



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

SIMULAČNÍ MODEL SERVOPOHONU VÝROBNÍHO STROJE ZOHLEDŇUJÍCÍ ŘÍDÍCÍ SYSTÉM

SIMULATION MODEL OF A PRODUCTION MACHINE SERVO DRIVE TAKING INTO ACCOUNT THE
CONTROL SYSTEM

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Tejkl

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Rostislav Huzlík, Ph.D.

BRNO 2024

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student: **Bc. Jan Tejkl**
Studijní program: Výrobní stroje, systémy a roboty
Studijní obor: bez specializace
Vedoucí práce: **Ing. Rostislav Huzlík, Ph.D.**
Akademický rok: 2023/24

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.1111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Simulační model servopohonu výrobního stroje zohledňující řídicí systém

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je vytvořit model servopohonu tak, aby řídicí část co nejvěrněji simulovala řídicí systémy využívané výrobních strojů (např. Sinumerik od Siemens). Takový model musí zohledňovat široké množství parametrů využívaných v měničích (např. strojní konstanty, kompenzace atd.)

Cíle diplomové práce:

Literární rešerše
Systémový rozbor
Tvorba modelu servopohonu
Ověření vytvořeného modelu na reálném servopohonu
Zhodnocení možností využití pro praxi

Seznam doporučené literatury:

MAREK, Jiří. Konstrukce CNC obráběcích strojů III. Praha: MM publishing, s.r.o., 2014. MM speciál. ISBN 978-80-260-6780-1.

DRURY, Bill. Control techniques drives and controls handbook, 2nd edition. IET, 2001. ISBN 978-1-84919-013-8.

SOUČEK, Pavel, 2004. Servomechanismy ve výrobních strojích. Praha: Vydavatelství ČVUT. ISBN 80-010-2902-6.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D., FEng.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá problematikou simulace řízení servopohonu pomocí řídicího systému výrobního stroje, v řídicím systému se vyskytují různé konstanty a přepočty pro co nejpřesnější řízení polohy. Cílem této práce je vytvořit model servopohonu, s řídicí smyčkou simulující řídicí systém.

ABSTRACT

This thesis deals with the problem of simulation of servo using the control system of a production machine, in the control system there are various constants and recalculations for the most accurate position control. The objective of this work is to create a model of the actuator, with a control loop simulating the control system.

KLÍČOVÁ SLOVA

Řídicí systémy, Simulační model servopohonu, Řízení servopohonu

KEYWORDS

Control systems, Servo simulation model, Servo control

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

TEJKL, Jan. Simulační model servopohonu výrobního stroje zohledňující řídicí systém [online]. Brno, 2024 [cit. 2024-05-24]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/154202>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Rostislav Huzlík.

PODĚKOVÁNÍ

Velmi rád bych poděkoval svému vedoucímu diplomové práce Ing. Rostislavu Huzlíkovi, Ph.D. za pomoc a trpělivost. Dále děkuji své rodině a všem ostatním za jejich podporu a pomoc.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Rostislava Huzlíka, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 24.5.2024

.....

Tejkl Jan

OBSAH

1	ÚVOD	15
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	17
2.1	Simulace řízení pohonu	17
2.2	Metody simulace.....	17
2.2.1	Matematické modelování	17
2.2.2	Metody konečných prvků (MKP).....	18
2.2.3	Hardware-in-the-loop (HIL)	18
2.3	Základní struktura řídicí logiky motorů.....	18
2.3.1	Proudová smyčka.....	18
2.3.2	Otáčková/rychlostní smyčka.....	19
2.3.3	Polohová smyčka	19
2.4	Kvalita regulace	19
2.4.1	Přesnost polohování.....	19
2.4.2	Rychlost odezvy	19
2.4.3	Stabilita.....	19
2.4.4	Robustnost	19
2.4.5	Energetická efektivita	20
2.5	Kompenzace.....	20
2.5.1	Kompenzace tření	20
2.5.2	Kompenzace cogging momentu	20
2.5.3	Dynamické kompenzace.....	20
2.5.4	Klidový proud při konstantní poloze	20
2.5.5	Kompenzace dalších nelinearit	20
3	SYSTÉMOVÁ ANALÝZA PROBLEMATIKY	21
3.1	Definice řešené soustavy	21
3.2	Definice řešeného problému	22
3.3	Identifikace hardwaru se kterými bude model srovnáván	23
3.3.1	Soupis vybraných parametrů pro vybrané komponenty	23
4	SIMULAČNÍ MODEL	25
4.1	Model lineárního servopohonu	25
4.2	Model měniče a jeho napájení	28
4.3	Model mechanické části systému	28
4.4	Tření.....	29
4.5	Vnější síla	29
4.6	Měření.....	30
4.7	Pohyblivé hmoty	30
4.8	Model řízení	31
4.9	Regulátor polohy.....	31
4.10	Regulátor rychlosti.....	32
4.11	Převod síly na proud	32
4.12	Proudový regulátor	33
4.13	PWM generátor.....	33
4.14	Diskretizace datových signálů	34
4.15	Kompenzace cogging momentu a momentu setrvačnosti.....	34
5	OVĚŘENÍ MODELU	35

6	ZHODNOCENÍ A DISKUZE	37
7	ZÁVĚR.....	39
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	41
9	SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK.....	43
9.1	Seznam symbolů.....	43
9.2	Seznam obrázků.....	45
9.3	Seznam tabulek.....	47

1 ÚVOD

Cílem diplomové práce je navrhnout simulační model osy obráběcího stroje tak, aby tento model byl porovnatelný s reálným strojem a zároveň, aby se s ním co nejvíce shodoval. Model by měl být navrhnut s co nejmenším počtem potřebných vstupních parametrů tak, aby zároveň co nejvíce odpovídal chování reálného stroje.

Vzhledem k požadavku na komplexnost se očekává pokus o implementaci modelu s co nejvíce modulárními prvky. Tuto možnost mohou zajišťovat již předpřipravené knihovny v programu Matlab Simulink, který umožňuje vytváření modelu pomocí bloků a v rámci doplňkových licencí poskytuje pro různá technická odvětví i předpřipravené bloky usnadňující jejich tvorbu.

Po vytvoření modelu bude tento model podroben porovnání s reálným strojem.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Simulace řízení pohonu

Je klíčovou fází při návrhu a optimalizaci motorových systémů, zejména v aplikacích jako jsou CNC stroje. Tato činnost zahrnuje vytvoření matematických modelů, které přesně popisují dynamiku motoru a jeho interakci s řídicími algoritmy. Simulační modely zahrnují diferenciální rovnice nebo model vytvořený metodou konečných prvků, které reprezentují elektromechanické vlastnosti motoru. K tvorbě simulačních modelů se často používají programy s již předpřipravenou základní logikou nebo přípravou pro metody konečných prvků jako například MATLAB/Simulink nebo Ansys. Tyto simulace následně umožňují konstruktérům a výpočtářům testovat a optimalizovat regulační smyčky (proudovou, rychlostní a polohovou) bez nutnosti fyzického prototypu. Proces tvorby simulace zahrnuje analýzu chování systému pod různými provozními podmínkami, identifikaci a řešení potenciálních problémů, které mohou způsobovat různé nelinearity, např. třecí síly. Použití simulací zkracuje dobu vývoje, snižuje náklady a zajišťuje, že konečný produkt bude mít požadovanou úroveň přesnosti, spolehlivosti a efektivity.

2.2 Metody simulace

Simulace řízení pohonu se provádí pomocí různých metod, které umožňují různou úroveň detailu pro analýzu a optimalizaci výkonu simulovaných systémů. Tyto metody se dají rozdělit do tří základních skupin, a to podle způsobu implementace jednotlivých částí systému. Tyto metody se dají i kombinovat. Pro výpočet elektromotoru a jeho řízení může být tedy použito matematického modelu [1], nebo modelu na bázi metody konečných prvků (MKP). MKP se však většinou používá jen pro simulaci elektromotoru. Další možností je napojit reálnou řídicí část na simulovaný elektromotor. Takovému systému se pak říká anglicky Hardware-in-the-Loop (HIL) [2].

2.2.1 Matematické modelování

Tato metoda je jednou z nejběžnějších metod simulace, která zahrnuje vytvoření diferenciálních rovnic popisujících dynamiku motoru a jeho řídicích smyček. Tyto rovnice zahrnují parametry jako indukčnost, odpor vinutí, moment setrvačnosti a třecí moment. Transformace, jako jsou Parkova a Clarkova transformace, převádějí třífázové veličiny na dvoufázové, čímž se zjednodušuje regulace a snižují výpočetní nároky. Často se k jejich výpočtu používá numerických metod, které jsou snadno prototypovatelné skrz simulace pomocí softwarových nástrojů jako je MATLAB/Simulink. To umožňuje konstruktérům vytvářet a simulovat komplexní modely, které zahrnují nejen dynamiku motoru, ale i řídicí algoritmy, zpětnovazební smyčky a různé kompenzační techniky. Často se používají i v kombinaci s dále zmíněnými metodami a to tam, kde je přesnost těchto modelů stále dostačující. Tyto modely jsou totiž větší aproximací než další metody simulace.

