznámení s problémem	11
2.1.1	Automatické řízení pohybu fotbalisty	12
2.1.2	Detekce pohybu míčku	13
2.2	Volba konstrukce	13
2.2.1	Možnosti převodu rotačního na posuvný pohyb	13
2.2.2	Vlastní konstrukce	16
3	Volba vhodného motoru pro řízení pohybu fotbalisty	18
3.1	Krokový motor	18
3.1.1	Základní charakteristika	18
3.1.2	Typy krokových motorů	19
3.1.3	Řídící obvody	20
3.1.4	Způsoby řízení	22
3.2	Stejnoseměrný motor	23
3.2.1	Základní charakteristika	23
3.2.2	Typy stejnosměrných motorů	24
3.3	Rozdíly mezi nimi	26
4	Návrh algoritmu pro plánování pohybu hráče	27
4.1	Matematický model DC motoru	27

4.1.1	Odvození diferenciálních rovnic	27
4.1.2	Stavová reprezentace	29
4.1.3	Parametry motoru	30
4.1.4	Model systému v prostředí Simulink	32
4.2	Teorie regulátorů	34
4.2.1	Základ PID regulace	34
4.2.2	Nedostatky PID regulace	36
4.2.3	Regulace rychlosti	37
4.2.4	Regulace polohy	38
4.3	Hodnocení kvality regulace	39
4.3.1	Časová oblast	40
4.3.2	Frekvenční oblast	40
5	Realizace navržené strategie řízení	43
5.1	Použité prvky řízení	43
5.1.1	Enkodér	43
5.1.2	Pomocný řídicí obvod k motoru	45
5.1.3	Schéma zapojení	46
5.2	Realizace motoru bez zátěže	47
5.2.1	Identifikace - graybox	47
5.2.2	Regulace rychlosti	48
5.2.3	Regulace polohy	50
5.3	Realizace motoru se zátěží	52
5.3.1	Identifikace	52
5.3.2	Regulace rychlosti	53
5.3.3	Regulace polohy	53
5.4	Celkové porovnání	54
6	Závěr	55

Literatura	56
Seznam obrázků	58

Kapitola 1

Úvod

Tématem této bakalářské práce je návrh systému automatického řízení pohybu pro mechatronický model stolního fotbalu, který nahradí lidského spoluhráče za plně automatický systém počítačového spoluhráče.

Práce je rozdělena do čtyř hlavních kapitol. V první kapitole se podrobněji seznámíme s celkovým problémem automatizace stolního fotbalu a mechanickými možnostmi převodu rotačního pohybu na posuvný. V další kapitole si představíme možnosti aktuátorů pro tuto úlohu, jejich výhody a nevýhody. Ve třetí kapitole si odvodíme matematický model motoru. Přiblížíme si teorii PID regulátorů a jejich použití v řízení rychlosti a polohy. Nakonec si ukážeme, jak vyhodnotit kvalitu regulace. V poslední čtvrté kapitole použijeme veškeré předchozí znalosti k sestavení kaskádní regulace řízení polohy a rychlosti motoru. Nejprve na samostatném motoru bez zátěže a následně i při zapojení do mechanické soustavy tj. se zátěží.

Cílem práce dosažení dostatečně přesného a agresivního řídicího systému, který bude schopen včas reagovat na pozici míče a umístit fotbalistu tak, aby zachytil míček v mechatronickém modelu stolního fotbalu.

Kapitola 2

Návrh modelu stolního fotbalu

2.1 Seznámení s problémem

Stolní fotbal je hra pro minimálně dva hráče, kteří hrají proti sobě. Hra sama o sobě nahrazuje klasický fotbal tzv. kopanou, který se hraje většinou na trávníku a soupeří proti sobě dva týmy hráčů, kde se jeden snaží vstřelit víc branek než jeho soupeř. Stolní fotbal tak přenáší hru z trávníku ke stolu a místo běhání za míčem se snažíme rukama ovládat hráče a střelit s nimi gól. Tato hra se stává čím dál tím víc populární a konají se v ní mezinárodní turnaje, kde každým rokem stoupá výherní částka.

Z hlediska konstrukce se jedná o dřevěný stůl, který představuje hrací plochu. Na dřevěné desce je po obvodu udělaná ohrádka, která slouží k uchycení tyčí s hráči a k zabránění úniku míčku z hrací plochy. Tyčí s hráči je celkem osm, čtyři pro každý tým. Každá tyč jednoho týmu má různý počet hráčů. Odzadu na první tyči se nachází pouze jeden hráč, který má představovat brankáře, na druhé tyči jsou dva hráči obránci, na třetí, která je až za soupeřovými útočníky, se nachází záložníci, kterých je pět a za protivníkovi záložníky se nachází poslední čtvrtá tyč s útočníky, kteří jsou tři. Za brankáři obou týmů je otvor, představující bránu. Pokud míček vletí do brány, tým, který střelil branku, si přičte bod. Zápas se většinou hraje dokud nedojdou míčky (zpravidla deset míčků) nebo do deseti gólů.

Naším cílem v této úloze vytvořit model stolního fotbalu a nahradit jeden tým počítačem tak, aby mohli ti lepší hráči trénovat proti silnějším soupeřům, kterým matematické modelování a technika určitě je a připravit se tak třeba na zmíněné turnaje. Protože se jedná o model, tak zpočátku nepotřebujeme všechny fotbalisty, ale stačí nám jeden, který bude mít největší možný rozsah



Obrázek 2.1: Oficiální stůl pro stolní fotbal[2]

pohybu a plně nahrazovat lidského hráče co se pohybu, vnímání i reakcí týče.

Celou úlohu lze tedy rozdělit na dva základní problémy. Jeden z problémů je ovládání fotbalistů tj. potřebujeme nahradit hráčovy ruce, kde jeden pohyb co ruka koná je translační, kde posouvá hráče ze strany na stranu a podle počtu hráčů na tyči zabírá plochu, přes kterou nemůže míč projít a druhý pohyb rotační. Rotační pohyb slouží k odehrání či zpracování míče když se objeví v blízkosti fotbalisty. Druhý základní problém je nahradit hráčovy oči, aby poté mohl správně a včas zareagovat rukama aby mohl vstřelit gól či na vlastní straně zabránit gólu a tím vyjít z celé hry vítězně.

Nahrazení rukou se dá přenést na problém návrhu systému automatického řízení pohybu pro mechatronický model stolního fotbalu a nahrazení očí na detekci pohybu míčku pro mechatronický model stolního fotbalu.

2.1.1 Automatické řízení pohybu fotbalisty

Protože úloha vyžaduje dva druhy pohybů pro jednu herní tyč, můžeme ji rozdělit ještě na dvě dílčí úlohy a řešit zvlášť translační pohyb pro lineární posun hráče a rotační pohyb pro střelbu a zpracování míče. Obě tyto úlohy řeší návrh řídicího systému, který bude rychle a přesně ovládat motory tak, aby byla zajištěna dostatečná rychlost reakce fotbalisty a zároveň přesnost, pro širší rozsah výsledného pohybu a možností interakce na pohyb míčku. V části, kde řešíme lineární posun hráče, je nutné použít rovnou lineární motor nebo pomocí mechanismu převést rotační pohyb motoru na translační.

2.1.2 Detekce pohybu míčku

Jak už bylo řečeno výše, samotné řízení pohybu by bylo nepoužitelné, protože toto řízení, potřebuje vědět, kam se má fotbalista pohnout a to bez detekce místa a pohybu míčku nelze provést. Tato část se zabývá kamerovým snímáním herní plochy a následného zpracování obrazu, ve kterém vyhledáváme míček a kraje hřiště. To děláme abychom mohli spočítat aktuální souřadnice míčku a případně pomocí dalšího systému ještě predikovat trajektorii míčku. Odhadovaná pozice míčku v místě fotbalisty pak slouží jako požadovaná hodnota pro regulaci řízení motorů.

Spojením těchto dvou základních problémů tj. automatické řízení pohybu fotbalisty a detekce pohybu míčku, získáme základ pro cílovou aplikaci, kde na jedné straně bude hrát člověk a na druhé počítač. Na modelu už bude potřeba upravit jen pár parametrů podle toho, kolik fotbalistů obsahuje herní tyč a jak velký rozsah pohybu má.

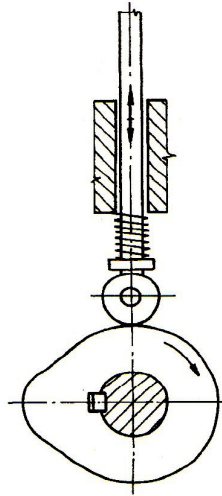
2.2 Volba konstrukce

2.2.1 Možnosti převodu rotačního na posuvný pohyb

Protože motor vytváří rotační pohyb a my potřebujeme pro naši úlohu translační, nabízí se zde několik možností pro převod z jednoho pohybu na druhý.

Převod pomocí vačky

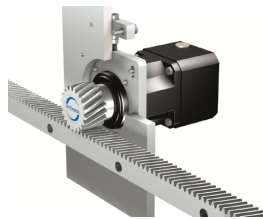
Tento převod jak obrázek 2.2 napovídá využívá vlastnosti vačky, která má oblý tvar a jejím připevněním na hřídel motoru můžeme dosáhnout translačního pohybu. Aby však nebyl tento pohyb jednostranný, musí zde být síla působící na opačnou stranu nebo objekt, který chceme translačně posunout, pevně přidělán k vačce. Sílu působící proti může představovat třeba pružina nebo gravitace. Tento převod se používá u starších spalovacích motorů, kde pomocí tohoto mechanismu vstřikuje palivo. Pro naši úlohu by však musela být vačka značně veliká aby mohl být translační pohyb realizován v celé potřebné délce.



Obrázek 2.2: Příklad vačkového mechanismu s kladičkou[9]

Převod pomocí hřebene

Převod je zobrazený na obrázku 2.3, kde na hřídeli motoru je připevněné ozubené kolo a druhou část převodu tvoří ozubený hřeben. Záleží na aplikaci, jestli je připevněn právě ozubený hřeben a motor se posouvá nebo obráceně. Pro naši úlohu bych volil pohyblivý hřeben a statický motor, nicméně tento převod je často používán v průmyslových aplikacích a zbytečně moc robustní a nákladný.



Obrázek 2.3: Příklad hřebenového mechanismu[12]

Převod pomocí šroubu a matice

Převod pomocí matice a šroubu (obrázek 2.4), někdy také trapézového šroubu, je vhodným kandidátem pro naše řešení. Výhody plynou hlavně z jednoduchosti. S tímto převodem se setkáme v každé dílně, protože je použit ve



Obrázek 2.4: Příklad mechanismu šroub-matice [13]

svěráku. Rychlost translačního posunu se dá ovlivnit velikostí stoupání trapézového šroubu. Problém v naší úloze s tímto převodem je hlavně v omezení rychlostí, vysokém tření a také vůli, kterou tento převod často má.

Převod pomocí řemene

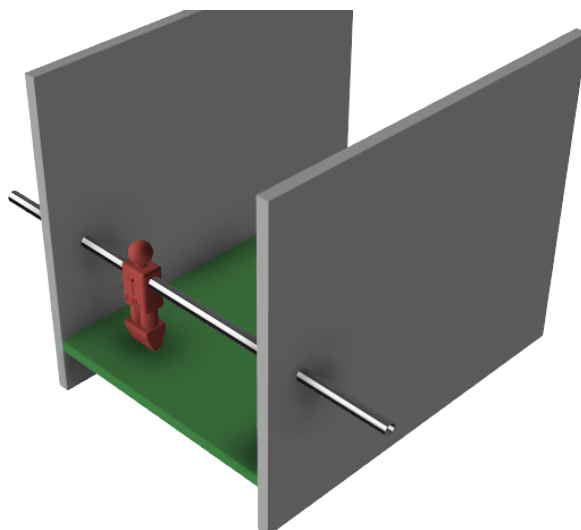
Poslední zmíněný převod z rotačního pohybu na translační je převod pomocí řemene či řetězu. Je zobrazen na obrázku 2.5 a jeho použití je celkem jasné. Řemen je spojen s konstrukcí, která má být posouvána a pohání ho dvě stejně velká ozubená kola. Jedno je přidělané na hřídeli motoru a druhý je přidělané ke konstrukci nebo třeba enkodéru. Výhoda tohoto převodu spočívá v bezúdržbovosti, kde na rozdíl od ostatních převodů nemusíme řemen či ozubené kolo nijak mazat. Používají se například v 3D tiskárnách.



