

Modelování a řízení laboratorní soustavy spřažených servomotorů

Bc. Michal Jarmar

Diplomová práce
2016



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Michal Jarmar**
Osobní číslo: **A14394**
Studijní program: **N3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Automatické řízení a informatika**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Modelování a řízení laboratorní soustavy spřažených servomotorů**

Téma anglicky: **The Modelling and Control of a Coupled-drive Apparatus**

Zásady pro vypracování:

1. Stručně popište principy používané při modelování dynamických soustav na základě jejich matematicko-fyzikální analýzy.
2. Popište laboratorní soustavu "CE108 Coupled Drives apparatus" a uveďte její základní charakteristiky.
3. Na základě literární rešerše a matematicko-fyzikální analýzy vytvořte nelineární model soustavy "CE108 Coupled Drives apparatus".
4. Na základě experimentů na reálné laboratorní soustavě upřesněte vytvořený model a identifikujte jeho parametry.
5. Stručně popište prostředí MATLAB / Simulink a realizujte v něm nelineární model. Srovnajte chování modelu s reálnou soustavou.
6. Použijte vytvořený model pro návrh a verifikaci regulačních algoritmů.
7. Srovnajte chování navržených regulátorů při regulaci modelu a reálné soustavy.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. NOSKIEVIČ, Petr. Modelování a identifikace systémů. Ostrava: Montanex, 1999, 276 s. ISBN 80-7225-030-2.
2. MIKLEŠ, Ján a Miroslav FIKAR. Process modelling, identification, and control. Berlin: Springer, 2007, xxiv, 480 s. ISBN 978-3-540-71969-4. Dostupné také z: <http://www.loc.gov/catdir/enhancements/fy0825/2007928498-t.html>
3. CE108 Coupled Drives Aparatus. User's Manual. Tequipment Limited, Nottingham, England, 1997.
4. LOVERA, Marco. Control-oriented modelling and identification: theory and practice. London, United Kingdom: Institution of Engineering and Technology, 2015, 1 online zdroj. ISBN 9781849196154. Dostupné také z: http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpCOMITP02/controloriented_modelling_and_identificati
5. BARNES, Belinda a Glenn R FULFORD. Mathematical modelling with case studies: a differential equation approach using Maple. London: Taylor & Francis, 2002, xiv, 428. ISBN 0415298040.
6. BOBÁL, Vladimír. Identifikace systémů. Vyd. 1. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2009, 128 s. ISBN 978-80-7318-888-7. Dostupné také z: http://toc.nkp.cz/NKC/200912/contents/nkc20092011491_1.pdf
7. SUŠINA, Ondřej. Spřažené servomotory – statické a dynamické charakteristiky. Zlín, 2006. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Ing. František Gazdoš, Ph.D.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Chalupa, Ph.D.**

Ústav řízení procesů

Datum zadání diplomové práce: **19. února 2016**

Termín odevzdání diplomové práce: **25. května 2016**

Ve Zlíně dne 19. února 2016



doc. Mgr. Milan Adámek, Ph.D.
děkan



prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
ředitel ústavu

Jméno, příjmení: Michal Jarmar

**Název bakalářské/diplomové práce: Modelování a řízení laboratorní soustavy
spřažených servomotorů**

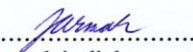
Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s tím, že licenční smlouva uzavřená mezi mnou a Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně s tím, že vyrovnání případného přiměřeného příspěvku na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše) bude rovněž předmětem této licenční smlouvy;
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na diplomové/bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně, dne 18.5.2016


.....
podpis diplomanta

ABSTRAKT

Cílem diplomové práce je vytvoření modelu laboratorní soustavy „CE108 – spřažené servomotory“ v prostředí Matlab/Simulink a návrh regulátoru pro tuto soustavu. Soustava je tvořena pružným nekonečným pásem nataženým přes 3 kladky, z nichž 2 jsou spojeny se servomotory a třetí se volně otáčí na výkyvném rameni. Jedná se o nelineární soustavu o dvou vstupech (řídící napětí servomotorů) a dvou výstupech (otáčky třetí kladky a výchylka kyvného ramene). Významným zdrojem nelinearity, který je do modelu též zahrnut, je prokluz pásu na kladkách. Model je vytvořen na základě matematicko-fyzikální analýzy uvedené soustavy a upřesněn měřeními na reálném systému. Pro model jsou navrženy vhodné řídicí algoritmy, které jsou poté použity na reálné soustavě.