2.2.2 Metody konečných prvků (MKP)

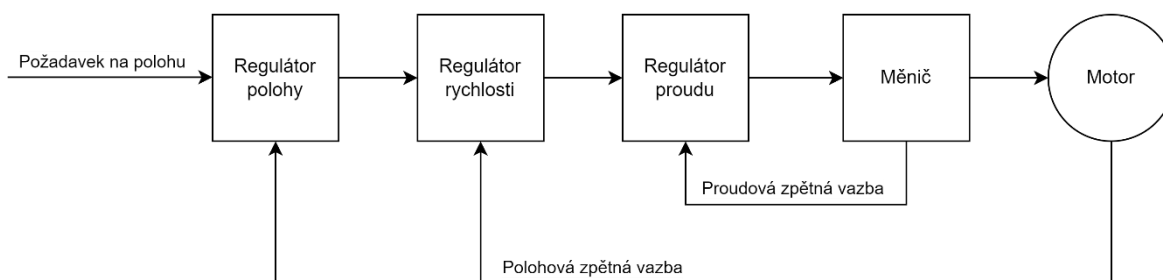
Jsou oproti matematickému modelování pomocí diferenciálních rovnic popisující MKP metody systému mnohem detailnější. Používají se především pro vývoj motoru, kde se testují jeho elektromagnetické vlastnosti nebo tepelné chování. Dají se použít i pro aplikace jako je testování systému, ale spíše zvyšují náročnost výpočtu a je tedy třeba zvážit, zda mají pro danou aplikaci smysl. Delší časové děje se dají většinou dostatečně popsat pomocí matematického modelování. [3]

2.2.3 Hardware-in-the-loop (HIL)

Používají se pro testování fyzického hardwaru v reálném čase, a to až v pozdějších fázích vývoje, kdy je třeba ověřit simulační předpoklady z předchozích fází návrhu. Odchytávají se zde chyby, které by se jinak mohly vyskytnout až v reálném provozu. Ověřuje se zde tedy správná funkce výrobku. Je to fáze jednotkových i integračních testů a využívá se hlavně pro zlevnění a zrychlení testování, jelikož ne vždy máme při vývoji dostupné všechny komponenty v aktuálním stavu vývoje tak, aby se z nich dal složit celý systém, nebo potřebujeme-li navýšit počet testovacích stavů a stavba kompletních stavů by byla příliš nákladná. Navíc takovéto testovací stavy mohou být umístěny na menším prostoru. Vytvářejí tak další stupeň testování před testováním kompletního hardwaru.

2.3 Základní struktura řídicí logiky motorů

Pro řízení třífázových servomotorů a lineárních motorů v CNC strojích se typicky využívá struktury s kaskádním řízením. Tato struktura obsahuje několik vnořených regulačních smyček: proudovou smyčku, rychlostní smyčku a polohovou smyčku. Umožňuje tyto smyčky počítat v různých časových cyklech, což zlepšuje stabilitu a výpočetní výkon systému. Každá z těchto smyček tedy přispívá k celkové stabilitě a přesnosti systému. Z tohoto důvodu je třeba klást důraz na správné ladění každé smyčky.



Obr. 1: Schéma řídicí struktury s kaskádním řízením pro elektromotor

2.3.1 Proudová smyčka

Proudová smyčka je nejnižší úroveň řídicí logiky. Její hlavní úlohou je řídit proudy v jednotlivých fázích motoru a zajišťovat jejich synchronizaci. Cílem je minimalizovat chybu mezi požadovaným a skutečným proudem. Na základě této chyby je generován signál s požadavkem na napětí, které je následně transformováno pomocí Parkovy a Clarkovy transformace do tří fází. Nakonec je předáno měniči, kde je přes vygenerování PWM pomocí střídače toto napětí generováno na jednotlivé fáze.

2.3.2 Otáčková/rychlostní smyčka

Nad proudovou smyčkou je rychlostní smyčka, která řídí rychlost otáčení motorové hřídele nebo rychlost lineárního pohybu v případě lineárních motorů. Rychlostní smyčka přijímá zpětnou vazbu ze změny polohy v čase. Rychlostní smyčka je kritická pro zajištění dynamického chování systému a minimalizaci přechodových jevů.

2.3.3 Polohová smyčka

Nejvyšší úroveň řídicí logiky je polohová smyčka, která zajišťuje dosažení a udržení požadované polohy motoru. Polohová smyčka používá zpětnou vazbu z polohových senzorů, jako jsou enkodéry nebo lineární pravítka k určení aktuální polohy a její korekci. Výstup z polohového regulátoru slouží jako referenční signál pro rychlostní smyčku, což umožňuje jemné doladění polohy motoru.

2.4 Kvalita regulace

Kvalita regulace je klíčovým aspektem řízení třífázových servomotorů a lineárních motorů v CNC strojích. Posuzuje se na základě několika kritérií, která společně určují, jak přesně a efektivně systém dosahuje a udržuje požadovanou polohu a rychlost. Mezi hlavní parametry, které ovlivňují kvalitu regulace, patří přesnost polohování, rychlost odezvy, stabilita, robustnost a energetická efektivita.

2.4.1 Přesnost polohování

Přesnost polohování je míra, do jaké systém dokáže dosáhnout a udržet požadovanou polohu. Vysoká přesnost je pro CNC obrábění kritická. I malé odchylky mohou vést k nekvalitním obrobkům. Přesnost je ovlivněna kvalitou zpětnovazebních signálů a také parametry PID regulátorů. Optimalizace PID parametrů (proporcionální, integrační a derivační složky) je zásadní pro minimalizaci polohové chyby a zajištění vysoké přesnosti.

2.4.2 Rychlost odezvy

Rychlost odezvy systému určuje, jak rychle může motor dosáhnout požadované polohy nebo rychlosti po změně vstupního signálu. Krátká doba odezvy je důležitá pro dynamické aplikace, kde jsou časté změny polohy nebo rychlosti. Příliš rychlá odezva však může vést k přechodovým oscilacím, zatímco příliš pomalá odezva může způsobit zpoždění a nepřesnosti. Kvalitní regulace tedy vyžaduje optimalizaci rychlostní smyčky tak, aby byla dosažena rychlá a stabilní odezva.

2.4.3 Stabilita

Stabilita systému znamená, že systém zůstává pod kontrolou a neosciluje nebo nekmitá kolem požadované polohy či rychlosti. Stabilita je zajištěna správným nastavením regulačních smyček a použitím vhodných kompenzačních technik. Stabilní systém musí být schopen vyrovnat se s různými provozními podmínkami a rušivými vlivy bez ztráty kontroly.

2.4.4 Robustnost

Robustnost je schopnost systému udržet vysokou kvalitu regulace i při změnách v parametrech systému nebo při vnějších rušivých vlivech. To zahrnuje odolnost vůči změnám zatížení, teplotním výkyvům a jiným vnějším vlivům. Robustní systém musí být navržen tak, aby se dokázal na tyto změny adaptovat a udržoval tak stabilní a přesné řízení.

2.4.5 Energetická efektivita

Energetická efektivita je také důležitým faktorem kvality regulace. Efektivní regulace minimalizuje energetické ztráty a přehřívání motoru, což je dosaženo optimalizací klidového proudu při konstantní poloze a používáním vhodných algoritmů řízení, které mají vysokou účinnost při řízení.

2.5 Kompenzace

Hlavním cílem kompenzace je eliminovat nežádoucí vlivy, které mohou negativně ovlivnit výkon a přesnost systému. Tyto vlivy zahrnují třecí síly, nežádoucí dynamické efekty, nelinearity v motorových charakteristikách a další rušivé faktory.

2.5.1 Kompenzace tření

Jedním z nejvýznamnějších rušivých faktorů je tření, které může způsobit nepřesnosti a kolísání polohy, zejména při nízkých rychlostech. Tření může být statické (když se motor právě rozbíhá) nebo dynamické (během pohybu). K jeho kompenzaci se používají různé techniky jako jsou modely tření (např. Coulombovo tření [4], viskózní tření) integrované do řídicího algoritmu. Předvídání a kompenzace těchto sil pomocí adaptivních algoritmů nebo regulací s dopřednou vazbou může výrazně zlepšit přesnost polohování. Pro kompenzaci tření se používá dopředné vazby. [5]

Modelování třecího momentu lze rozdělit na tři součásti tohoto problému

- **Coulombovo tření:** Suché tření, je nezávislé na rychlosti
- **Viskózní tření:** Kapalně tření, síla je úměrná rychlosti.
- **Stribeckův efekt:** Popisuje přechod mezi suchým a viskózním třením.

2.5.2 Kompenzace cogging momentu

Dalším faktorem, který se běžně kompenzuje, je cogging moment. Cogging moment vzniká nerovnoměrností magnetického pole. To způsobuje změny momentu a tím zároveň i vibrace systému. Tento efekt má dopad na chování motoru především v nízkých rychlostech. [4]

2.5.3 Dynamické kompenzace

Dynamické efekty, jako jsou vibrace a oscilační chování, mohou být kompenzovány pomocí filtrů. Například notch filtry [6] a Kalmanovy filtry mohou být použity k eliminaci specifických frekvencí vibrací, které se vyskytují v systému. Tyto filtry umožňují řídicímu systému rychle a přesně reagovat na změny v dynamice motoru a minimalizovat negativní dopady těchto efektů na přesnost polohování.