Obrázek 2.5: Příklad řemenového převodu[6]

2.2.2 Vlastní konstrukce

Samotnou arénu představují tři plexiskla sešroubovaná do písmene "H". Tyto plexiskla obsahují otvory, do kterých se vloží tyč na které je přišroubovaný fotbalista viz obrázek 2.6



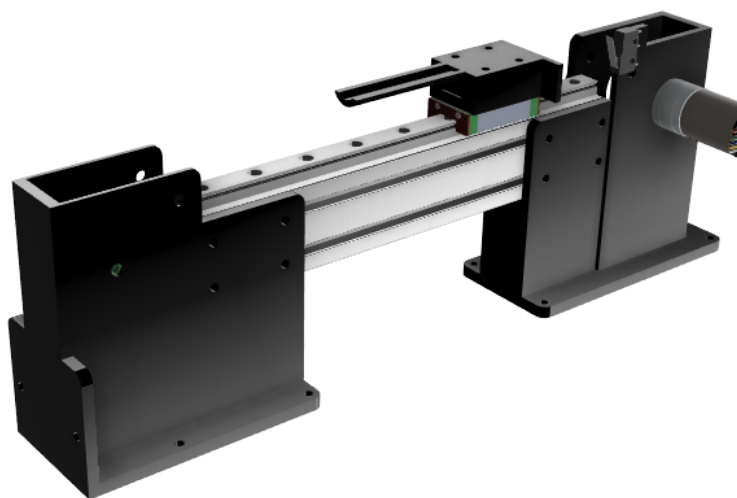
Obrázek 2.6: Model stolního fotbalu

Přesně uprostřed hrací plochy je umístěna kamera provizorním držákem (obrázek 2.7) tak, aby kamera bezpečně snímala celou hrací plochu. Z důvodu malé tiskové plochy 3D tiskárny musel být díl rozdělen na dva kusy. Obsahuje otvor na kameru a malou ohrádku pro minipočítač Raspberry Pi, který slouží ke zpracování obrazu a řízení motorů.



Obrázek 2.7: Konstrukce pro umístění kamery

Z výše zmíněných možností převodu rotačního pohybu na posuvný jsem nakonec vybral poslední tj. převod pomocí řemene. Hlavním důvodem výběru byla finanční stránka, a to protože tento převod se hodně používá v 3D tiskárnách, které se poslední roky masově vyrábí. Proto není těžké levně sehnat hliníkový profil, řemen, ozubená kolečka a lineární ložisko na samotný posun. Abychom tyto komponenty mohli složit, zbývalo navrhnout uložení ozubených kol a spojení přes řemen s motorem.



Obrázek 2.8: Konstrukce pro lineární pohyb

Obrázek 2.8 zobrazuje finální konstrukční uspořádání. Na obrázku chybí spojení s řemenem, který je na reálném modelu upevněn právě na lineárním kuličkovém ložisku a na obou stranách konstrukce spojen s ozubenými koly. Dále si můžeme všimnout, že pro kalibraci se zde u motoru nachází koncový spínač, který reprezentuje nulovou polohu.

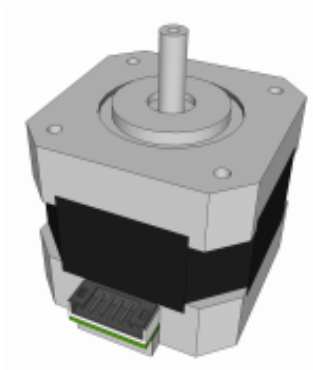
Kapitola 3

Volba vhodného motoru pro řízení pohybu fotbalisty

3.1 Krokový motor

3.1.1 Základní charakteristika

Krokový motor je točivý elektrický stroj který díky vstupním impulsům stejnosměrného proudu koná mechanickou práci. Jeho hlavní výhoda spočívá v možnosti nastavení určité polohy (určitého počtu kroků) bez nutnosti zpětnovazební regulační smyčky, ale samozřejmě v přítomnosti jakéhokoliv snímače rychlosti nebo polohy, například enkodér, může být použit i ve zpětnovazební smyčce. K vyvolání pohybu je nutné použít řídicí elektroniku, která zajistí vybuzení jednotlivých vinutí rotoru a způsobí rotační pohyb o jeden krok. Krok je reakce na řídicí impuls přivedený na svorky krokového motoru, který pohne hřídelí o pevný úhel. Velikost tohoto úhlu je dána konstrukcí motoru, a způsobem ovládání. Krokový motor s vyššími počty pólů rotoru a vyššími počty fází statoru se dokáže posunout o menší úhel a tím pádem dokáže daleko přesněji dosáhnout požadované polohy. Existují tři typy krokových motorů, s permanentním magnetem, s proměnnou reluktancí a hybridní.[1]

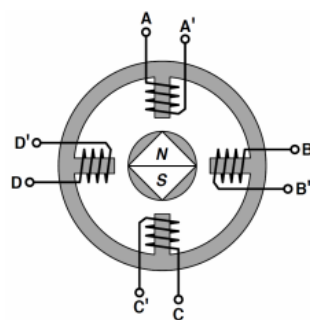


Obrázek 3.1: Krokový motor[3]

3.1.2 Typy krokových motorů

Krokový motor s permanentním magnetem

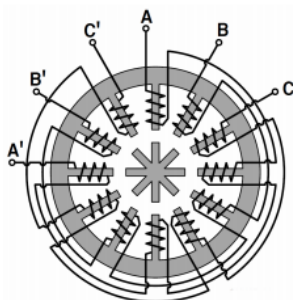
Nazývá se též jako krokový motor s aktivním rotorem nebo krokový motor s radiálně polarizovaným permanentním magnetem. Je konstruován tak, že rotor tohoto krokového motoru má po svém obvodu umístěné permanentní magnety, kde se střídavě mění magnet se severním a jižním pólem. Počet těchto magnetů je poloviční oproti počtu pólů statoru. Správné spínání jednotlivých vinutí statoru pak postupně mění magnetické pole vně motoru, podle kterého se rotor s permanentními magnety začne otáčet. Konstrukce těchto motorů je jednoduchá a tak je nejvíce rozšířena ve spotřební elektronice, kde vítězí nižší cena nad menší přesností a výkonem.[3]



Obrázek 3.2: Krokový motor s permanentním magnetem[3]

Krokový motor s proměnnou reluktancí

Nazývá se též jako drápkový motor nebo reluktační motor. Je vytvořen tak, že rotor i stator motoru je tvořen z magneticky měkkého materiálu. Na statorových pólech je navinuté vinutí jednotlivých fází. K otočení dochází při postupném spínání statorových vinutí, kde je mezi pólem statoru a rotoru naindukován magnetický tok. Motor se otáčí směrem se zvětšujícím překrytí rotoru a statoru (větší plocha překrytí znamená větší silové působení).[3]



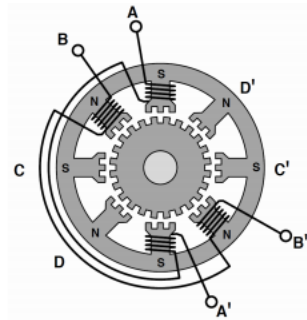
Obrázek 3.3: Krokový motor s proměnnou reluktancí[3]

Hybridní krokový motor

Jak už z názvu napovídá jedná se o krokový motor, který má z předchozích dvou od každého něco. Rotor tvoří axiálně polarizovaný permanentní magnet, který slouží k magnetizaci feromagnetických pólových nástavců, též nazývané koruny, každý na opačnou polaritu. Tyto koruny tvoří ozubení, které určují jak velkou přesnost bude motor mít. Například pro rotor s deseti zuby bude velikost kroku 9° . Ozubení rotoru je vždy vyrobeno tak, aby naproti zubu byla vždy mezera. Stator tvoří osm pólů, jejichž zakončení je konstruováno také ozubením. [3]

3.1.3 Řídící obvody

Jedním ze dvou hlavních úkolů řídicích obvodů krokových motorů je změna směru proudového toku vinutím což zapříčiní změnu směru magnetického toku. Druhým úkolem je omezit velikost proudu, který motorem protéká abychom zabránili přehřátí či ztrátě kroků. Není dobré proud omezit moc, protože motor pak ztrácí výkon.

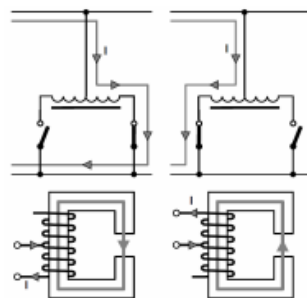


Obrázek 3.4: Hybridní krokový motor[3]

Pro zajištění otáčení motoru a oboustranného chodu je potřeba měnit směr magnetického toku obvodem statoru. Toto otočení magnetického toku se dá dosáhnout otočením toku proudu ve vinutí. Z hlediska zapojení vinutí elektromagnetických cívek nebo volby řízení rozdělujeme motory ještě na unipolární a bipolární

Unipolární motory

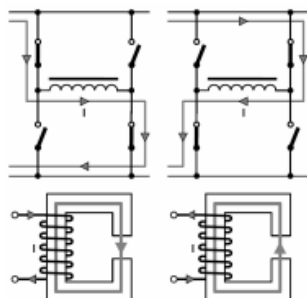
Unipolární motor má fázové vinutí rozděleno na dvě části a vychází z něj tři vodiče. Jeden uprostřed vinutí a zbylé dva na obou koncích. Změn směru magnetického toku dosáhneme přepínání mezi středovým vodičem s jedním a druhým krajním vodičem. Protože jsou poloviny vinutí navinuty v protisměru, nemusíme se starat o změnu směru protékajícího proudu. Spínací obvod se dá realizovat velmi jednoduše, protože jen přepínáme mezi dvěma stavy.[3]



Obrázek 3.5: Unipolární řízení[3]

Bipolární motory

Bipolární motory oproti unipolárním nemají rozdělené vinutí a tak z něj vychází jen dva vodiče a to z krajů cívek. To implikuje složitější řídicí obvod, protože musí zahrnovat změnu směru proudu, potřebného právě k otočení magnetického toku ve vinutí. K vyřešení tohoto problému se obvykle používá H-můstek, který střídavě spíná obvod vinutí tak, aby umožnil proud protékat jednotlivě mezi oběma směry podle potřeby.[3]



Obrázek 3.6: Bipolární řízení[3]

3.1.4 Způsoby řízení

Technika řízení tedy spočívá v ovládání řídicí elektroniky tak, aby budila cívky ve správném pořadí podle směru, ve kterém se má pohybovat. Rychlost pohybu krokového motoru můžeme ovlivnit různými způsoby řízení jako například postupné magnetizace jedné fáze, řízení s plným krokem, polovičním krokem a mikrokrokem.

Postupná magnetizace jedné fáze

Jak už z názvu napovídá, tak tento způsob řízení funguje tak, že vždy zapínáme/magnetizujeme současně pouze jednu fázi. Tento způsob řízení se moc nepoužívá, protože má sice stejný počet taktů jako řízení s plným krokem ale má výrazně menší točivý moment, než jmenovitý, udávaný výrobcem. Cyklus se tedy u dvoufázových motorů, které jsou nejrozšířenější, skládá ze čtyř taktů (A+ B+ A- B-).

Plný krok

Jak už bylo zmíněno v předchozím způsobu řízení, tak tento způsob se také skládá ze čtyř taktů akorát s tím rozdílem, že máme vždy dvě cívky zapnuté a dvě vypnuté. Tím dosáhneme maximálního jmenovitého točivého momentu.

Poloviční krok

V tomto způsobu řízení střídavě zapínáme jednu cívku a dvě cívky najednou ve správném pořadí. Tím docílíme dvojnásobně většího počtu kroků na otáčku a zvětšíme přesnost. Problém zde však nastává v kolísavém točivém momentu, kdy při taktu, kde je sepnutá jen jedna cívka bude výrazně menší než v taktu, kde jsou sepnuté dvě najednou.

Mikrokrok

[3, 5] Myšlenka mikrokrokování je taková, že můžeme jeden krok rozdělit na 2^n dalších kroků, kde n je námi volitelná proměnná (většinou 2 až 8 podle dostupných řídicích obvodů). Podle toho na kolik dalších kroků rozdělíme původní krok, nám proud v jednom vinutí postupně narůstá a ve druhém o stejnou velikost klesá. Čím více rozdělíme původní krok, tím více se průběh proudu v jednotlivých vinutí podobá ideálnímu sinusovému průběhu. Použití této metody vypadá jako ideální kandidát ke zvýšení přesnosti polohování, ale opak je pravdou. Důvod použití mikrokrokování spočívá hlavně v plynulejším průběhu krokového motoru čímž se snižuje mechanický hluk, pravděpodobnost rezonancí a navíc tím zvýšíme i celkovou životnost krokového motoru.