Klíčová slova:

CE108, spřažené servomotory, Matlab, modelování, nelineární model, MIMO, řízení systémů.

ABSTRACT

The goal of the Thesis is to create a model laboratory system "CE108 - coupled drives" in Matlab / Simulink and to design a controller for this system. The system consists of a flexible endless belt taut over three rollers, two of them are associated with servomotors and the third one rotates freely on the swing arm. This system is a non-linear system of two inputs (control voltage of the servomotors) and two outputs (speed of the third deflection pulleys and swing of the arm). An important source of non-linearity, which is also included in the model, is slipping of the belt on the pulleys. The model is created on the basis of first principle modelling of the system and specified by measurements on a real system. Suitable control algorithms are designed for the model and are verified on the real-time system.

Keywords:

CE108, coupled drives, Matlab, modelling, non-linear model, MIMO, control systems.

Rád bych poděkoval mému vedoucímu práce panu Ing. Petru Chalupovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a připomínky a ochotu při řešení dané problematiky.

Dále bych chtěl poděkovat své přítelkyni Denise Mičkové a mé rodině za podporu při studiu a psaní této práce.

Citát: „Jakmile přijmeme fakt, že život je těžký, začneme růst. Pochopíme, že každý problém je také příležitost.“

Hal Urban

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 MODELOVÁNÍ DYNAMICKÝCH PROCESŮ	12
1.1 MODELOVÁNÍ A PROBLEMATIKA ŘÍZENÍ PROCESŮ	12
1.2 ZÁKLADNÍ POJMY MODELOVÁNÍ.....	13
1.2.1 Model	13
1.2.2 Matematický model.....	14
1.2.3 Modelování	14
1.2.4 Proměnné a konstanty	14
1.2.5 Identifikace.....	15
1.2.6 Simulace.....	15
1.3 VŠEOBECNÉ PRINCIPY MATEMATICKÉHO MODELOVÁNÍ PROCESŮ	16
1.4 ANALYTICKÉ METODY IDENTIFIKACE.....	17
1.4.1 Charakteristika jednotlivých fází matematicko-fyzikální analýzy.....	17
1.4.2 Pravidla pro sestavování analytických modelů jednoduchých objektů.....	19
1.5 EXPERIMENTÁLNÍ METODY IDENTIFIKACE.....	19
1.5.1 Měřené veličiny při experimentální identifikaci	21
1.5.2 Měření, zpracování a vyhodnocení dat	21
1.5.3 Vyhodnocení kvality modelu	22
1.6 ROZDĚLENÍ DYNAMICKÝCH SYSTÉMŮ	23
2 LABORATORNÍ SOUSTAVA SPŘAŽENÝCH POHONŮ	26
2.1 POPIS REÁLNÉ SOUSTAVY SPŘAŽENÝCH POHONŮ	26
2.2 HLAVNÍ ČÁSTI MODELU	28
2.3 POHLED NA MODEL Z HLEDISKA TEORIE SYSTÉMŮ	31
2.4 PROPOJENÍ MODELU CE108 S POČÍTAČEM.....	31
3 POPIS VÝVOJOVÉHO PROSTŘEDÍ MATLAB/SIMULINK	34
3.1 MATLAB.....	34
3.2 SIMULINK.....	35
3.3 REAL-TIME TOOLBOX.....	36
4 MODELOVÁNÍ LABORATORNÍ SOUSTAVY CE108	37
4.1 ZJEDNODUŠUJÍCÍ PŘEDPOKLADY	37
4.2 ODVOZENÍ ZÁKLADNÍCH VZTAHŮ A ROVNIC PRO POHYBLIVÉ RAMENO	38
4.3 ODVOZENÍ MATEMATICKÉHO MODELU	39
4.4 SHRNUÍ ANALÝZY.....	42
4.4.1 Celkový model s uvažováním akčních členů a snímačů.....	43
II PRAKTICKÁ ČÁST	45
5 STATICKE CHARAKTERISTIKY REÁLNÉHO MODELU	46
5.1 POROVNÁNÍ MĚŘENÍ.....	50
6 DYNAMICKÉ CHARAKTERISTIKY REÁLNÉHO MODELU	54
7 VYTVOŘENÍ SIMULAČNÍHO MODELU	58