2.5.4 Klidový proud při konstantní poloze

Pro zajištění motoru v klidové poloze a zvýšení tuhosti pohonu i dynamičtější reakce na vnější vlivy je klidový proud nezbytnou součástí. Do motoru je tak pomocí měniče pouštěn stejnosměrný proud a jeho hodnota má vliv na celkovou tuhost systému.

2.5.5 Kompenzace dalších nelinearit

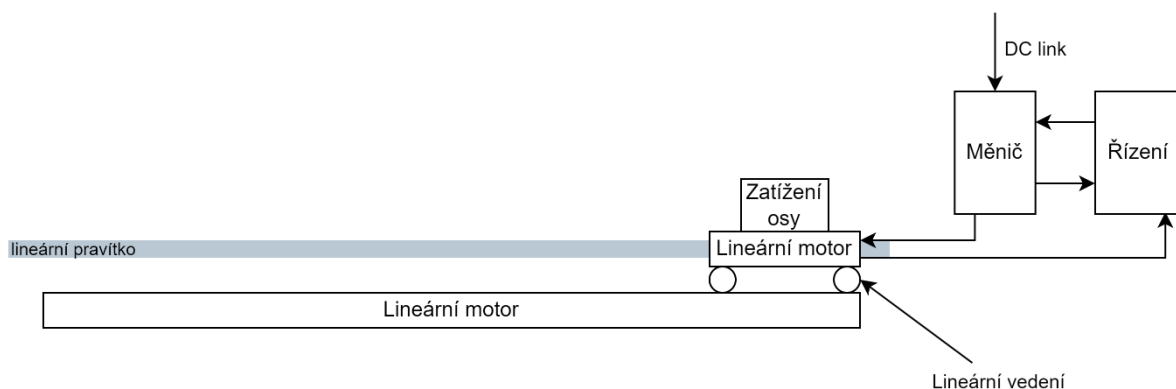
Nelinearity v charakteristikách motoru, jako jsou saturace magnetického pole nebo tepelné efekty, mohou také negativně ovlivnit regulaci.

3 SYSTÉMOVÁ ANALÝZA PROBLEMATIKY

Nejprve je třeba vydefinovat problém a systém, kterým se budeme zabývat, abychom mohli následně vhodně přikročit k jeho řešení v dostatečné hloubce a zároveň bez opomenutí podstatných veličin.

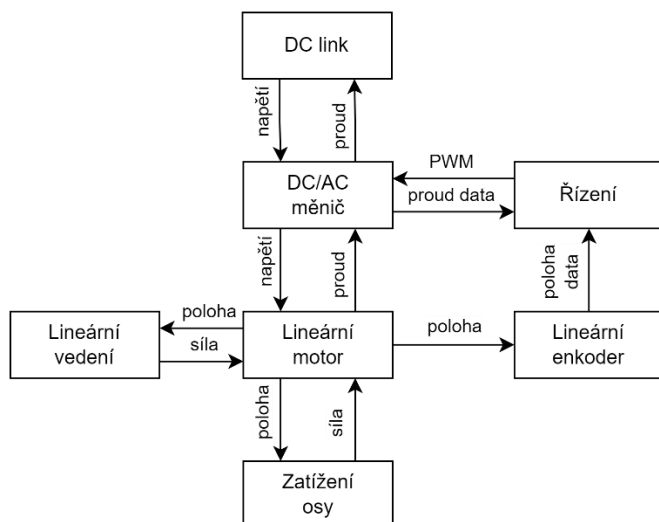
3.1 Definice řešené soustavy

Zaměříme se na řešení soustavy lineární osy CNC stroje s kaskádním řízením.



Obr. 2: Schéma pohonu s lineárním motorem

Na schématu viz. Obr. 2 můžeme vidět, že systém lineárního pohonu CNC osy, se skládá z mechanické konstrukce osy s lineárním vedením, lineárního motoru a jeho zatížením od samotné konstrukce osy, lineárního pravítka, měniče, napájení z DC linku a řízení. Pro jednotlivé komponenty je třeba si vydefinovat jejich vazby v systému, a tím tedy určit vzájemnou interakci mezi budoucími komponenty modelu.



Obr. 3: Schéma vazeb mezi komponentami v systému řízení s lineárním motorem

Na schématu vazeb viz. Obr. 3 DC link vytváří napětí pro DC/AC měnič, který následně toto napětí mění na třífázové střídavé napětí, na kterém je následně připojen lineární motor. V lineárním motoru se, v závislosti na indukci vyunutí a na dodávaném napětí od DC/AC měniče, indukuje proud, který přes DC/AC měnič vytvoří proud na DC linku. Dalšími vazbami jsou vazby polohové a silové. Po naindukování proudu v lineárním motoru se mezi statorem a rotorem vytvoří magnetické pole vytvářející sílu, která rozpohybuje rotor. Rotor začne působit na lineární vedení a hmoty osy spojené s rotorem lineárního motoru, které díky změně pohybu začnou vytvářet setrvačné síly zpětně působící na rotor. Poslední polohovou vazbou je vazba mezi rotorem lineárního motoru a lineárním enkodérem. Mezi lineárním enkodérem a řízením je datová vazba nesoucí informaci o poloze rotoru lineárního motoru. Další datová vazba je mezi AC/DC měničem a řízením, kde jde informace o proudu na jednotlivých fázích. Poslední vazbou je řídicí vazba, která ovládá pomocí PWM signálů tranzistory na H můstku v DC/AC měniči. Tepelné vazby jsou zanedbány.

3.2 Definice řešeného problému

Cílem práce je vytvořit model tak, aby řídicí část co nejvěrněji simulovala řídicí systém využívaný u výrobního stroje. Proto se pokusíme pro simulaci řízení použít bloky Matlab/Simulink knihovny Simscape. Výhodou takovýchto bloků by měla být jejich jednodušší implementace do modelu. Tyto bloky však mají i své nevýhody, kterými jsou například netransparentnost vnitřní logiky a vyšší nároky na hardware, na kterém model spouštíme. Po vytvoření modelu bude model otestován v porovnání s reálným hardwarem.

3.3 Identifikace hardwaru se kterými bude model srovnáván

Identifikovaný hardware je sepsán v Tab. 1.

Tab. 1: Specifikace použitých komponent na reálném stroji

Použité komponenty	
komponenta	identifikace produktu
měníč s controlem	Control techniques Unidrive M701
lineární motor	BAUTZ L3S Series
lineární pravítko	SIKO LE100/1
lineární enkoder	SIKO MB100/1

3.3.1 Soupis vybraných parametrů pro vybrané komponenty

Z měniče byly pomocí programu Connect od firmy Nidec Control Techniques, dále jen Connect, získány podstatné parametry. Zbylé parametry byly získány z dokumentace k měniči [7]. Získané parametry jsou sepsané v Tab. 2

Tab. 2: Specifikace podstatných parametrů použitých v měniči

měnič s kontrolerem			
Control techniques Unidrive M701			
ID parametr	popis parametru	hodnota	jednotka
03.010	Kpv	0,04	s/rad
03.011	Kiv	1	s ² /rad
03.012	Kdv	0,000001	1/rad
03.018	Setrvačnost - autotune	2,5	kgm ²
03.055	rozteč páru pólů	32	mm
04.013	Kpi - autotune	300	
04.014	Kii - autotune	688	
05.005	Napětí DC linku	583	V
05.007	maximální proud	4	
05.011	počet pólů	2	
05.017	Odpor statoru - autotune	3,088955	Ω
05.024	Ld - autotune	42,512	mH
05.032	Silová konstanta	60	Nm/A
05.037	Switching frequency	6	kHz
05.072	Lq - autotune	40,174	mH
-	krok rychlostní smyčky	250	μs
-	krok proudové smyčky	83	μs

Z datasheetu lineárního motoru byly vybrány následující parametry Tab. 3

Tab. 3: specifikace podstatných parametrů lineárního motoru

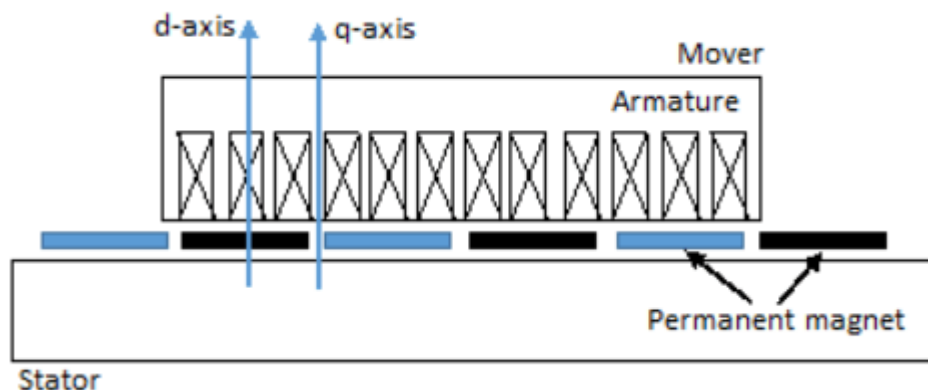
lineární motor		
BAUTZ L3S Series		
popis parametru	hodnota	jednotka
maximální síla	300	N
maximální proud	5,6	A
maximální rychlost	9,5	m/s
silová konstanta	60	N/A

4 SIMULAČNÍ MODEL

Pro elektromechanickou část systému byly využity bloky připravené v knihovně Simscape.