3.2 Stejnoseměrný motor

3.2.1 Základní charakteristika

Stejnoseměrný motor je definovaný jako točivý elektrický stroj, který je připojen na stejnoseměrný proud a mění elektrickou energii na mechanickou práci nebo obráceně, protože může fungovat ve dvou režimech a to elektromotor nebo generátor. Skládá se ze dvou částí, statoru a rotoru. Stator je statická část motoru a obsahuje permanentní magnety nebo magnety s budícím vinutím. Pokud je realizován magnety s budícím vinutím, tak má cívky zapojeny

do série a střídavě vytváří severní a jižní pól. Rotor, který je upevněn na hřídeli má konstrukci podle typu motoru. Stejnoseměrné motory dělíme na dva typy a to kartáčový, též nazývaný interně komutovaný a bezkartáčový nebo také elektronicky komutovaný.[14]

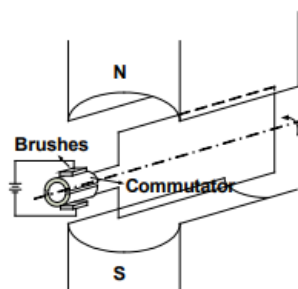


Obrázek 3.7: Stejnoseměrný motor použitý v této práci [10]

3.2.2 Typy stejnosměrných motorů

Kartáčový motor

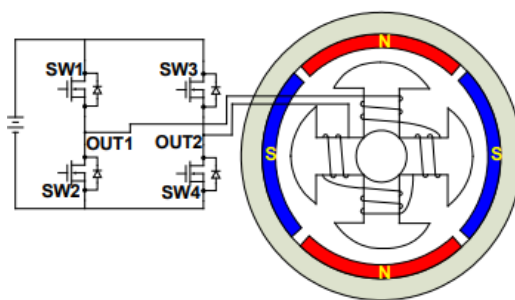
Jedná se o typ stejnosměrného synchronního motoru. Stator je složen z permanentních magnetů nebo elektromagnetů. Rotor se skládá z elektrotechnických plechů mezi kterými je mezera. V těchto mezerách se nacházejí cívky jejichž začátek a konec je přiveden na komutátor. Komutátor má kruhový tvar a je součástí rotoru. Po obvodu komutátoru jsou vzájemně izolované lamely, na které dosedají kartáče. Otáčením komutátoru zajišťujeme přepínání elektrického proudu, který vede do cívek na rotoru. Vlivem přepínání polarity a napájení správných cívek rotoru tak vznikají magnetické síly, které přivedou rotor do pohybu. Rychlost otáčení je závislá na velikosti napětí a proudu, který prochází vinutím motoru. Další faktor, který ovlivňuje rychlost otáčení je velikost brzdného momentu. Největší výhodou těchto motorů je jednoduchost a dosažitelnost vysokých otáček oproti střídavým motorům. Hlavní nevýhoda těchto motorů je komutátor, který náchylný na poruchy a údržbu.[15]



Obrázek 3.8: Kartáčový motor[4]

Bezkartáčový motor

Stejně jako kartáčový motor je typem stejnosměrného synchronního motoru. Jak z názvu vyplývá, bezkartáčový znamená, že motor již neobsahuje žádné kartáče, takže ani komutátor. Rotor je tak složen z permanentních magnetů a často se nachází vně statoru, kdežto u všech předchozích motorů tvořil stator jakousi schránku a rotor byl uvnitř. Stator je tvořen cívkami a jejich počet je závislý na počtu fází motoru. Otáčení motoru je zajištěno střídačem, který vytváří pulzy do statorových cívek a tím vytváří točivé magnetické pole. Řízení bezkartáčového motoru spoléhá na zpětnou vazbu polohy rotoru, kvůli správnému řízení pulzů do jednotlivých cívek a zajištění nejvyššího točivého momentu. Nejčastěji se proto používá s Hallovo senzorem, který nejjednodušeji zjistí v jaké poloze se rotor nachází. Některé bezkartáčové motory tak mají Hallovo sondu zabudovanou ve statoru na nepoháněném konci motoru.[4]



Obrázek 3.9: Bezkartáčový motor s naznačeným způsobem řízení[4]

3.3 Rozdíly mezi nimi

Ačkoliv by byl pro řízení lineárního posuvu nejlepší rovnou lineární bezkartáčový motor, který má rotor rozvinutý do roviny. Správným řízením fází statoru se pak pohybujeme lineárně po rotoru. Tyto motory jsou velice drahé, a tak si porovnáme výše uvedené motory.

Krokový motor se používá pro řízení v otevřené smyčce. Výhoda spočívá ve vynechání sestavování řídicího systému za cenu nevědomosti o aktuálního natočení rotoru. Pokud s krokovým motorem pracujeme s nízkou zátěží a pomalu, nestane se, že motor vynechá nějaký krok. Pokud se ale zátěž zvýší může se stát, že přeskočí krok, a my nemáme šanci zjistit, kromě opětovného najetí do nulové polohy, kde se motor nachází. U stejnosměrných motorů tedy musíme navrhovat řídicí systém, ale vždy s přesností snímače víme, kde se motor nachází či jak rychle se točí.

Největší výhoda krokového motoru je nízká cena, právě kvůli absenci snímače a řídicího obvodu. Když srovnáváme dva stejně velké krokové a stejnosměrné motory, krokový motor má při nízkých otáčkách veliký kroučící moment bez nutnosti použití převodovky, ale menší moment setrvačnosti. Je výborný při aplikacích s malým zrychlením a tam, kde chceme veliký přídržný moment. Disponuje spolehlivou opakovatelností a nezničí se při větším zatížení. Na druhou stranu má oproti stejnosměrnému motoru nízkou účinnost a s rychlostí mu klesá kroučící moment.

Stejnosměrný motor má plynulejší a tišší chod. Má konstantní kroučící moment v celém rozsahu rychlostí a možnost krátkodobého přetížení, při kterém může mít několikanásobně větší kroučící moment na danou chvíli. Tímto se dostáváme k nevýhodě stejnosměrného motoru, který když budeme často přetěžovat, sníží se jeho životnost a může dojít ke zničení. Vyniká vysokou rychlostí a přesností. Díky vysokým otáčkám je k pomalejším aplikacím nutné použít převodovku.

Kapitola 4

Návrh algoritmu pro plánování pohybu hráče

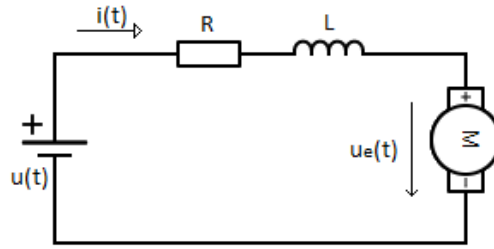
4.1 Matematický model DC motoru

Pomocí matematiky a fyziky jsme schopni popsat matematickým modelem dynamické chování stejnosměrného motoru pomocí diferenciálních rovnic. To přináší výhody zejména při návrhu regulační smyčky, kde lze v simulačním prostředí pozorovat všechny důležité návrhové požadavky a zkusit různé techniky řízení bez interakce s reálným motorem.

4.1.1 Odvození diferenciálních rovnic

Důležité je upozornit, že odvození probíhá při zjednodušujících předpokladech. Ten hlavní předpoklad je linearita všech následujících funkcí.

Odvození diferenciálních rovnic lze rozdělit na elektrickou a mechanickou část. V elektrické části si vystačíme s Kirchhoffovým zákonem. Následující obrázek 4.1 prezentuje elektrickou část v motoru, kde vstupem je napětí, které prochází vinutím motoru a přeměňuje elektrickou energii na mechanickou práci.



Obrázek 4.1: Elektrická část motoru

Vinutí motoru má odpor R a indukčnost L , které lze reprezentovat sériovým zapojením. Dále vinutí motoru vytváří zpětné elektromotorické napětí $u_e(t)$, které vzniká při otáčení rotoru. Výsledná rovnice popisující elektrickou část, vznikla pomocí druhého Kirchhoffova zákona, který zjednodušeně říká, že algebraický součet napětí ve smyčce je roven nule.

$$L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) = u(t) - u_e(t) = u(t) - k_e \omega(t) \quad (4.1)$$

V mechanické části figurují dvě rovnice. Jedna známá, která převádí definuje úhlovou rychlost otáčení a druhá, která popisuje rovnováhu momentů.

$$\omega(t) = \frac{d\varphi(t)}{dt} \quad (4.2)$$

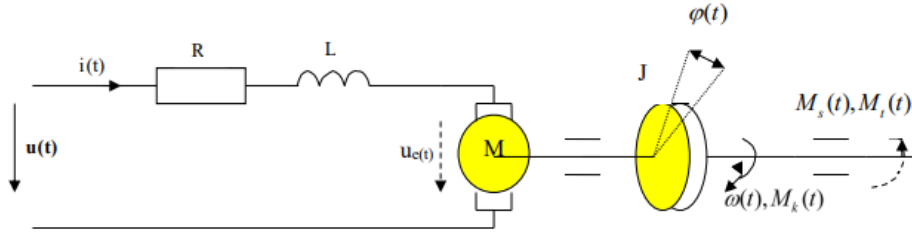
$$\sum_i M_i = 0 \quad (4.3)$$

Rovnice pro rovnováhu momentů se dá rozepsat jednotlivými momenty, kde kroutící moment motoru $M_k(t)$ se přeměňuje na setrvačný moment $M_s(t)$ a třecí moment $M_t(t)$.

Kroutící moment motoru se dá rozepsat na $M_k(t) = k_m i(t)$, kde předpokládáme lineární závislost na proudu protékající vinutím a k_m je konstanta točivého momentu motoru. Setrvačný moment přepíšeme na $M_s(t) = J \frac{d\omega(t)}{dt}$. Třecí moment nahradíme $M_t(t) = b\omega(t)$, kde předpokládáme lineární závislost na $\omega(t)$ a b je konstanta viskózního tření. Po dosazení dostaneme výslednou rovnici pro rovnováhu momentů.[7]

$$J \frac{d\omega(t)}{dt} + b\omega(t) = k_m i(t) \quad (4.4)$$

Nyní si zjednodušíme předchozí rovnice tak, že je nahradíme právě jednou. Jako vstup do systému budeme uvažovat napětí na kotvě motoru $u(t)$. Pokud



Obrázek 4.2: Náhradní schéma stejnosměrného motoru[7]

zvolíme jako výstup úhlovou rychlost tzn. $y(t) = \omega(t)$, tak nepotřebujeme rovnici, která slouží k získání úhlu $\varphi(t)$. Navíc když si z rovnice pro rovnováhu momentů vyjádříme $i(t)$ a dosadíme do rovnice popisující elektrickou část, vznikne nám jedna lineární diferenciální rovnice druhého řádu plně popisující model systému.[7]

$$\frac{JL}{k_m} \ddot{\omega}(t) + \frac{bL + JR}{k_m} \dot{\omega}(t) + \left(\frac{bR}{k_m} + k_e \right) \omega(t) = u(t) \quad (4.5)$$

Pokud chceme jako výstup systému úhel natočení hřídele tzn. $y(t) = \varphi(t)$, můžeme z výsledné rovnice v předchozím kroku navíc dosadit za $\omega(t)$ a vyjde nám lineární diferenciální rovnice třetího řádu.[7]

$$\frac{JL}{k_m} \ddot{\varphi}(t) + \frac{bL + JR}{k_m} \dot{\varphi}(t) + \left(\frac{bR}{k_m} + k_e \right) \varphi(t) = u(t) \quad (4.6)$$

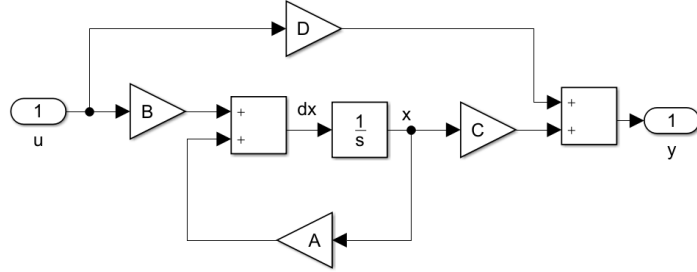
4.1.2 Stavová reprezentace

Pomocí třech předchozích rovnic máme motor popsáný diferenciálními rovnicemi. Systém lze popsat i maticově a to právě pomocí stavové reprezentace. Ta vznikne z předchozích rovnic a vhodně zvolených stavových proměnných.

Tvar stavového nebo také vnitřního popisu je obecně dán rovnicí:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) \end{aligned} \quad (4.7)$$

kde $x(t)$ představuje vektor stavu systému $x(t) \in \mathbb{R}^i$, $u(t)$ je vektor vstupu systému $u(t) \in \mathbb{R}^j$ a $y(t)$ je vektor výstupu systému $y(t) \in \mathbb{R}^k$. Dále A je matice dynamiky systému $A \in \mathbb{R}^{i \times i}$, B je matice vstupu systému $B \in \mathbb{R}^{i \times j}$, C je matice výstupu systému $C \in \mathbb{R}^{k \times i}$ a D je matice přímé vazby vstupu na výstup systému $D \in \mathbb{R}^{k \times j}$.