7.1	ÚPRAVA SCHÉMATU MATEMATICKÉHO MODELU	58
7.2	ROZNÁSOBENÍ JEDNOTLIVÝCH PŘENOSŮ	59
7.3	URČENÍ NEZNÁMÝCH PARAMETRŮ	60
7.4	VYTVOŘENÍ MODELU V SIMULINK	61
7.5	SROVNÁNÍ VYTVOŘENÉHO MATEMATICKÉHO MODELU S REÁLNÝM MODELEM	61
7.5.1	Srovnání matematického modelu s reálným systémem při kladném napětí	61
7.5.2	Srovnání matematického modelu s reálným systémem při záporném napětí	62
7.6	VYTVOŘENÍ CELKOVÉHO MODELU	63
7.6.1	Rozdělení oblasti modelů	63
7.6.2	Vytvoření modelů pomocí experimentální identifikace	66
7.6.3	Celkový model reálné soustavy spřažených servopohonů	68
7.6.4	Porovnání statických vlastností celkového simulačního modelu s reálným modelem	70
7.6.5	Porovnání dynamických vlastností celkového simulačního modelu s reálným modelem	72
8	NÁVRH A VERIFIKACE ŘIDÍCÍCH ALGORITMŮ	74
8.1	ZPĚTNOVAZEBNÍ ŘÍZENÍ S PID REGULÁTOREM	75
8.1.1	Výběr pracovního bodu a identifikace	76
8.1.2	Průběh regulace při zpětnovazebním řízení pomocí PID regulátoru	78
8.2	ŘÍZENÍ POMOCÍ POLYNOMIÁLNÍ METODY PŘÍRAZENÍ PÓLŮ V KONFIGURACI 2DOF	82
8.2.1	Odvození polynomiální metody přiřazení pólů ve 2DOF konfiguraci	83
8.2.1.1	Výpočet regulátoru pro řízení rychlosti	83
8.2.1.2	Výpočet regulátoru pro řízení protažení	85
8.2.2	Průběh regulace při návrhu metodou polynomiální syntézy	86
	ZÁVĚR	91
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	93
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	95
	SEZNAM OBRÁZKŮ	97
	SEZNAM GRAFŮ	99
	SEZNAM TABULEK	101
	SEZNAM PŘÍLOH	102

ÚVOD

Modelováním se každý z nás zajímal už od raného dětství, kdy jsme jako děti zaujetím sledovali srážku dvou autíček, nebo pohyb skákacího míčku po podlaze. Tato práce se zaměřuje na reálný laboratorní model soustavy spřažených servopohonů. Matematické modelování umožňuje popsat řečí matematiky rozličné objekty, jejich vzájemné interakce a dynamiku. Matematické modely se uplatňují např. při simulování proudění vzduchu kolem křídla dopravního letounu. Dále se matematické modelování hojně využívá i v průmyslové výrobě při modelování technologických procesů, nebo při vývoji nových technologií. Nástup výkonných počítačů umožňuje modelovat komplexní systémy, tedy systémy, které se skládají z mnoha podčástí (submodelů) a vztahů, v nichž se vyskytují složité vzájemné interakce.

V rámci této práce je vytvořen simulační model soustavy spřažených servopohonů (označení CE108), který vystihuje statické a dynamické chování v celém pracovním rozsahu laboratorního modelu. Předmětem této práce je nastudování vlastností laboratorní soustavy a na základě matematicko-fyzikální analýzy vytvoření simulačního modelu, na kterém jsou navrženy vhodné řídicí algoritmy, které jsou po odladění ověřovány na reálné soustavě.