4.1 Model lineárního servopohonu

Elektromotor je spojením mechaniky a elektro-magnetického obvodu, protože je to vedle řízení nejsložitější komponenta celého systému a má velký vliv na chování celého systému. Pro začátek byl zkoumán matematický výpočet lineárního servomotoru, který je zmíněn dále.



Obr. 4: Schéma Lineárního motoru

Pro jeho výpočet je třeba si uvědomit, že zde existují tři druhy napětí. První je napětí působící proti odporu vodiče, další dvě působí proti změnám magnetického pole. Druhé je spojené s indukcí, kde působí proti změně magnetického pole způsobené vodičem a třetí je elektromotorické napětí, které se váže ke změně magnetického pole způsobené rotorem.

Pro motor tedy musí platit rovnice:

$$U_{celkem} = U_R + U_L + U_{EMF} \quad (1)$$

Pro každé vinutí pak platí: [8]

$$U_k = R_k \times I_k + \frac{d\Psi_k}{dt} + U_{kEMF} \quad (2)$$

Kde $k=a,b,c$ a, b, c jsou jednotlivé fáze motoru.

Podle Biotova-Savartova zákona je magnetický tok přímo úměrný velikosti proudu. Poté můžeme napsat vztah:

$$\Psi = L \times I \quad (3)$$

Nyní můžeme vzorec pro magnetický tok dosadit do předchozí rovnice a získáme tak závislost napětí na proudu.

$$U_k = R_k \times I_k + L_k \times \frac{dI_k}{dt} + U_{kEMF} \quad (4)$$

Tuto rovnici lze rozdělit na tři části. Použijeme značení U_{k1} , U_{k2} , U_{kEMF} .

$$U_k = U_{k1} + U_{k2} + U_{kEMF} \quad (5)$$

Z první části se dá určit úbytek napětí, ke kterému dojde v důsledku odporu vodiče cívky.

$$U_{k1} = R_k \times I_k \quad (6)$$

Druhá část rovnice udává napětí vytvořené odporem magnetického pole proti změně.

$$U_{k2} = L_k \times \frac{dI_k}{dt} \quad (7)$$

Předešlou rovnici můžeme změnit tak, abychom získali proud indukovaný ve vinutí v čase, pokud k němu připojíme napětí.

$$I_k = \int \frac{U_k}{L_k} \times dt \quad (8)$$

Ještě nám chybí elektromotorické napětí, které si také odvodíme.

Pokud používáme jednotky SI, můžeme využít rovnosti momentové konstanty K_t s konstantou elektromotorického napětí K_e . [9]

$$K_e = K_t \quad (9)$$

Rovnice pro elektromotorické napětí se dá vyjádřit jako:

$$U_{EMF} = K_e \times \omega \quad (10)$$

Po dosazení silové konstanty za konstantu elektromotorického napětí dostaneme:

$$U_{EMF} = K_t \times \omega \quad (11)$$

Pro transformaci do lineárního směru ještě definujeme ω jako:

$$\omega = N_p \times x \quad (12)$$

Kde N_p je faktor rozteče pólů lineárního motoru pro převod do polárních souřadnic.

$$N_p = \frac{\pi}{\tau} \quad (13)$$

Kde τ je rozteč mezi póly motoru.

Po aplikování Parkovy transformace na motorové rovnice tak získáme vztahy pro napětí v d, q, 0 souřadnicích:

$$v_d = R_s \times i_d + L_d \times \frac{di_d}{dt} - N_p \times v i_q \times L_q \quad (14)$$

$$v_q = R_s \times i_q + L_q \times \frac{di_q}{dt} + N_p \times v \times (i_d \times L_d + \Psi_{PM}) \quad (15)$$

$$v_0 = R_s \times i_0 + L_0 \times \frac{di_0}{dt} \quad (16)$$

Tyto rovnice používá dle Matlab helpu i Simscape block PMLSM [10] s tím, že vztah pro elektromagnetickou sílu a mechanickou sílu působící na motor se počítá následovně:

$$F = \frac{3}{2} \times N_p \times (i_q \times (i_d \times L_d + \Psi_{PM}) - i_d \times i_q \times L_q) \quad (17)$$

$$M \times \frac{dv}{dt} = F - F_L - B_m \times v \quad (18)$$

Protože se zkoumaný matematický model podle rovnic 17 a 18 shoduje s popisem vnitřní logiky v helpu Matlabu, bude tedy použita implementace lineárního synchronního motoru se sinusoidálním rozložením magnetického toku s názvem bloku *PMLSM* z knihovny Simscape Electrical. Použité parametry jsou zmíněny v Tab. 4.

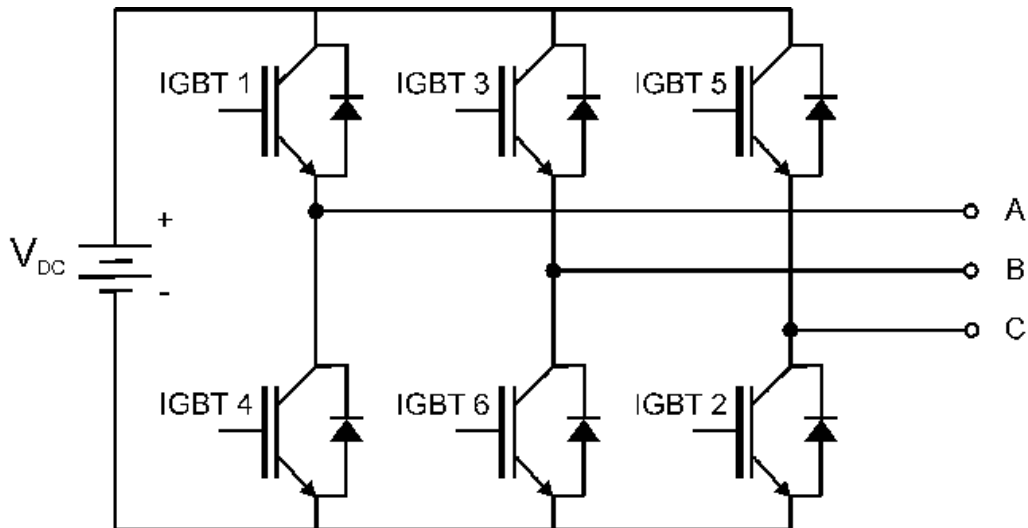
Tab. 4: Tabulka parametrů pro PMLSM

Parametry a nastavení PMLSM bloku		
nastavení typu zapojení	hodnoty	jednotky
rozteč pólů motoru	15	mm
silová konstanta	60	N/A
indukce statoru v ose d	34	mH
indukce statoru v ose q	34	mH
odpor statoru	5,60	Ohm

Tento blok má i možnost nastavení hmotnosti rotoru a tlumení, které by mohlo nahrazovat tření. Toto nastavení ale nebylo využito, jelikož bude použit komplexnější model tření a hmotnost osy bude společně s hmotností rotoru definována mimo tento blok

4.2 Model měniče a jeho napájení

Jelikož měnič je součástí driveru motoru a v dokumentaci je napsáno využití IGBT prvků [7], byl pro měnič vybrán blok z knihovny Simscape Electrical s názvem *Converter (Three-Phase)*. Vybraný blok umožňuje výběr typu spínacích prvků, které budou ovládány pomocí PWM od řídicí logiky. Pro model byly dle dokumentace měniče vybrány prvky IGBT, což jsou Bipolární tranzistory s izolovaným hradlem, které se u podobných měničů běžně používají. Schéma zapojení takového měniče je na Obr. 5. Hodnoty pro spínací prvky byly ponechány v defaultním stavu.

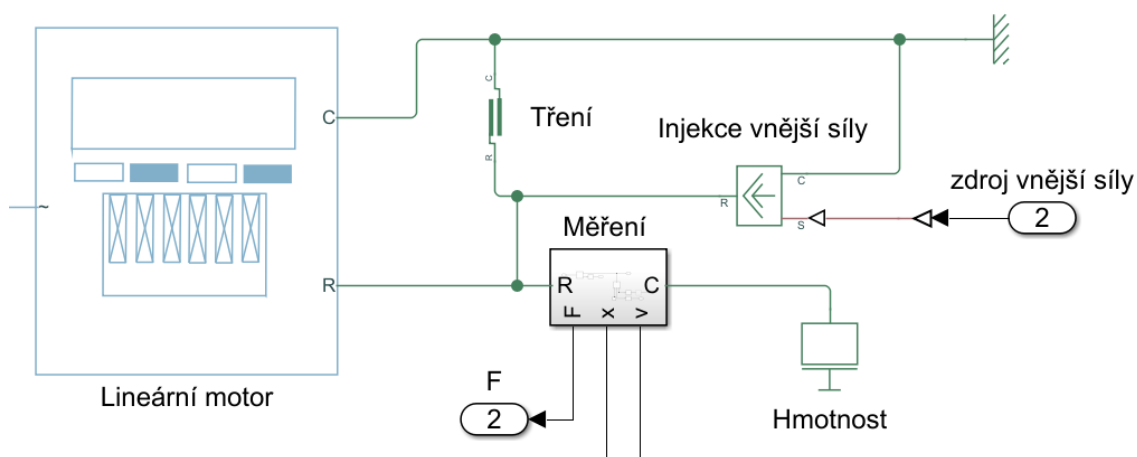


Obr. 5: Schéma zapojení IGBT v měniči [11]

Jako napájení měniče je použit blok pro ideální zdroj stejnosměrného napětí.