Obrázek 4.3: Stavová reprezentace

Stavové proměnné si vhodně zvolíme tak, aby byly reálně měřitelné, například $x_1(t) = i(t)$, $x_2(t) = \omega(t)$ a $x_3(t) = \varphi(t)$. Po této volbě lze diferenciální rovnice (4.5 a 4.6) přepsat do tvaru stavové reprezentace lineárního dynamického systému druhého a třetího řádu.

Rovnici (4.5) přepíšeme na tvar:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{k_e}{L} \\ \frac{k_m}{J} & -\frac{1}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} u(t) \quad (4.8)$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix}$$

a podobně rovnici (4.6) přepíšeme na tvar:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{x}_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{k_e}{L} & 0 \\ \frac{k_m}{J} & -\frac{1}{J} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u(t) \quad (4.9)$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix}$$

4.1.3 Parametry motoru

Reálný motor má vždy pevně dané konstrukční parametry, které ho přesně charakterizují. Bývá zvykem, že výrobce uvádí všechny tyto parametry v technické dokumentaci daného výrobku. Tyto parametry můžeme pak jednoduše vložit do matematického modelu a určit vnitřní popis. Tento vnitřní popis pak slouží k další fázi a to návrh ideálního regulátoru.

Technické parametry použitého motoru:

Název: Metal Gearmotor 25Dx63L mm MP 12V, s enkodérem se 48 pulzy na otáčku a převodem 9.7:1

Délka	63mm
Šířka	∅25 mm
Váha	95 g
Jmenovité napětí	12 V
Převodový poměr	9.68:1
Otáčky bez zatížení při 12V	770 rpm
Proud bez zatížení při 12V	200 mA
Maximální proud při 12V	2100 mA
Maximální točivý moment při 12V	0.155 Nm

Protože parametry neobsahují žádný z našich potřebných parametrů, výrobce doporučuje tyto parametry aproximovat. Nutné je si dát pozor při úpravě jednotek, aby byli vždy v základních jednotkách soustavy SI. K získání konstanty zpětného elektromotorického napětí stačí vydělit jmenovité napětí otáčkami bez zatížení při jmenovitém napětí.

$$k_e \approx \frac{12}{7800} = 0.001538 \frac{V}{\frac{m}{s}} \quad (4.10)$$

K získání konstanty točivého momentu motoru výrobce doporučuje vydělit zastavovací točivý moment zastavovacím proudem.

$$k_m \approx \frac{0.155}{2.1} = 0.073978 \frac{N}{A} \quad (4.11)$$

Další parametry, které nám chybí k plnému určení vnitřního popisu, lze změřit. Odpor změříme multimetrem. Odpor vyšel $R = 5.79\Omega$. Ověření správnosti lze dojít vydělením jmenovitého napětí motoru zastavovacím proudem a vyjde nám $R = 5.71\Omega$, což je skoro stejné. Indukčnost motoru jsem změřil měřičem indukčnosti a vyšlo mi $L = 7.39mH$.

Nyní chybí už jen dva parametry. Moment setrvačnosti J a konstanta viskózního tření b .

Moment setrvačnosti závisí na motoru a celé poháněné soustavě. Protože je ale moment setrvačnosti zanedbatelný závisí převážně na poháněné soustavě. Z parametrů výše a základního vztahu pro výpočet momentu setrvačnosti válce jsem určil přibližnou hodnotu bez poháněné soustavy. $J = \frac{1}{2}mr^2 = 0.02gm^2$.

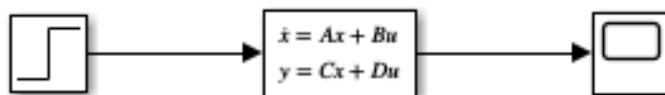
Poslední konstantu musíme určit experimentálně z naměřených vzorků samotného motoru, kde bude zanedbatelná a poté i motoru s poháněnou soustavou, kde si dopředu nedokážu odhadnout její velikost.

4.1.4 Model systému v prostředí Simulink

Diferenciální rovnice a vnitřní popis systému by nám sami o sobě nic neřekly nebýt kvalitního simulačního softwaru, který nám během chvíle nasimuluje průběh těchto rovnic. Jeden takový vyvinula a pořád vyvíjí firma Mathworks. Jejich produkt Matlab a Simulink jsou dokonalou pomůckou pro práci s maticemi, diferenciálními rovnicemi a vlastně s matematikou obecně.

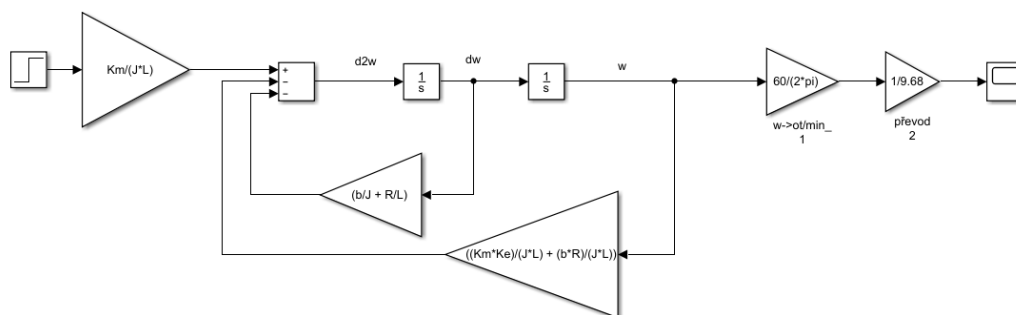
Programování v Simulinku probíhá spojováním funkčních bloků. Na následujících obrázcích je vidět, jak v Simulinku vypadá model systému pomocí vnitřního popisu systému a také pomocí diferenciálních rovnic.

Pro simulaci vnitřního popisu systému použijeme blok State-space, do kterého stačí zadat vypočtené matice A,B,C a D, které jsme si odvodili výše. Protože jsme si pro matici A ještě neodvodili neznámý parametr b , konstantu viskózního tření, použijeme pro začátek třeba $b = 0.001 \frac{kg}{s}$. Pokud chceme mít model motoru bez zátěže již dopředu podobný reálnému motoru, můžeme k parametru b dojít třeba tak, že při jednotkovém skoku tj. $u = 1V$ bychom na výstupu hřídele měli naměřit otáčky stejné jako při běhu bez zatížení podělené nominálním napětím. $\omega = \frac{770rpm}{12V} = 64.17rpm$. Po několika pokusech dojdeme k číslu $b = 0.179 \frac{g}{s}$.



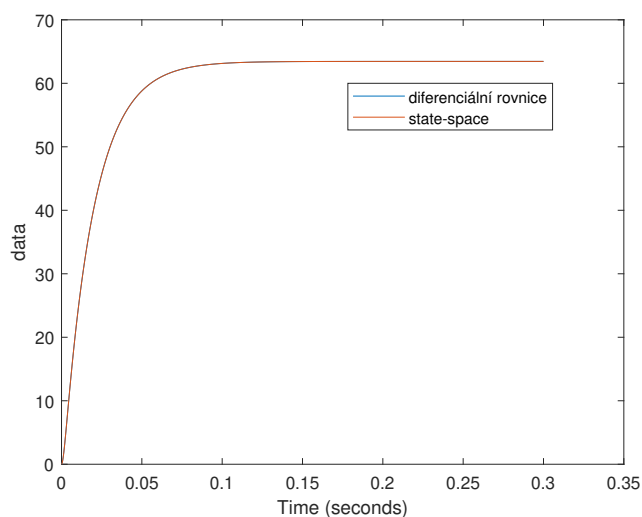
Obrázek 4.4: Použití bloku state-space

Na obrázku 4.5 je ještě ukázka zapojení přesně podle diferenciální rovnice, kde bude na výstupu úhlová rychlost $y(t) = \omega(t)$. Zde není zapojení tak jednoduché jako u předchozí simulace, ale jsou zde použity pouze základní bloky z programu Simulink.



Obrázek 4.5: Model v Simulinku podle diferenciální rovnice

Na závěr si v obrázku 4.6 ukážeme srovnání výstupů obou modelů na odezvu jednotkového skoku. Jak si ale už dopředu můžeme myslet, tyto průběhy budou naprosto totožné. Porovnání bude mít význam až s reálným motorem, kde poté můžeme upravit například moment setrvačnosti modelu nebo konstantu viskózního tření, abychom dostali přesnější model vůči reálnému motoru.



Obrázek 4.6: Ověření shodnosti modelů na jednotkový skok

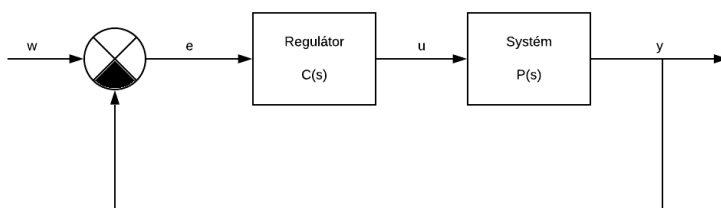
4.2 Teorie regulátorů

Důvod, proč jsme chtěli znát matematický popis stejnosměrného motoru, neboli systému, je prostý. Šlo nám o znalost dynamického chování motoru. Nyní když ji máme, můžeme se přesunout k druhé fázi, a to řízení takového systému. Návrh správného regulátoru pro specifický problém se týká správného nastavení konstant pro dané požadavky.

Předtím než začneme navrhovat regulační obvod pro tento problém, musíme podle úlohy znát veličinu, kterou budeme regulovat. V této úloze se zabýváme regulací polohy natočení motoru. Parametry regulátorů určíme podle metody tvarování smyčky ve frekvenční oblasti, tzv. Loop-shaping.

4.2.1 Základ PID regulace

Základní regulační obvod je sestaven regulátorem, regulovaným systémem a zápornou zpětnou vazbou. Regulovaný systém je blok vyjádřený například diferenciální rovnicí nebo přenosovou funkcí, strukturu regulátoru se snažíme navrhnout a záporná zpětná vazba aktualizuje informaci pro regulátor, aby správně vyhodnotil aktuální situaci a vygeneroval správný akční zásah do regulovaného systému.



Obrázek 4.7: Základní regulační schéma

Veličiny použité ve schématu vyjadřují požadovanou veličinu w , regulační odchylku e , kde $e = w - y$, akční veličinu u a regulovanou veličinu y .

Blok systém vyjadřuje matematický model regulovaného systému, pro nás stejnosměrný motor. Regulátor, který navrhujeme nejčastěji reprezentuje přenosová funkce a v praxi je realizován až ve více než 90% aplikacích typem P, PI, PD nebo PID.

Nyní si přiblížíme podstatu jednotlivých složek PID regulátoru.

Proporcionální složka

Proporcionální složka je nejjednodušší ze všech. Označujeme ji písmenem P. Nejjednodušší je proto, že pouze násobí regulační odchylku konstantou K_P ale zároveň zlepšuje přesnost a rychlost regulace. Když se ale dostaneme na nebo přes kritické zesílení můžeme celý systém rozkmitat nebo změnit na nestabilní systém. Matematicky lze zapsat $u(t) = K_P e(t)$ nebo přenosem $C(s) = K_P$. [8]

Integrační složka

Integrační složka, jak již z názvu napovídá, integruje regulační odchylku a ještě ji násobí konstantou $\frac{1}{T_I}$. Označujeme ji písmenem I. Používá se hlavně pro odstranění nedosažení přesnosti regulace. Dále zpomaluje rychlost odezvy a snižuje robustnost ve stabilitě. Zavádí do regulační smyčky fázové zpoždění. Matematicky lze zapsat $u(t) = \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau$ nebo přenosem $C(s) = \frac{K_I}{s}$. [8]

Derivační složka

Derivační složka, jak znovu napovídá z názvu, derivuje regulační odchylku a násobí konstantou T_D . Označujeme ji písmenem D. Používá se pro zrychlení odezvy. Oproti integrační složce, zavádí fázový předstih a zvětšováním T_D zmenšujeme přeregulování a můžeme navíc zvýšit robustnost ve stabilitě. Matematicky lze zapsat $u(t) = T_D \frac{de(t)}{dt}$ nebo přenosem $C(s) = K_D s$. [8]

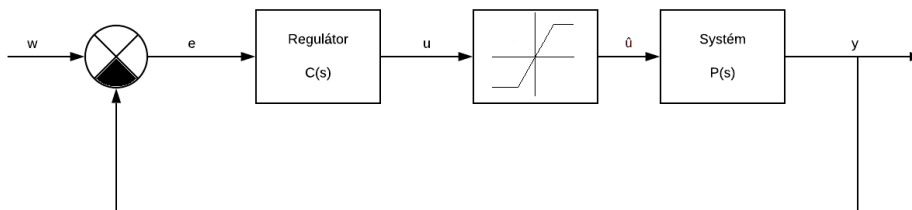
Spojením všech složek do PID regulátoru dostaneme přenos podle zapojení tj. sériové nebo paralelní. Typické je paralelní zapojení a matematicky se dá zapsat $u(t) = K_P [e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_D \frac{de(t)}{dt}]$ nebo přenosem $C(s) = K(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s) = K + \frac{K_I}{s} + K_D s$.