V teoretické části jsou popsány základní pojmy a principy při vytváření modelů. Modelování a simulace dynamických systémů je aktuálním, důležitým a zajímavým tématem. Popisovaný laboratorní model je fyzikální systém vyrobený firmou TecEquipment Limited. Jedná se o MIMO systém, který je velmi dobrým příkladem systému s více vstupy a výstupy. Je nutné poznamenat, že se nejedná o systém, který byl vyvinut pouze pro teoretické výukové účely. Velkou výhodou je konkrétní vazba na reálné aplikace v průmyslu. Model může být chápán jako určitá část válcového, papírenského, nebo textilního stroje, kde je zapotřebí udržovat konstantní napínání (pružnost) a rychlost pásu. Laboratorní model se skládá ze tří kladek. Rychlost dvou spodních kladek je rovna otáčkám motorů ovládaných pomocí vstupního napětí. Třetí kladka je umístěna v horní části modelu na výkyvném rameni zavěšeném na pružině, je poháněna pružným pásem, který spojuje všechny tři kladky.

Praktická část se zabývá zkoumáním statických a dynamických vlastností reálného modelu. Ovládání a následný sběr dat je zajištěn pomocí řídicí karty a programového vybavení Matlab/Simulink. Na základě literární rešerše je vytvořena první verze modelu,

která je odvozena pomocí manuálu [9]. Výsledný simulační model je upřesněn měřeními na reálné soustavě. Aby mohl být matematický model získaný matematicko-fyzikální analýzou použit v programovém prostředí Matlab/Simulink, muselo dojít k mnoha úpravám. Aby bylo vystiženo chování reálného modelu v celém pracovním rozsahu, bylo nutné vytvoření dalších modelů. Poslední kapitola se zabývá návrhem a následným řízením simulačního a reálného modelu. V rámci této práce jsou navrženy dva typy regulátorů, kde pomocí simulace a měření na reálné soustavě je srovnáno chování a věrohodnost vytvořeného simulačního modelu. Regulátory jsou získány pomocí simulačního modelu. Je dokázáno, že simulační model plně postačuje k testování a návrhu regulátorů, které mohou být dále použity na reálné soustavě.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 MODELOVÁNÍ DYNAMICKÝCH PROCESŮ

V této kapitole budou představeny základní pojmy a principy matematického modelování spojitého procesu, vychází převážně z [1, 2, 3], V rámci kapitoly bude ukázáno, jakou roli hraje matematické modelování komplexních procesů a při návrzích moderních technologií.

Matematické modelování představuje účinnou metodu umožňující poznávat vlastnosti zkoumaného objektu. Pomocí počítačové simulace je možné s matematickým modelem experimentovat obdobně jako s reálným objektem. Avšak nedochází k riziku vzniku havarijních stavů, které u reálného systému mohou být jak nebezpečné tak nákladné [1].

Nutnými předpoklady úspěšného návrhu modelu (probíhajícího procesu) je znalost jeho statických a dynamických vlastností. Znalost těchto vlastností může být důležitá i z jiných důvodů, například při projektování výroby, nebo při výzkumu různých technologických procesů. Jedna z možností, jak získat představu o vlastnostech daného procesu, je měření statických a dynamických charakteristik na příslušném objektu. Takovéto měření nemusí být vždy uskutečnitelné. Důvody mohou být různé, například není k dispozici vhodná měřicí technika, měření může vést ke znehodnocení, nebo snížení produkce, experiment by mohl být nebezpečný, a mohl by vést k riziku spojeným s havárií. [2, 3]

1.1 Modelování a problematika řízení procesů

Spojité technologie jsou složeny z jednotlivých procesů. Ty jsou racionálně uspořádané a propojené tak, aby se co nejefektivněji získal požadovaný produkt.

Řídicí systém je součástí technologie a v rámci celé technologie je garancí splnění níže uvedených požadavků. Pokud se bere systém pro řízení jako celek, tvoří jej technické zařízení a lidský faktor. Od systému řízení se vyžaduje:

- potlačení vlivu poruch
- zajištění stability řízení procesů
- optimální řízení procesu

Řízení je cílevědomé působení na řízený objekt (proces, systém), které zabezpečí dosažení požadovaného cíle. Pro zajištění bezpečnosti technologie při zohlednění

specifikace produktu a technických, popřípadě jiných omezení, je třeba problémy rozdělit na jednotlivé úlohy až na stupeň řízení jednotlivých procesů.