4.3 Model mechanické části systému

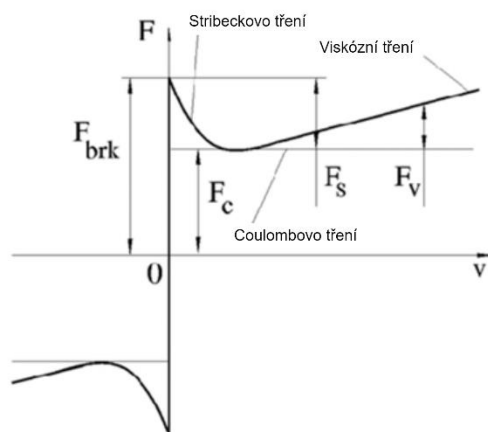
Do modelu mechanické části je zahrnuto tření, hmotnost a vnější síla, pomocí které budeme testovat podobnost simulovaného systému s reálným. Použitý model je zobrazen na následujícím Obr. 6.



Obr. 6: Část modelu použitá pro modelování mechanické části systému

4.4 Tření

Pro model tření byl využit blok s názvem *Translational Friction* z knihovny Simscape Mechanical, který obsahuje simulaci Striebeckova, Coulombova a viskózního tření. Chování tření které podporuje tento blok je vyobrazeno na Obr. 7. Parametry použité v tomto bloku jsou následně v Tab. 5.



Obr. 7: Chování tření které je implementováno v bloku *Translational friction*

Tab. 5: Parametry podstatné pro tření

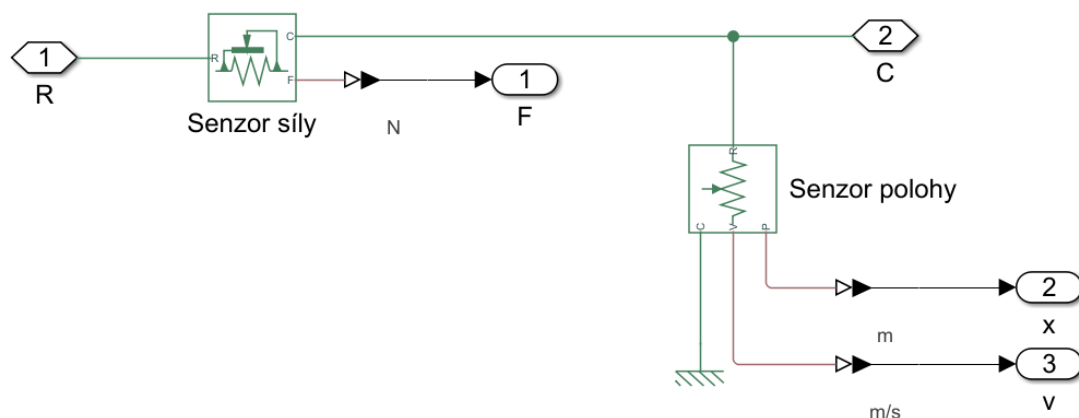
Parametry bloku simulujícího tření		
parametr	hodnoty	jednotky
Coulombovo tření	0,5	N
Viskózní tření	1,49	N*s/m

4.5 Vnější síla

Vnější síla je implementována pomocí bloku pro ideální zdroj síly z knihovny Simscape Mechanical. Blok má název *Ideal Force Source*. Tento blok slouží pro simulaci interakce modelu s vnějšími vlivy, například působení síly od obrobku.

4.6 Měření

Knihovna Simscape také obsahuje bloky pro měření síly a polohy. Tyto bloky jsou v modelu využity pro získávání polohy systému a síly, které působí na rotoru lineárního motoru. Ze senzoru polohy lze využít i výstupu s rychlostí a zrychlením. Implementované řešení je vyobrazeno na Obr. 8.



Obr. 8: část modelu použitá pro měření polohy a síly na rotoru

4.7 Pohyblivé hmoty

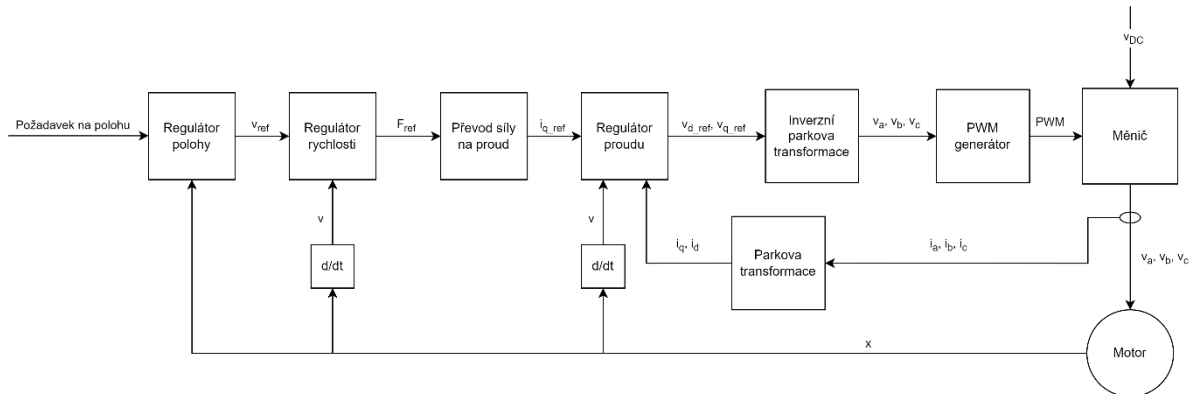
Pohyblivé hmoty jsou do modelu zaneseny pomocí bloku knihovny Simscape Mechanical pojmenovaném *Mass*

Tab. 6: Parametry pro simulaci pohyblivých hmot osy CNC stroje

Parametry bloku simulujícího pohyblivé hmoty		
parametr	hodnoty	jednotky
Hmotnost	3,5	kg

4.8 Model řízení

Tento model můžeme rozdělit do několika dílčích kroků. Je třeba vytvořit regulátor polohy, rychlosti, převod momentu na proud, dále regulátor proudu a PWM generátor, tak jak je to vyobrazeno na Obr. 9. V poslední řadě potřebujeme z měřených hodnot, které mají vstupovat do řídicí smyčky, vytvořit diskrétní hodnoty. Jelikož reálný systém vyčítá hodnoty v předem definovaných časových intervalech z lineárního enkodéru nebo proud z měniče.



Obr. 9: Schéma řízení motoru s proměnnými které vytváří vazby mezi logickými bloky

4.9 Regulátor polohy

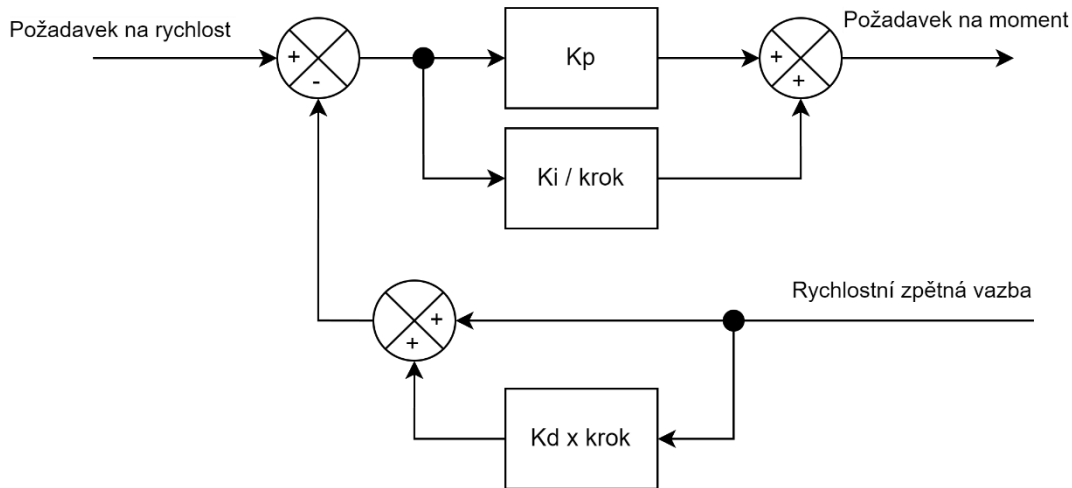
Jako regulátor polohy je použitý regulátor jen s proporcionalní složkou. Tato regulace se na skutečném stroji odehrává mimo řízení měniče, a to v řídicím systému. V tomto případě je použit Sinumerik od firmy Siemens. U regulátoru polohy byly zanedbány limity maximální a minimální polohy. Pokud by byly v budoucnu potřeba, dají se tyto limity doplnit do PID bloku, který zajišťuje regulaci a má též funkci pro limitaci výstupních hodnot.