4.2.2 Nedostatky PID regulace

Na první pohled by se mohlo zdát, že kombinací P, I a D složek můžeme vytvořit dokonalý regulátor pro naše potřeby. Nicméně nic není dokonalé a tak i používání PID regulátorů má své nedostatky, které se dají potlačit, nebo alespoň předvídat a počítat s nimi. Jeden z častých problémů je omezení vstupu akční veličiny $u(t)$ do regulovaného systému.

Saturace

Saturace vzniká například u naší úlohy řízení stejnosměrného motoru. Jmenovité napětí motoru je 12V a překročení tohoto napětí bychom mohli nenávratně poškodit celý motor. Proto se do regulační smyčky přidává blok saturace, který omezuje akční veličinu $u(t)$. V bloku saturace lze nastavit horní a spodní mez. Toto omezení vnáší do regulačního obvodu nelinearitru, a tak musíme po zbytek návrhu mít na paměti, že může vzniknout a systém se nemusí chovat podle původních očekávání.



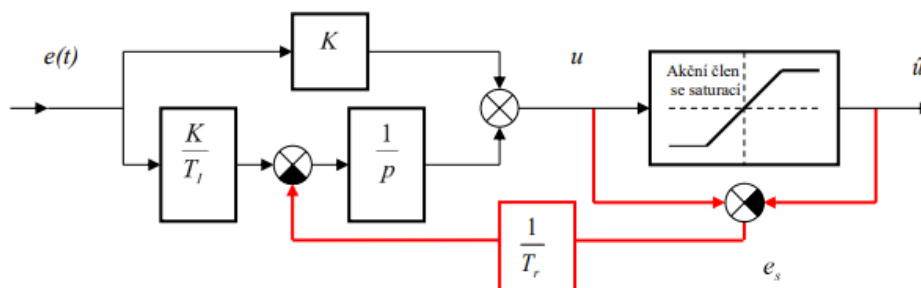
Obrázek 4.8: Základní regulační schéma se znázorněnou saturací

Na co si musíme dát pozor je použití integrační složky v regulátoru, když regulační obvod obsahuje saturaci. Pokud akční veličina dosáhne saturace, regulátor to nijak nezaznamená a integrační složka dál pracuje a zvětšuje onu akční veličinu. Důsledek toho je, že se regulátor pomaleji vrací do nenasaturované oblasti řízení. Tento jev se nazývá unášení integrační složky.

Unášení integrační složky

Unášení integrační složky je nežádoucí jev, kterému se však dá zabránit tzv. resetováním integrátoru. Toho docílíme tak, že zjistíme velikost odchylky před saturací a po saturaci. Pokud bude nulová, víme, že se regulátor nachází v lineární oblasti řízení a dále neprovádíme žádný zásah. Pokud je však nenulová, víme, že je výstup saturován a snažíme se zabránit naintegrovaní

akční veličiny tak, že odchylku vynásobíme konstantou $\frac{1}{T_r}$ a odečteme od integrační časové konstanty. Velikostí T_r ovlivňujeme rychlost resetování integrátoru viz. následující schéma.[8]

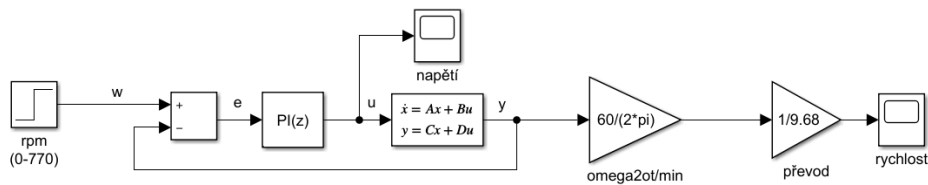


Obrázek 4.9: PI regulátor s ošetřením unášení integrační složky[8]

4.2.3 Regulace rychlosti

Naším cílem je sestavit regulační smyčku, která v co možná nejkratším čase dokáže reagovat na změnu referenční veličiny. Hlavním požadavkem je tedy agresivní regulátor, u kterého je žádoucí aby obsahoval překmit 10 až 20%. Vlivem tohoto překmitnutí se rychleji dostaneme na požadovanou rychlost a méně omezujeme šířku pásma polohové smyčky. Ideálním případem řízení by bylo postupně kaskádově řídit nejprve proud, poté rychlost a nakonec polohu. Touto kaskádovou regulací lze dosáhnout lepších výsledků. Protože ale nemáme v úloze zahrnutý obvod pro měření proudu na kostře motoru, omezíme se pouze na kaskádové regulaci, kde vnitřní smyčka, která má být vždy rychlejší, bude regulovat rychlost otáčení motoru a pomalejší vnější smyčka bude regulovat úhel natočení rotoru tzn. výslednou polohu hráče.

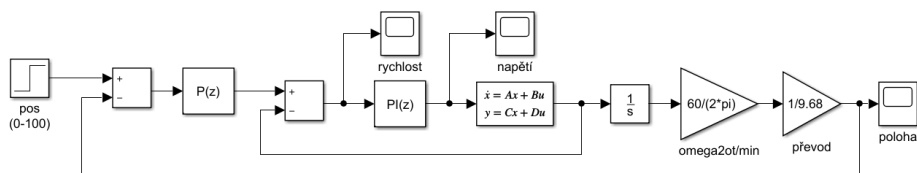
Pro regulaci rychlosti použijeme PI regulátor, kde proporcionální složka slouží k rychlému najetí na požadovanou hodnotu a integrační složka zajistí přesné dojetí na požadovanou hodnotu. Výsledný přenos regulátoru bude tedy $C(s) = K(1 + \frac{1}{T_I s})$. Na co bychom určitě neměli zapomenout je odstranění již zmíněného negativního jevu, unášení integrační složky, protože akční veličina může je omezena reálným motorem tj. +/- 12V. Schéma takové regulační smyčky je zobrazeno na obrázku 4.10.



Obrázek 4.10: PI regulátor rychlosti

4.2.4 Regulace polohy

Jakmile máme funkční regulátor rychlosti, můžeme se pustit do návrhu regulátoru polohy, který je kaskádově spojen s regulátorem rychlosti. Pro regulaci polohy použijeme P regulátor, protože integrační složka zajišťující dojetí do požadované hodnoty už je obsažena ve vnitřní regulační smyčce a derivační není potřeba. Výsledný přenos polohového regulátoru bude tedy $C(s) = K$. Při ladění si zde musíme dát pozor hlavně na překmit, který je u tohoto regulátoru návrhovým požadavkem číslo 2, hned po stabilitě celého systému. Rychlost najetí je zde omezena právě nulovým překmitem. Schéma výsledné kaskádové regulace je zobrazeno na obrázku 4.11.



Obrázek 4.11: Kaskádový polohový regulátor

4.3 Hodnocení kvality regulace

Hlavním požadavkem pro hodnocení kvality regulace je stabilita výsledného systému. Pokud je výsledná uzavřená regulační smyčka nestabilní, nemá cenu určovat ostatní podrobnosti.

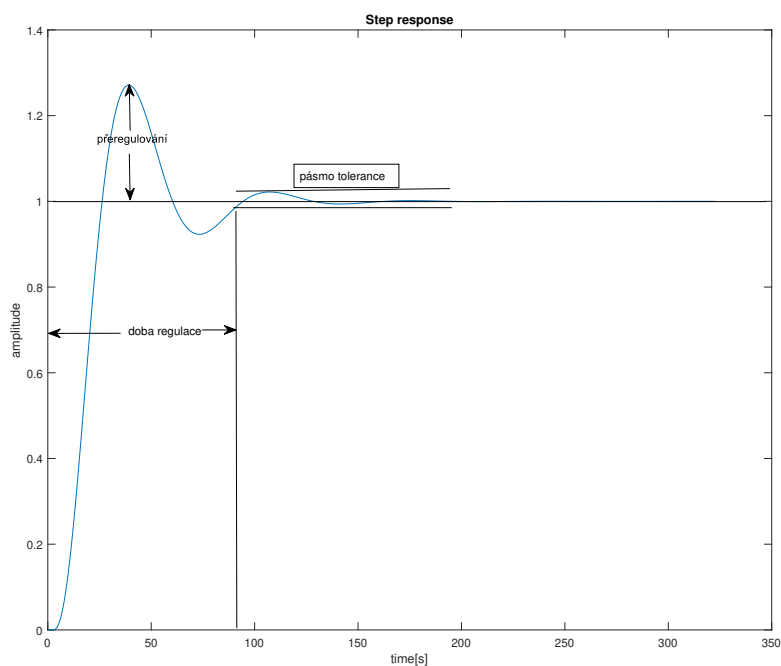
Jedním z nejpoužívanějších kritérií stability je Nyquistovo kritérium stability, které říká, že "nutnou a postačující podmínkou stability uzavřeného regulačního obvodu je požadavek, aby Nyquistova křivka $F_o(j\omega)$ pro $\omega \in (-\infty, \infty)$ obkličovala bod $(-1, j0)$ v záporném smyslu tolikrát, kolik má otevřený regulační obvod nestabilních pólů." [7]

Abychom po návrhu regulátoru mohli určit, zda je lepší nebo horší než regulátory co už jsme navrhli, a nebo jestli splňují naše prvotní požadavky na regulaci. Pro toto ohodnocení máme dva přístupy, kterými můžeme lépe zkoumat kvalitu regulace a posoudit, zda je vyhovující či ne.

4.3.1 Časová oblast

V časové oblasti zkoumáme hlavně přechodový děj. Jeho velikost, stabilitu, dobu náběhu, velikost přeregulování, celkovou dobu regulace, kmitavost aj.

Přechodový děj



Obrázek 4.12: Příklad přechodové charakteristiky

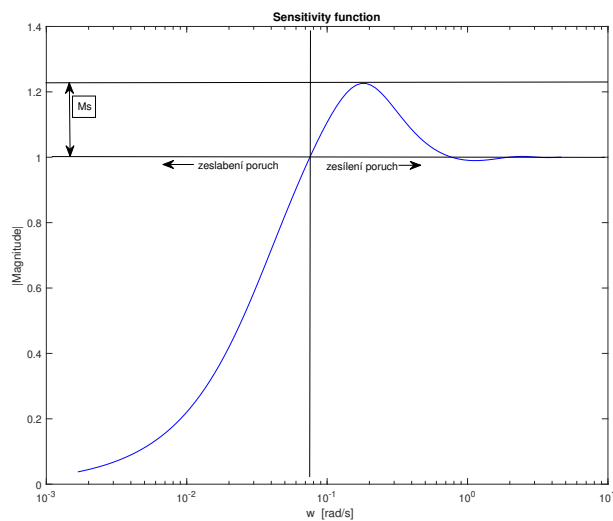
4.3.2 Frekvenční oblast

Ve frekvenční oblasti nás zajímá vliv frekvencí na výsledný systém. Zejména se jedná o vliv poruch na systém nebo v jakém frekvenčním pásmu bude výsledná regulační smyčka regulovat. K tomuto účelu slouží následující dvě funkce, citlivostní a komplementárně citlivostní.

Citlivostní funkce

Citlivostní funkce určuje, jak dobře se dokáže regulační obvod vypořádat s působením aditivní chyby na výstupu systému resp. při měření regulované veličiny y . Chceme aby tuto chybu nijak nezesiloval ba naopak aby se ji snažil potlačit. Její přenosová funkce je $S(j\omega) = \frac{1}{1 + C(j\omega)P(j\omega)}$.

Pro zobrazení funkce se nejčastěji používá amplitudové spektrum, ve kterém je vidět na nízkých frekvencích útlum zesílení tj. oblast, kde si systém dokáže poradit s aditivními poruchami na výstupu. Ve vyšších frekvencích poté amplitudový útlum klesá až zmizí. Od frekvencí, kde se zesílení blíží jedné už si systém není schopen poradit s chybami na výstupu a není dobré ho v těchto frekvencích provozovat. Často se stane, že při nějakých frekvencích chybu naopak zesiluje. Velikost tohoto zesílení určuje kvalitu návrhu regulátoru. Ukazatel maximálního zesílení amplitudového spektra značíme M_S a s tím souvisí další regulační požadavek, že $|S(j\omega)| < M_S$.