Tab. 7: Parametry pro regulátor polohy

Parametry regulátor polohy		
parametr	hodnoty	jednotky
Kpp	0,04	-

4.10 Regulátor rychlosti

Tento regulátor je postaven podle dokumentace v Programu Connect který je volně dostupným softwarem k měniči M701. Proporcionální a integrační člen je počítán paralelně, derivační člen se počítá ze zpětné vazby sériově viz. Obr. 10. Požadavek na moment má při výstupu z rychlostní smyčky bezrozměrnou jednotku, která je následně násobena hodnotou 0,45 maximálního proudu měniče a poté převedena na moment nebo sílu podle toho, jakou konstantou je výstup dále násoben. Tím získáme jako výstupní jednotku moment nebo sílu, v závislosti na tom, zda je motor lineární nebo rotační. Parametry regulátoru viz. Tab. 8



Obr. 10: Schéma funkce rychlostního regulátoru dle dokumentace k programu Connect

Tab. 8: Parametry regulátoru pro rychlostní smyčku

Parametry regulátoru rychlosti		
parametr	hodnoty	jednotky
Kpv	0,04	s/rad
Kiv	1	s ² /rad
Kdv	0,000001	1/rad

4.11 Převod síly na proud

Je řešen vynásobením silovou konstantou s jednotkou newton na ampér. Po získání hodnoty proudu je tato hodnota omezena maximálním rozsahem proudu. V tomto případě jsou to 4A dle parametru 05.007 z nastavení měniče [7], který nese informaci o maximálním proudu.

4.12 Proudový regulátor

Pro regulaci proudu a generování požadavků na napětí je využit blok s názvem *PMSM Current Controller with Pre-Control* z knihovny Simscape Electrical. Je to blok obsahující dopřednou vazbu na kompenzaci elektromotorického napětí, které vzniká pohybem cívek rotoru v magnetickém poli statoru. Jako vstupy využívá blok požadovaný proud od logiky a aktuální proud naměřený na měniči, z jejichž rozdílu určí odchylku, kterou následně použije pro PI regulátory, kde je odchylka proudu převedena na napětí. Po určení požadavku napětí v PI regulátorech je k požadavku přičtena korekce pro elektromotorické napětí. Vstup pro výpočet elektromotorického napětí je úhlová rychlost elektromagnetického pole. Poslední částí po určení požadavku napětí je blok se saturací, do kterého vede od DC linku poslední vstup, který nese informaci o maximálním dostupném napětí pro jednotlivé fáze. Proud pro osu d se reguluje k nule. Parametry jsou sepsány v Tab. 9

Tab. 9: Parametry pro regulátor proudu

Parametry regulátoru proudu		
parametr	hodnoty	jednotky
proporcionální složka proudového regulátoru	209	A
integrační složka proudového regulátoru	688	A
indukce statoru v ose d	34	mH
indukce statoru v ose q	34	mH
magnetický spřažený tok od permanentních magnetů	0,2865	Wb
čas výpočtu proudové smyčky	83	μs

4.13 PWM generátor

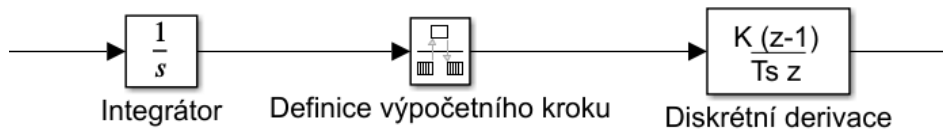
Pro model PWM generátoru byl použit blok s názvem *PWM Generator (Three-phase, Two-level)*. Je to opět blok z knihovny Simscape Electrical. Tento blok poskytuje více možností jak řídit elektromotor, a protože v dokumentaci k driveru motoru nebyl způsob řízení nalezen, bylo použito vektorové řízení, které se velmi často u obráběcích strojů používá. Parametry viz. Tab. 10

Tab. 10: Parametry pro nastavení PWM generátoru

Parametry generátoru PWM		
parametr	hodnoty	jednotky
spínací frekvence	6000	Hz

4.14 Diskretizace datových signálů

Pro diskretizaci byly použity tři bloky, a to integrátor, který nasčítává hodnotu, již chceme diskretizovat, následuje blok *rate transition* na obrázku popsany jako definice výpočetního kroku. Je to blok, kterým specifikujeme krok výpočtu na dané smyčce. Posledním blokem je diskrétní derivace, ta je závislá na kroku dané smyčky.



Obr. 11: Bloky použité pro diskretizaci signálu

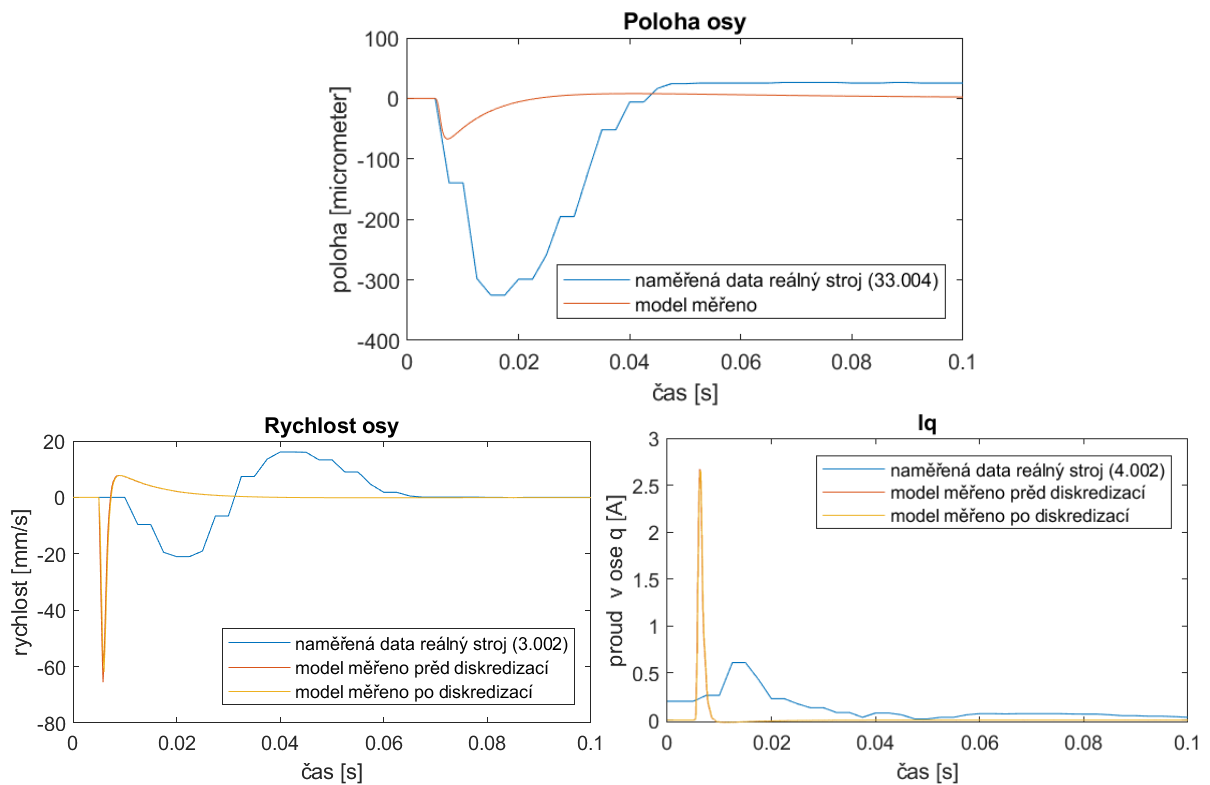
4.15 Kompenzace cogging momentu a momentu setrvačnosti

V nastavení měniče je parametr 04.022, což je parametr, který určuje povolení kompenzace setrvačnosti. [7] Tento parametr je nastaven do stavu deaktivováno, proto není kompenzace momentu setrvačnosti implementována.

Kompenzace cogging momentu také není implementována, jelikož parametry zmíněné v dokumentaci, což je číslo 05.074 a 05.081, které by měli nést parametry pro výpočet této kompenzace, nebyly v nastavení měniče nalezeny. [7]

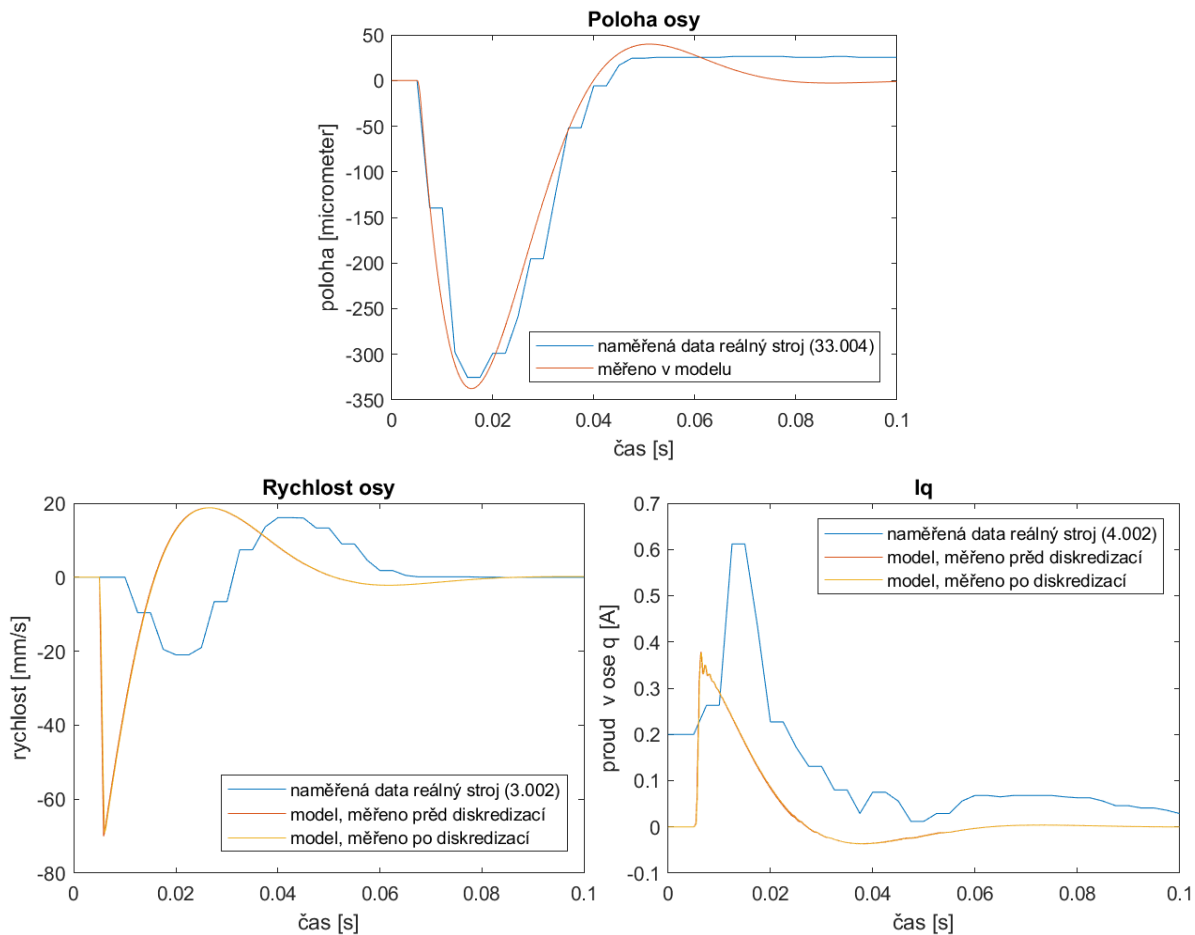
5 OVĚŘENÍ MODELU

Pro ověření modelu bylo využito testu pomocí impulzního kladívka. Jedná se o test, kdy se do rotoru motoru udeří impulzním kladívkem, to vytvoří impuls síly. Tento impuls pomocí impulzního kladívka změříme a můžeme tak porovnávat dynamické chování systému. Do simulace pak použijeme průběh z naměřeného působení, a tak otestujeme dynamické chování simulace. Nakonec výsledky obou systémů mezi sebou můžeme porovnat.



Obr. 12: Na tomto obrázku jsou grafy s porovnáním hodnot pro reálný a simulovaný stroj

Impulz byl naměřen a odečten se silou impulsu o hodnotě 310N a dobou trvání 0,8ms. Po naměření na reálném stroji byly následně upraveny konstanty regulující rychlostní smyčku, v Tab. 8 můžeme nalézt původní hodnoty použité pro první porovnání. Jak můžeme vidět výsledky na Obr. 12, s převzatými konstantami z měniče se model choval výrazně odlišně a reguloval mnohem lépe než reálný stroj. Je tedy možné, že měření ze simulace má v modelu příliš rychlou odezvu. Dále to může znamenat, že ve výpočtu rychlostní smyčky, nebo následného převodu na proud je v řízení měniče použita i další logika, která nebyla zmíněna v dokumentaci měniče [7] ani v dokumentaci, kterou obsahuje program Connect.



Obr. 13: Na tomto obrázku jsou grafy s porovnáním hodnot pro reálný a simulovaný stroj s upravenými hodnotami v rychlostní smyčce

Tab. 11: Parametry pro regulátor rychlosti po úpravě

Parametry regulátoru rychlosti		
parametr	hodnoty	jednotky
K _{pv}	0,0052	s/rad
K _{iv}	0	s ² /rad
K _{dv}	0,000001	1/rad

Po novém naladění regulátoru na hodnoty, které vyvolají v chování polohy podobnou odezvu, jako je v měření, můžeme přistoupit k dalšímu zhodnocení výsledků. Parametry regulátoru po úpravě, jsou uvedeny v Tab. 11. Nové grafy s porovnáním jsou na Obr. 13. V těchto grafech můžeme rozklíčovat informaci, že naměřená poloha na reálném stroji neodpovídá naměřené rychlosti. To nás vede k tomu, že provedené měření, které bylo uděláno pomocí záznamu parametrů z řízení měniče, nedává ve všech parametrech uspokojivé výsledky. Ale poloha byla ověřena pomocí interferometru a je zřejmé, že s přesností $\pm 10 \mu\text{m}$ odpovídá. Tato odchylka, je zároveň shodná s přesností, kterou by mělo dosahovat lineární pravítko. Díky tomu můžeme říci, že simulovaný model neodpovídá řízení měniče.

6 ZHODNOCENÍ A DISKUZE

Byla provedena rešerše, kde jsme se seznámili s typy simulací v závislosti na jejich druhu a využití. Dále zde bylo popsáno kaskádní řízení, které se používá pro řízení servomotorů u kterých je podstatným řízeným parametrem poloha. Bylo zmíněno také obecné hodnocení kvality regulace a chování, které by mohlo vyžadovat kompenzace. Rozhodnutí zda kompenzovat tyto jevy, nebo nikoli je závislé na řešeném problému

V systémové analýze byla vydefinována řešená soustava jako osa CNC stroje a byly určeny vazby mezi jednotlivými komponentami podstatnými pro danou problematiku. Byl také definován problém ohledně řešení simulace, a byl zvolen způsob přístupu k simulaci pomocí předpřipravených bloků v programu Matlab Simulink. V poslední řadě byl identifikován hardware, se kterým bude model srovnáván.

Po systémové analýze byl vytvořen model s co největším počtem předpřipravených bloků z knihoven Simulink Simscape. Regulační smyčky byly připraveny podle dostupné dokumentace pro měnič M701. Následně bylo, s pomocí možnosti logování kterou má měnič M701, provedeno měření při kterém bylo klepnuto impulzním kladívkem do rotoru motoru.

Naměřené hodnoty na reálném hardwaru byly následně porovnány se zaznamenanými daty ze simulačního modelu. Kde bylo zjištěno že se model nechová dle očekávání a že se neshoduje s chováním reálného hardwaru. Také bylo zjištěno, že logování za pomoci samotného měniče nevypadá důvěryhodně, protože se neshoduje zaznamenaný průběh polohy se zaznamenaným průběhem rychlosti. Měření polohy bylo ověřeno pomocí interferometru, a bylo tedy bráno za dostatečně důvěryhodné. Dále se přistoupilo k úpravě regulačních konstant rychlostní smyčky. Konstanty se podařilo naladit tak, že se výsledné chování podle regulace polohy blíží chování reálného hardwaru. Odlišnosti v chování regulátoru po nasazení nových konstant mohou být způsobeny neimplementovaným klidovým proudem. Chybějící implementace klidového proudu pro předpětí motoru bude mít vliv na chování hlavně v rychlostech blízkých nule. Pro odhalení dalších odlišností by bylo třeba provést další měření a prověřit, jestli je opravdu hlavní problém v rychlostní smyčce. To znamená udělat test ověřující proudovou smyčku. Pokud by se prokázalo, že problém byl způsoben v rychlostní smyčce. Bylo by třeba provést hlubší analýzu a navržení testů tak, aby se dalo chování měniče omezit tím způsobem, že dokážeme určit chování za rychlostní regulací.

Pokud by se model podařilo korektně opravit tak, aby odpovídal měniči, nebo aby se po dalších testech ukázalo, že po korekci regulačních parametrů bude tento model dostačující, mohl by se dát využít k předpokladu chování pod proměnlivým zatížením. Takovéto zatížení se vyskytuje na CNC stroji například při obrábění, z čehož by mohli plynout důsledky do simulací obrábění, a mohlo by se tak dát kompenzovat předpokládanou chybu polohy. To by mohlo mít dopad na zvýšení přesnosti obrábění. Bohužel v praxi bude hlavní problém pro implementování těchto řešení málo detailní dokumentace, kterou s ohledem na duševní vlastnictví nebudou ochotni výrobci poskytovat. Z toho plynou odlišnosti v takovýchto modelech od skutečného chování, to omezuje použitelnost těchto modelů. Je nepravděpodobné, že firma zabývající se obráběním, by si po zakoupení stroje připravovali takovéto modely. Tyto modely by se mohli dát použít pro výrobce řídicích systémů, kde by se mohly tyto modely následně využít pro testování vyšších úrovní řízení.