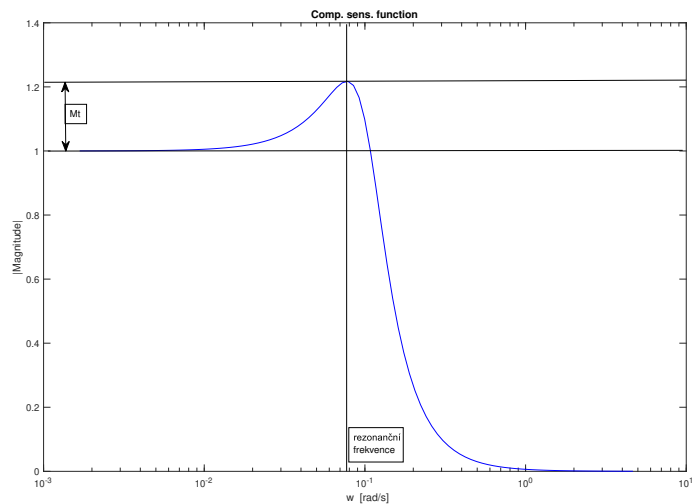


Obrázek 4.13: Příklad citlivostní funkce

Komplementárně citlivostní funkce

Komplementárně citlivostní funkce znázorňuje přenos od požadované hodnoty k regulované veličině a stejně jako u citlivostní funkce nás zajímá její amplitudové spektrum. Její přenosová funkce je $T(j\omega) = \frac{C(j\omega)P(j\omega)}{1 + C(j\omega)P(j\omega)}$.

Tato funkce popisuje chování uzavřené regulační smyčky pásmem, ve kterém bude dosažena požadovaná hodnota na vstupu systému. Většinou vypadá jako zrcadlová citlivostní funkce, tj. na nízkých frekvencích má nulové zesílení a s rostoucí frekvencí od nějaké mezní začne zeslabovat.



Obrázek 4.14: Příklad komplementárně citlivostní funkce

Tato mezní frekvence se označuje jako f_{max} a odečteme ji v amplitudovém spektru při $|T(j\omega)| = -3dB$. Od frekvencí 0 až f_{max} jsme schopni dobře reagovat na vstupní hodnoty.

Stejně jako citlivostní funkce nám zavádí nový regulační požadavek na velikost M_T , který omezuje maximální zesílení komplementárně citlivostní funkce a značíme ho $|T(j\omega)| < M_T$.

Kapitola 5

Realizace navržené strategie řízení

5.1 Použité prvky řízení

Jak už zaznělo dřív, stejnosměrný motor řídíme skrze uzavřenou smyčku. Abychom tuto smyčku mohli uzavřít, potřebujeme snímač. V našem případě je to enkodér, který je součástí našeho motoru a je připevněný přímo na hřídeli. Dále, protože řídicí jednotka není schopna pokrýt proudové i napěťové požadavky motoru, používáme pomocný řídicí obvod k motoru a řídicí jednotkou ovládáme motor přes tento pomocný řídicí obvod.

5.1.1 Enkodér

Enkodér obecně

Enkodér je rotační snímač, který se připojuje zpravidla na hřídel motoru nebo tam, kde chceme znát polohu či rychlost nějakého rotačního prvku. Enkodéry můžeme rozdělit na dva typy, a to absolutní a inkrementální. Absolutní enkodér nám dává vždy přesný úhel natočení resp. přesné rozmezí úhlu natočení. Má absolutní počet poloh, které nám jsou známé. Inkrementální enkodér funguje na principu relativní polohy a může se lišit počtem kanálů resp. signálů, které poskytují informaci o pohybu. K určení směru pohybu potřebujeme minimálně dva signály, abychom zaznamenali změnu v příchozí posloupnosti. Inkrementální enkodéry jsou levné a mají dosahují vysokých přesností.

Enkodér použitý v aplikaci

Enkodér, který používáme v naší aplikaci je inkrementální a obsahuje dva kanály, kde každý zvlášť vytváří pulzy podle aktuálního natočení. Řídíme se zde posloupností příchodu pulzů z obou kanálů, které nám prozradí směr otáčení i rychlost. Enkodér má rozlišení 48 pulzů na otáčku, když počítáme sestupnou i náběžnou hranu obou kanálů. Protože se ale enkodér nachází na hřídeli motoru a na druhé straně hřídele motoru je převodovka s převodem 9.68:1, vzniká nám na hřídeli za převodovkou rozlišení až 464.64 pulzů na otáčku.

Dva přístupy snímání

Použití enkodéru si můžeme vysvětlit dvěma způsoby. Buď budeme s nějakou pevnou periodou číst počet naakumulovaných pulzů za délku periody nebo nás bude zajímat čas za jakou dobu nastal další pulz.

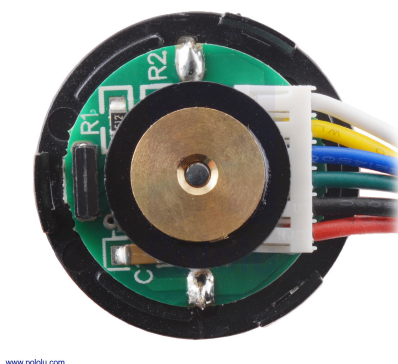
Když se zaměříme na ten druhý přístup, všimneme si, že přesně víme, kdy se objevil pulz, tudíž nemáme žádný nepřesný údaj. Tento přístup je přínosný v momentě kdy se motor točí malou rychlostí, a tak můžeme po každém pulzu reagovat a regulovat potřebnou veličinu. V tomto přístupu také počítáme s tím, že jsou od sebe pulzy vždy stejně daleko a natočeny o 90° . V praxi toto bohužel neplatí, což je první důvod, proč opustit tento přístup. Další důvod je použití při vysokých rychlostech, kde pulzy z enkodéru chodí tak rychle, že bychom několikanásobně zvětšili využití procesoru a nezbyl by prostor pro další operace. Poslední podstatný důvod, který zde uvedu je nemožnost rozlišení nulové rychlosti, protože abychom spustili další řídicí periodu potřebujeme pulz od enkodéru. Ten však nedostaneme.

Když se vrátíme k přístupu s pevnou periodou, můžeme si všimnout, že zde vzniká nepřesnost v počtech pulzů za periodu. Při dlouhé vzorkovací periodě dostaneme větší rozlišení v rychlosti, protože získáme více pulzů. Naopak při krátké vzorkovací periodě přesnost ztrácíme. Při malých rychlostech a krátké vzorkovací periodě můžeme dostat posloupnost, která může naznačovat, že objekt stojí, protože počet pulzů v těchto periodách je nulový. Kdybychom si pamatovali počty pulzů v předchozích periodách, mohli bychom určit, že se objekt pohybuje. Avšak kdyby se rychlost agresivně měnila, rychlost, kterou bychom získali, by byla hodně nepřesná.

V praxi se často obě metody kombinují tak, že dělám přírůstek většího počtu pulzů za přesně měřený čas mezi hranami signálů. Ten počet pulzů se mění plynule podle celkového času, aby se omezil vliv zaokrouhlovacích chyb. Je k tomu ale potřeba mít vyřešené časování na straně HW a složitější vyhodnocení v SW.

Velikost řídicí periody

Obecně pro řízení je lepší použít přístup s pevnou periodou a pomocí kompromisu určit velikost řídicí periody. Důvod je prostý. Protože řídicí jednotka pracuje diskrétně a vykonává regulační smyčku s nějakou periodou. Při této úloze jsem se snažil, aby nepřesnost v rychlosti byla co nejmenší, ale zároveň abychom rozlišili kdy se motor pohybuje a kdy už stojí. Proto jsem pomocí experimentu pomalu zvyšoval napětí na kostře motoru, dokud motor nerozpohyboval fotbalistu. Hned jak se fotbalista začal hýbat, změřil jsem čas mezi dvěma po sobě jdoucími pulzy. Závěrem jsem usoudil, že při vzorkovací periodě $10ms$ bezpečně rozlišíme, zda se fotbalista hýbe či nikoliv a zároveň získáme dostatečně velké rozlišení rychlosti pro regulaci.

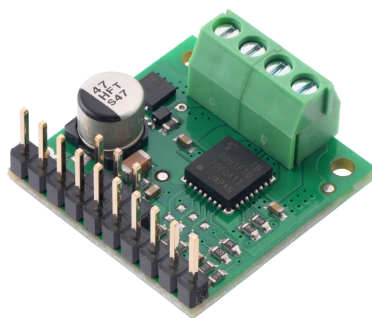


Obrázek 5.1: Enkodér použitý v této práci [10]

5.1.2 Pomocný řídicí obvod k motoru

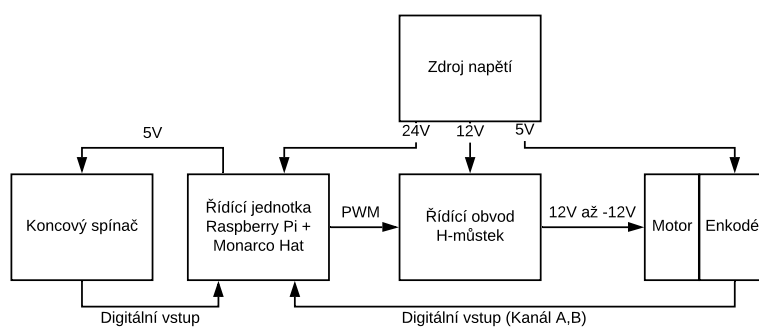
Jak bylo zmíněno výše, naše řídicí jednotka není schopna dodat motoru potřebné napětí a proud sama, proto potřebujeme pomocný řídicí obvod. K řízení stejnosměrných motorů se nejčastěji používá H-můstek. Skládá se ze čtyř tranzistorů a správným spínáním tranzistorů, pomocí řídicí jednotky můžeme docílit požadovaného napětí na kostře v obou polaritách.

Požadavkem na náš řídicí obvod je dodat potřebné napětí a proud. Zvolili jsme proto *TB9051FTG*, který dokáže dodat stálý proud až $2.6A$ při napětí v rozmezích od $4.5V$ do $28V$. Tento řídicí obvod navíc nabízí dva způsoby řízení a to tzv. *slow decay* a *fast decay*. Slow decay používáme tam, kde chceme řídit brzdění motoru za cenu použití dvou pulzně-šířkových (PWM) výstupů řídicí jednotky, kde se každý využívá pro řízení v jednom směru. V případě fast decay potřebujeme o jeden výstup řídicí jednotky navíc, ale už jen jeden PWM. Zde totiž velikost napětí na kostře motoru ovlivňujeme jedním PWM výstupním pinem, a zbylé dva můžeme použít digitální k určení směru otáčení. Nevýhoda tohoto způsobu je, že nejde ovlivňovat rychlost brzdění a tak v naší aplikaci využíváme způsobu slow decay.



Obrázek 5.2: Použitý řídicí obvod [11]

5.1.3 Schéma zapojení

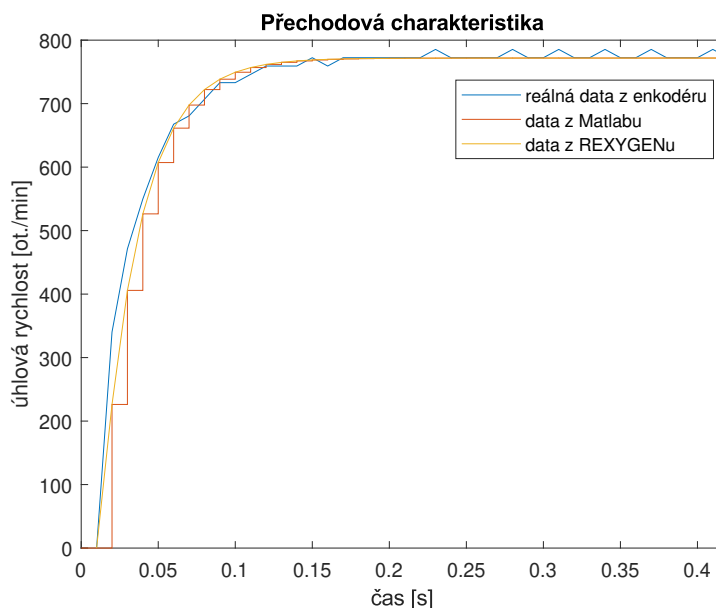


Obrázek 5.3: Blokové schéma zapojení

5.2 Realizace motoru bez zátěže

5.2.1 Identifikace - graybox

Identifikaci systému můžeme provést třemi způsoby. Jedná se o tzv. black box, gray box a white box. V případě black box identifikace se jedná o způsob, kdy nemáme žádnou teoretickou znalost o systému a systém identifikujeme na základě odezvy na vstupní signály, které dostatečně popíší daný systém. Těmito signály mohou být skok, krátký impuls nebo harmonická funkce s rozmítanou frekvencí. White box předpokládá dokonalou znalost systému, kde systém popisuje známá diferenciální rovnice a známe všechny její parametry. Tento způsob většinou nefunguje v složitějších systémech. Poslední gray box, který využíváme i my, je zlatá střední cesta mezi black a white boxem. Známe rovnici systému, ale neznáme všechny parametry (viz. kapitola 4). Proto se pouštíme do experimentální identifikace díky které zjistíme zbylé, neznámé parametry.



Obrázek 5.4: Odezva na vstup 12V

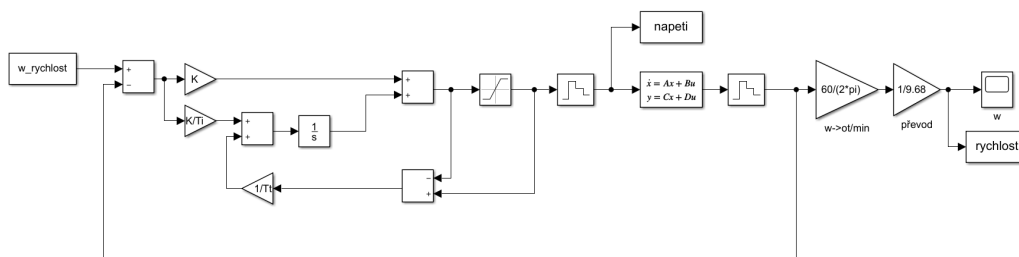
K experimentální identifikaci jsem používal logický analyzátor DSLogic plus, který dokáže s vzorkovací frekvencí 100MHz přesně určit, kdy nastali náběžné a sestupné hrany. Díky programu DSView, jsme si je mohli vyexportovat a dále zpracovávat v programu Matlab. Výsledek můžeme vidět na obrázku 5.4, kde se nachází spolu s výstupem z Matlabu a REXYGENu. Dále

také vidíme, že výstup z posledních dvou zmíněných je z hlediska diskretních kroků totožný, proto budeme následně porovnávat pouze reálná data proti modelu v jednom ze zmíněných programů.

V modelu používáme již upravené hodnoty hledaných konstant. Došli jsme k číslům $J = 5 \cdot 10^{-6} \text{kgm}^2$ a $b = 0.179 \text{gs}^{-1}$.

5.2.2 Regulace rychlosti

Regulátor rychlosti sestavíme stejně jako v kapitole 4.2.3. Změna vzniká jen v diskretizaci signálu pomocí bloku "Zero-order hold", kde si vybereme lichoběžníkovou neboli Tustinovu metodu diskretizace. Tímto upravením dostaneme stejný model, jako bychom ho dělali v systému REXYGEN, a tak dále budeme modelování provádět pouze v programu Matlab (Simulink).



Obrázek 5.5: Regulátor rychlosti - Simulink

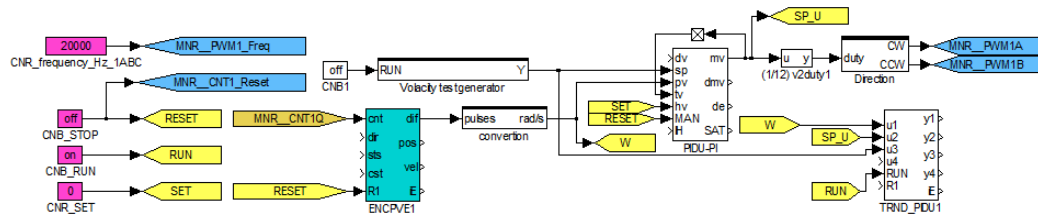
Pomocí tvarování smyčky ve frekvenční oblasti jsme docílili teoretických hodnot bezpečnosti v zesílení 10.4dB a bezpečnosti ve fázi přibližně 70 stupňů. V časové oblasti jsme dosáhli během tří period tj. za 0.03s chyby pouze 5% a to bez přeregulování. Po realizaci regulátoru na reálném systému jsme museli parametry ručně doladit, protože byl systém nestabilní.

Hodnoty, díky kterým jsme dosáhli výsledků zobrazených v obrázku 5.7 jsou $K = 0.0142$, $T_i = 0.051$ a $T_t = 0.0165$.

Řídící jednotka

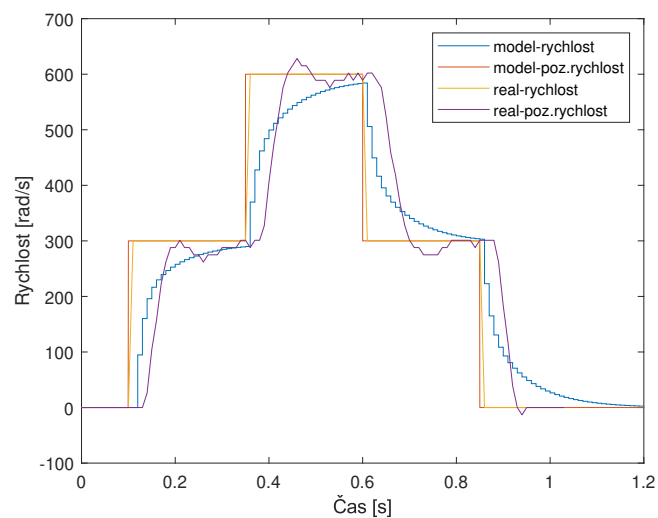
Řídící jednotka se skládá z minipočítače Raspberry Pi, který je obohacen o Monarco HAT. Monarco obohacuje samotné Raspberry Pi zejména o analogové vstupy a výstupy. Do Raspberry Pi je nainstalovaný systém REXYGEN, který umožňuje programovat aplikaci pomocí funkčních bloků, podobně jako

je tomu v Simulinku. Spojením získáme ideální prostředí pro řízení a regulaci aplikací širokých rozměrů.



Obrázek 5.6: Regulator rychlosti - REXYGEN

Jak můžeme vidět na obrázku 5.6, schéma je dost podobné původnímu schématu v Simulinku. Je pouze doplněné o převodníky například z napětí na velikost střídavého signálu, odlišení směru otáčení nebo přepočítání pulzů enkodéru na úhlovou rychlost.



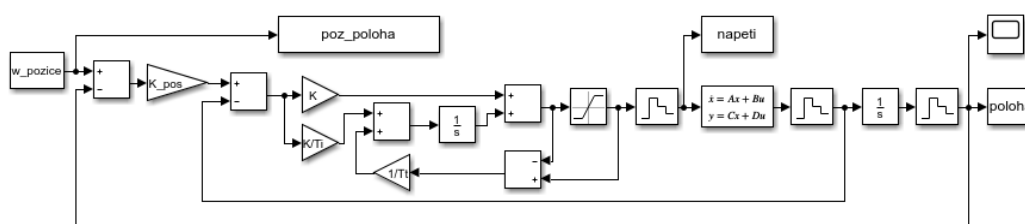
Obrázek 5.7: Porovnání modelu a reálného systému - rychlost

Z grafu je vidět, že rozdíl mezi modelem a reálným motorem bez zatížení je patrný. Důvodů může být několik. Jeden z nich je například nepřesnost v úrovni, kterou sem zavádí enkodér. Dále například špatně zvolený pracovní bod v místě maximálního napětí, kde motor ztrácí lineární průběh nebo také vliv nelineárního tření, které se zde projevuje.

5.2.3 Regulace polohy

Rozšířením na regulaci polohy "obalíme" dosavadní regulátor a systém. Budeme ho považovat jako jeden systém. K tomuto systému navrhne další regulátor, který nyní může být jen samotná P složka. Výstup původního systému musíme převést na správné jednotky. K tomu nám poslouží integrátor na výstupu, který převede výstup na polohu v radiánech.

Hodnota zesílení, díky které jsme dosáhli zmíněných výsledků je $K = 5.4$.



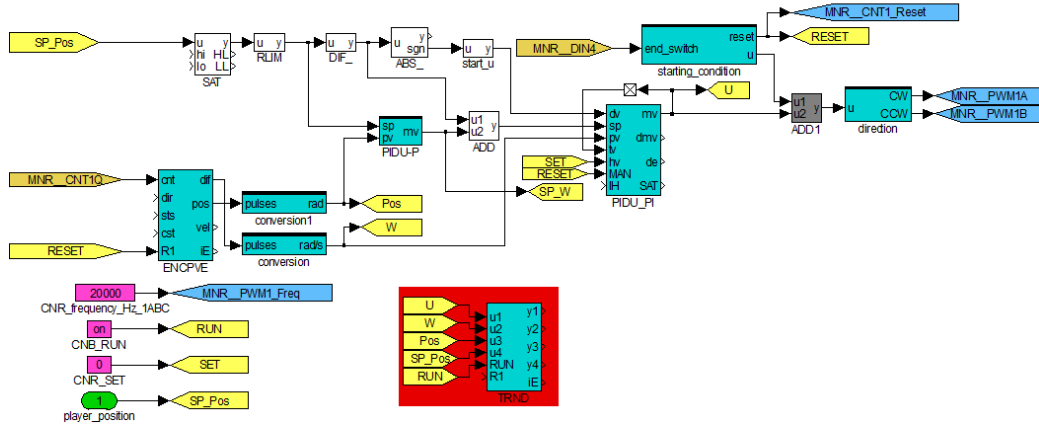
Obrázek 5.8: Regulátor polohy - Simulink

Schéma v REXYGENU se již změnilo daleko více. I když motor ještě není připevněn k modelu stolního fotbalu, schéma už je na to připravené. Když začneme u vstupu, tak hned na začátku za požadovanou polohou hlídáme velikost zadávané veličiny pomocí bloku SAT, aby nedošlo k poškození modelu. Hned za ním je blok RLIM, který se stará o strmost nárůstu. Když je nárůst moc strmý, dochází k překmitům. Následuje dopředná vazba PI regulátoru. Ta je zde proto, že motor připevněný k modelu překoná počáteční tření při vyšším napětí. Abychom nemuseli čekat na regulátor, než naintegruje alespoň na hodnotu potřebnou pro rozběh motoru, pomůžeme mu právě touto dopřednou vazbou. Blok diference zajišťuje tuto dopřednou vazbu jen když je změněna požadovaná hodnota, jinak by se motor pořád točil právě kvůli této dopředné vazbě. O nutnost integrátoru v předchozím schématu se zde stará blok ENCPVE, který obsahuje jak výstup dif, což je změna od předchozího okamžiku, a pro nás znamená velikost rychlosti. A výstup pos, který přesně čítá pulzy od enkodéru a vrací absolutní hodnotu počtu pulzů. Další změna je přidání subsystému startovací podmínky. Tento blok má celkem tři stavy. První stav je pomalé najetí ke koncovému spínači. Druhý stav je resetování regulátorů a bloku ENCPVE, aby nedocházelo k nechtěným situacím. A třetí stav je provozní režim, ve kterém setrvá po předchozích dvou. Poslední změna se nachází v subsystému, který se stará o konverzi napětí na střídu a převedení na správný PWM pin. Zde je přidána ochrana přehřátí motoru. Motor se totiž, jak už bylo zmíněno výše, začne pohybovat pouze od nějaké hodnoty

napětí. Do této hodnoty napětí se budí vinutí motoru nízkým napětím, které konstantně motor zahřívá a protože se nepohybuje, nechladí se.

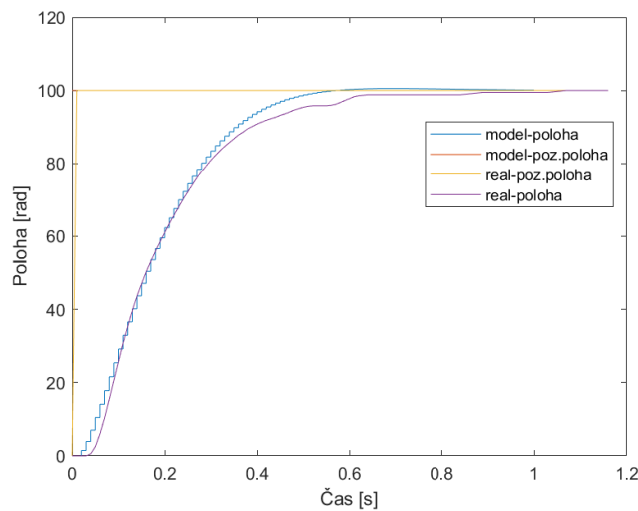
Kaskádní regulátor (P-PI) k modelu stolního fotbalu

169.254.210.232:43981



Obrázek 5.9: Regulátor polohy - REXYGEN

Následující graf znázorňuje porovnání modelu a reálného systému. Jak můžeme vidět, odchylka je nyní menší, než u porovnání v rychlosti.