7 ZÁVĚR

Hlavním cílem této práce bylo vytvoření modelu servopohonu. Dílčími cíli bylo vytvoření rešerše v oblasti modelování a řízení pohonu, systémový rozbor, ověření vytvořeného modelu a zhodnocení uplatnění v praxi. Hlavní i dílčí cíle byly splněny. V rešerši jsou zmapovány základní typy simulací, základní popis kaskádního řízení. Dále byl vytvořen simulační model, ten byl následně porovnán s reálným strojem.

Možné použití v praxi, bylo identifikováno v oblasti řídicích systémů CNC strojů, jako je např. řídicím systémem Sinumerik od Siemens. V této oblasti se takovýchto modelů dá využít pro testování logiky těchto vyšších úrovní bez testování na reálných zařízeních. To umožňuje rychlejší vývoj a pokud bude i řídicí část ve stavu vývoje kdy bude mít svůj virtuální model, dá se díky tomu testování ještě více urychlit. Simulace díky tomu totiž není omezena na běh simulace v reálném čase.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] M.SURESH KUMAR, . Permanent Magnet Linear Synchronous Motor Drive Using Nonlinear Control. online. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. 2012, roč. 5, č. 1. ISSN 2278-0181. [cit. 2024-05-20].
- [2] CHA, S.; WU, Q.; NIELSEN, A.; ØSTERGAARD, J. a PARK, I. Real-Time Hardware-In-The-Loop (HIL) Testing for Power Electronics Controllers. In: *2012 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*. 2012, s. 1-6. ISSN 2157-4847. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/APPEEC.2012.6307219>.
- [3] MCDONAGH, James; PALUMBO, Nunzio; CHERUKUNNATH, Neeraj; DIMOV, Nikolay a YOUSIF, Nada. Modelling a permanent magnet synchronous motor in FEniCSx for parallel high-performance simulations. *Finite Elements in Analysis and Design*. 2022, roč. 204, s. 103755. ISSN 0168-874X. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.finel.2022.103755>.
- [4] HYO-SUNG, Ahn; YANGQUAN, Chen a HUIFANG, Dou. State-Periodic Adaptive Compensation of Cogging and Coulomb Friction in Permanent-Magnet Linear Motors. online. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2005, roč. 41, č. 1, s. 90-98. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2004.840182>. [cit. 2024-05-22].
- [5] WANG, Lijun; JIAO, Ruihua; LI, Qing; YIN, Yixin a ZHENG, Qing. Active disturbance rejection control in Stribeck friction dynamic compensation for high-accuracy servo systems. online. *2016 35th Chinese Control Conference (CCC)*. 2016, s. 4771-4775. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ChiCC.2016.7554093>. [cit. 2024-05-21].
- [6] HUANG, Wei-Wei; LI, Linlin; ZHU, Zhiwei; HU, Chuxiong a ZHU, Li-Min. Notch-filter-based repetitive control of fast tool servos for high-performance tracking of periodic trajectories. *Precision Engineering*. 2024, roč. 88, s. 125-134. ISSN 0141-6359. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2024.02.002>.
- [7] *Uživatelská příručka: Unidrive M700, M701, M702*. 2. doplněné vydání. NIDEC, 2016.
- [8] *Matematický model synchronního stroje*. online. In: Česká zemědělská univerzita v Praze. Dostupné z: http://home.zcu.cz/~nohac/PJS/Prednasky/Synchronni_stroj.pdf. [cit. 2023-05-18].
- [9] DRURY, Bill. *The Control Techniques Drives and Controls Handbook*. Second edition. London, United Kingdom: The Institution of Engineering and Technology, 2009. ISBN ISBN978-1-84919-013-8.

- [10] *Dokumentace bloku PMLSM*. online. In: Mathworks. 2024. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/sps/ref/pmlsm.html>. [cit. 2024-05-23].
- [11] RAHM, Magnus. *Ocean Wave Energy: Underwater substation system for wave energy converteres*. Disertační práce. Uppsala: Uppsala universitet, 2010.

9 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

9.1 Seznam symbolů

a	m/s^2	zrychlení
a_{max}	m/s^2	maximální požadované zrychlení
d	m	průměr
dI_K		diferenciál fázového proudu
dt		diferenciál času
F	N	síla
I	A	proud
I_k	A	fázový proud
J	$kg \cdot m^2$	moment setrvačnosti
J_p	$kg \cdot m^2$	moment setrvačnosti vztažený k posuvným hmotám
J_r	$kg \cdot m^2$	moment setrvačnosti vztažený k rotačním hmotám
K_e	Vs/rad^{-1}	konstanta elektromotorického napětí
K_{dv}	$1/rad$	derivační konstanta regulátoru rychlosti
K_{iv}	s^2/rad	integrační konstanta regulátoru rychlosti
K_{ii}	1	integrační konstanta regulátoru proudu
K_{pi}	1	proporcionální konstanta regulátoru proudu
K_{pp}	$1/s$	proporcionální konstanta regulátoru polohy
K_{pv}	s/rad	proporcionální konstanta regulátoru rychlosti
K_t	Nm/A	momentová konstanta motoru
L	H	indukčnost
L_k	H	indukčnost fáze
L_s	H	indukčnost statoru
M	Nm	moment
m	kg	hmotnost
M_p	Nm	moment od posuvných hmot
M_r	Nm	moment od posuvných hmot
posuv na ot	m/ot	posuv na jednu otáčku
r	m/s^3	jerk(trhnutí)
R_k	Ω	odpor fáze
r_{max}	m/s^3	maximální jerk(trhnutí)
R_s	Ω	odpor statoru

s_{\min}	m	minimální dráha potřebná k tomu, aby v její polovině bylo dosaženo maximální rychlosti
T_r	s	čas, za který je dosaženo maximálního zrychlení
U_{celkem}	V	celkové napětí na motoru
U_{EMF}	V	elektromotorické napětí
U_k	V	napětí na fázi
U_{k1}	V	napětí spřažené s odporem
U_{k2}	V	napětí spřažené s indukcí
$U_{k\text{EMF}}$	V	elektromotorické napětí na fázi
U_L	V	napětí spřažené s indukcí
U_R	V	napětí spřažené s odporem
v	m/s	rychlost
v_{\max}	m/s	maximální rychlost, dosahovaná na s_{\min}
Z	1	počet vodičů
α	rad/s ²	úhlové zrychlení
θ		
π	1	Ludolfovo číslo
φ	rad	úhel natočení
φ_t	rad	třecí úhel v závitě
ψ	rad	úhel stoupání závitu
ω	rad/s	úhlová rychlost

9.2 Seznam obrázků

Obr. 1: Schéma řídicí struktury s kaskádním řízením pro elektromotor	18
Obr. 2: Schéma pohonu s lineárním motorem	21
Obr. 3: Schéma vazeb mezi komponentami v systému řízení s lineárním motorem	22
Obr. 4: Schéma Lineárního motoru.....	25
Obr. 5: Schéma zapojení IGBT v měniči [11]	28
Obr. 6: Část modelu použitá pro modelování mechanické části systému.....	28
Obr. 7: Chování tření které je implementováno v bloku Translational friction.....	29
Obr. 8: část modelu použitá pro měření polohy a síly na rotoru.....	30
Obr. 9: Schéma řízení motoru s proměnnými které vytváří vazby mezi logickými bloky	31
Obr. 10: Schéma funkce rychlostního regulátoru dle dokumentace k programu Connect	32
Obr. 11: Bloky použité pro diskretizaci signálu.....	34
Obr. 12: Na tomto obrázku jsou grafy s porovnáním hodnot pro reálný a simulovaný stroj	35
Obr. 13: Na tomto obrázku jsou grafy s porovnáním hodnot pro reálný a simulovaný stroj s upravenými hodnotami v rychlostní smyčce.....	36

9.3 Seznam tabulek

Tab. 1: Specifikace použitých komponent na reálném stroji	23
Tab. 2: Specifikace podstatných parametrů použitých v měniči.....	23
Tab. 3: specifikace podstatných parametrů lineárního motoru	24
Tab. 4: Tabulka parametrů pro PMLSM.....	27
Tab. 5: Parametry podstatné pro tření	29
Tab. 6: Parametry pro simulaci pohyblivých hmot osy CNC stroje	30
Tab. 7: Parametry pro regulátor polohy	31
Tab. 8: Parametry regulátoru pro rychlostní smyčku.....	32
Tab. 9: Parametry pro regulátor proudu	33
Tab. 10: Parametry pro nastavení PWM generátoru.....	33
Tab. 11: Parametry pro regulátor rychlosti po úpravě	36