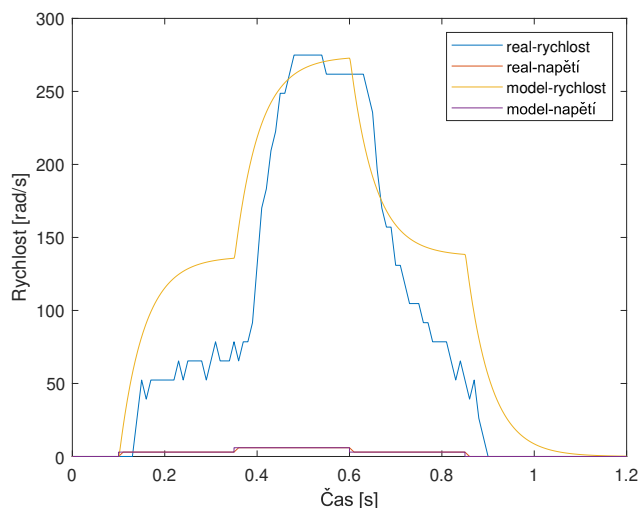


Obrázek 5.10: Porovnání modelu a reálného systému - poloha

5.3 Realizace motoru se zátěží

5.3.1 Identifikace

Při sestavování modelu motoru se zátěží se setkáme s několika problémy. První problém je příliš malá trajektorie fotbalisty pro přesnější identifikaci. Když děláme závislost napětí na otáčkách, můžeme dané napětí pustit jen na chvíli, protože narazíme na limit reálného modelu stolního fotbalu. Další problém je nelineární chování systému, kde při nulových rychlostech - rozjezdech je vyšší tření a chvíli trvá, než se motor roztočí. Dalším problémem je nemodelovaná dynamika pružného pásu, která může způsobit rozdíl oproti modelu, který počítá s dokonale tuhou mechanikou. Kvůli těmto nedostatkům, identifikujeme motor pomocí složitějšího signálu viz. obrázek 5.11.



Obrázek 5.11: Přípodobnění modelu reálnému systému

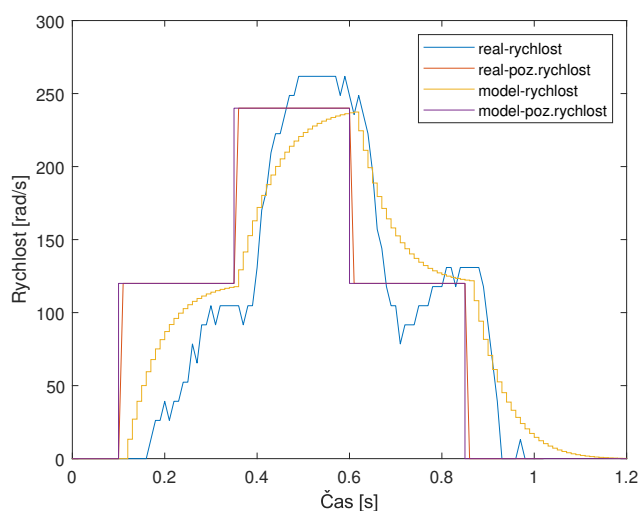
Je zde hezky vidět nelinearita modelu, a tak se snažíme model navrhnout co možná nejvíce podobný. Nicméně už teď víme, že dále získané konstanty z modelu pro regulaci musíme dále ručně upravit na samotném reálném modelu.

V modelu používáme již upravené hodnoty konstant pro moment setrvačnosti a konstantu viskózního tření. Došli jsme k číslům $J = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{kgm}^2$ a $b = 0.26 \text{gs}^{-1}$.

5.3.2 Regulace rychlosti

Postup při návrhu regulátoru je zde stejný, avšak regulátor navržený na modelu se musí ručně tlumit a doladovat. Regulátor navržený na modelu způsobuje nestabilní kmitání reálného systému, proto už v modelu navrhujeme méně agresivní regulátor, abychom ho mohli do reálného systému vůbec implementovat a poté ručně doladíme.

Konstanty PI regulátoru zde vyšli $K = 0.0135$, $T_i = 0.051$ a $T_t = 0.025$.

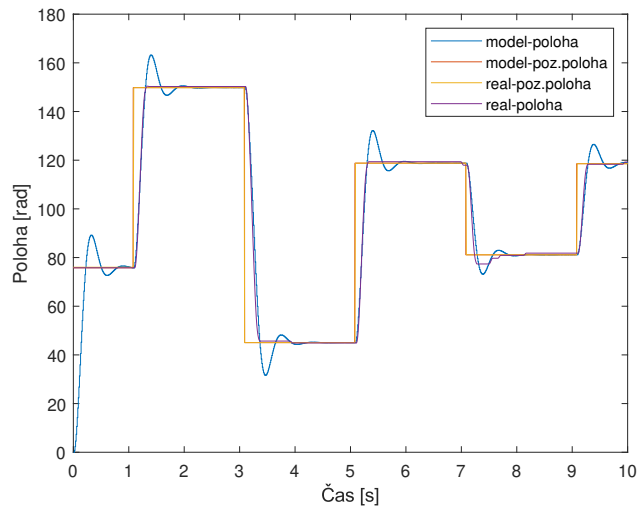


Obrázek 5.12: Porovnání modelu a reálného systému motoru se zátěží - rychlost

5.3.3 Regulace polohy

Na výsledném grafu porovnávající model a reálný systém můžeme vidět, že vyšší tření je nakonec žádoucí pro finální regulátor. Musíme brát ale v potaz, že modelový regulátor polohy vychází vždy z konstant použitých pro reálný systém. Kdyby tomu bylo naopak, modelová situace by vyšla o poznání daleko lépe než realita.

Konstanta zesílení pro P regulátor polohy je $K = 11$.



Obrázek 5.13: Porovnání modelu a reálného systému motoru se zátěží - poloha

5.4 Celkové porovnání

Když se vrátíme k motoru bez zátěže, můžeme říct, že jeho chování je hodně blízké modelu. Celý návrh regulátoru se dá z modelu překlopit na reálný systém jen s nepatrnými úpravami. Všechno především kvůli absenci nelineárního chování způsobené připojením zátěže. Pokud se přesuneme na část motoru se zátěží, zjistíme, že model je jen zjednodušená aproximace reálného chování motoru, a tak se navržené regulátory nechovají podle předpokladů modelu. Důraz na agresivní odezvu, na změnu požadované veličiny, je splněn včetně požadavku na absenci polohového přeregulování. Největší možná změna požadované veličiny tj. přejetí z jedné strany na druhou zvládne řídicí systém uregulovat bez překmitu a do času 0.3 vteřiny. Tento výsledek předčil více než třikrát původní záměr.

Kapitola 6

Závěr

Cílem této práce bylo seznámit se a vhodně vybrat prostředky pro řízení pohybu fotbalisty, navrhnout a zkonstruovat reálný model stolního fotbalu a v poslední řadě navrhnout algoritmus řízení pro plánování pohybu hráče.

Nejprve jsme seznámili s technikami převodu rotačního pohybu na posuvný a vybrali správnou možnost pro naši aplikaci. Tou byl převod pomocí řemene. Přes vlastní návrh konstrukce jsme se dostali k výběru vhodného aktuátoru, kde jsme rozebrali vlastnosti jednotlivých motorů a následně je vzájemně porovnali. Po výběru všech potřebných prvků k aplikaci a sestavení celé konstrukce jsme se přesunuli k návrhu řízení, kde jsme postupně odvodili rovnici matematického modelu stejnosměrného motoru. Následně jsme prošli základ PID regulace včetně jejích nedostatků. Závěrná část práce obsahuje realizaci navržené strategie řízení, kde jsme navrhovali řídicí systém pro stejnosměrný motor bez zátěže a následně i v zapojení do konstrukce modelu stolního fotbalu. Návrh řídicího systému se vydařil a i přes všechny nečekané překážky splnil naše prvotní očekávání, kde jsme kladli důraz na agresivitu a přesnost regulace.

Do budoucna by se postupně dalo dokončit ovládání fotbalisty v plném rozsahu přidáním dalšího aktuátoru pro rotační pohyb, díky kterému by fotbalista získal větší kontrolu nad míčem. Dále je zde možnost aplikovat řízení jednoho fotbalisty na řízení celého týmu a sladit souhru jednotlivých fotbalistů pro lepší kooperaci. V neposlední řadě by se hráči mohli s pomocí umělé inteligence naučit herní styl spoluhráče a stát se obávaným soupeřem.

Literatura

- [1] T. Agarwal. Stepper Motor – Types, Advantages & Applications. <https://www.elprocus.com/stepper-motor-types-advantages-applications/>, 2013.
- [2] Alibaba. Official foosball table. https://www.alibaba.com/product-detail/official-foosball-table-soccer-table-for_60605234755.html. Zpřístupněno: 18.4.2020.
- [3] Hobbyrobot. Krokové motory. <http://profirobot.cz/wp-content/uploads/2018/03/Krokov%C3%A9-motory.pdf>, 2013.
- [4] Y. Y. Jian Zhao. Brushless DC Motor Fundamentals Application Note. https://www.monolithicpower.com/pub/media/document/Brushless_DC_Motor_Fundamentals.pdf, 2011.
- [5] jrt. Mikrokrokování: sny a skutečnost. <http://robodoupe.cz/2016/mikrokrokovani-sny-a-skutecnost/>, 2016.
- [6] C. Layosa. Strengths and Limitations: Belt Drive vs. Ball Screw Actuators. *MISUMI*, 2020.
- [7] J. Melichar and M. Goubej. *Lineární systémy 1*. ZČU, 2017.
- [8] J. Melichar and M. Goubej. *Lineární systémy 2*. ZČU, 2019.
- [9] K. Mičkal. *Strojnictví - Části strojů pro učební a studijní obory SOU a SOŠ*. Praha: Sobotáles, 1995.
- [10] Pololu. 9.7:1 Metal Gearmotor 25Dx63L mm MP 12V with 48 CPR Encoder. <https://www.pololu.com/product/4862>. Zpřístupněno: 25.3.2020.
- [11] Pololu. TB9051FTG Single Brushed DC Motor Driver Carrier. <https://www.pololu.com/product/2997>. Zpřístupněno: 28.3.2020.

- [12] Stöber. Systém přídatného pastorku ZV a hřebenu. <https://www.rem-technik.cz/>. Zpřístupněno: 16.4.2020.
- [13] Teatechnik. Trapézové šrouby z oceli. <https://www.teatechnik.cz/trapezove-srouby-1/>. Zpřístupněno: 15.4.2020.
- [14] K. Tkotz. *Příručka pro elektrotechnika*. Praha: Sobotáles, 2012.
- [15] A. Vojáček. El. motory a jejich řízení - základní přehled - 1.díl. <https://automatizace.hw.cz/el-pohony-mereni-a-regulace/el-motory-a-jejich-řízení-zakladni-prehled.html>, 2014.

Seznam obrázků

2.1	Oficiální stůl pro stolní fotbal[2]	12
2.2	Příklad vačkového mechanismu s kladičkou[9]	14
2.3	Příklad hřebenového mechanismu[12]	14
2.4	Příklad mechanismu šroub-matice [13]	15
2.5	Příklad řemenového převodu[6]	15
2.6	Model stolního fotbalu	16
2.7	Konstrukce pro umístění kamery	16
2.8	Konstrukce pro lineární pohyb	17
3.1	Krokový motor[3]	19
3.2	Krokový motor s permanentním magnetem[3]	19
3.3	Krokový motor s proměnnou reluktancí[3]	20
3.4	Hybridní krokový motor[3]	21
3.5	Unipolární řízení[3]	21
3.6	Bipolární řízení[3]	22
3.7	Stejnoseměrný motor použitý v této práci [10]	24
3.8	Kartáčový motor[4]	25
3.9	Bezkartáčový motor s naznačeným způsobem řízení[4]	25
4.1	Elektrická část motoru	28
4.2	Náhradní schéma stejnosměrného motoru[7]	29
4.3	Stavová reprezentace	30
4.4	Použití bloku state-space	32

4.5	Model v Simulinku podle diferenciální rovnice	33
4.6	Ověření shodnosti modelů na jednotkový skok	33
4.7	Základní regulační schéma	34
4.8	Základní regulační schéma se znázorněnou saturací	36
4.9	PI regulátor s ošetřením unášení integrační složky[8]	37
4.10	PI regulátor rychlosti	38
4.11	Kaskádový polohový regulátor	38
4.12	Příklad přechodové charakteristiky	40
4.13	Příklad citlivostní funkce	41
4.14	Příklad komplementárně citlivostní funkce	42
5.1	Enkodér použitý v této práci [10]	45
5.2	Použitý řídicí obvod [11]	46
5.3	Blokové schéma zapojení	46
5.4	Odezva na vstup 12V	47
5.5	Regulátor rychlosti - Simulink	48
5.6	Regulátor rychlosti - REXYGEN	49
5.7	Porovnání modelu a reálného systému - rychlost	49
5.8	Regulátor polohy - Simulink	50
5.9	Regulátor polohy - REXYGEN	51
5.10	Porovnání modelu a reálného systému - poloha	51
5.11	Připodobnění modelu reálnému systému	52
5.12	Porovnání modelu a reálného systému motoru se zátěží - rychlost	53
5.13	Porovnání modelu a reálného systému motoru se zátěží - poloha	54