Na nejnižším stupni řízení se může realizovat časově spojitě řízení některé měřené veličiny, například je třeba udržet konstantní teplotu při výrobním procesu. Na druhém stupni řízení je možné optimalizovat proces ve smyslu statiky. To znamená, že v určitém časovém intervalu se hledají optimální hodnoty některých dalších veličin (průtok, teplota, hustota atd.). Ty se přenastaví a do dalšího časového okamžiku zůstávají konstantní. Optimalizace může také probíhat kontinuálně a dle předem zvolených kritérií. Pokud jsou jednotlivé procesy navzájem propojené, na třetím stupni řízení se jejich činnost koordinuje.

Zpětnovazební řízení je základním způsobem řízení jednotlivých procesů na nejnižší úrovni. Využívá se informace o výsledku realizovaných vstupních akčních zásahů na výpočet akční veličiny, to je informace z výstupu procesu, která jde zpět na vstup procesu.

V teorii a praxi existují další způsoby řízení, například ovládáním. Ovládání je řízení, při kterém se účinek řízení neporovnává s očekávaným výsledkem. Pokud při řízení není zahrnuta zpětná vazba, mluví se o otevřeném řídicím obvodu. V případě existenci zpětné vazby se mluví o uzavřeném řídicím obvodu [1].

1.2 Základní pojmy modelování

1.2.1 Model

Pokud máme k dispozici k danému reálnému objektu jeho kopii, je možné tuto kopii nazvat modelem daného reálného objektu. To znamená, že tento systém (kopie) bude mít podobné vlastnosti jako originál. Model reálného objektu může být abstraktní, nebo opět fyzikální (reálný). Mezi modelem a zkoumaným reálným objektem musí existovat určitá analogie.

Fyzikální model může být vytvořen jako zmenšená kopie laboratorního modelu (původního objektu), který se funguje na stejném fyzikálním principu. V tomto případě se využívá teorie podobnosti. Příkladem může být velký zvedací píst, který byl nahrazen modelem ve zmenšeném formátu, na kterém je možné zkoumat všechny vlastnosti skutečného zvedacího pístu. Při práci se zmenšeným modelem se eliminuje vznik škod při nečekané havárii.

Fyzikální model může být také založen na jiném fyzikálním principu než původní objekt, musí se ale řídit podobnými zákony. Například vodního potrubí lze modelovat pomocí elektrického obvodu. Zdroj elektrického proudu je uspořádaný pohyb nosičů elektrického náboje (elektronů). Čerpadlo je mechanický stroj, který dodává kinetickou a potenciální energii kapalině, která přes něj protéká. Díky těmto podobnostem je možné nahradit síť vodovodního potrubí elektrickou sítí, která slouží jako model. Pomocí elektrického obvodu je pak možné navrhnout čerpadlo a průměr potrubí k dosažení požadovaného průtoku [1, 2].

1.2.2 Matematický model

Ze třídy abstraktních modelů má rozhodující význam matematický model reálného objektu. Matematický model popisuje objekt či systém pomocí jazyka matematiky, tedy pomocí proměnných, které odpovídají reálným fyzikálním vlastnostem modelovaného systému. Je svázán relačními operátory a funkčními vztahy, které odpovídají fyzikálním vazbám mezi veličinami reálného systému. Matematický model je ve většině případů reprezentován rovnicí, nebo soustavou rovnic. Většinou jde o diferenciální, diferenční anebo algebraické rovnice [7].

1.2.3 Modelování

Proces tvorby modelů je nazýván modelováním. Jde o popis zkoumaného objektu z kvalitativní ale i kvantitativní stránky. Matematický model musí zachycovat všechny důležité vlastnosti původního objektu. Do modelu se obvykle nezahrnují nepodstatné vlastnosti druhořadého významu, které by učinily model složitějším. Proto se při modelování uvažují určitá omezení a zjednodušení [7].

1.2.4 Proměnné a konstanty

V matematickém modelu se uvažují základní skupiny proměnných: vstupní, stavové, řídicí, výstupní a náhodné.

- Vstupní proměnné ovlivňují daný objekt a jejich hodnoty jsou determinovány mimo modelovaný systém (např. vstupní napětí do čerpadla).
- Stavové proměnné jsou závislé na ostatních proměnných (řídicí, náhodné, vstupní, výstupní).

- Řídící (rozhodovací) proměnné jsou obvykle známy jako nezávislé proměnné. Zpravidla představují nejdůležitější procesy modelovaného systému. V matematickém modelování mohou být nazvány jako aktivity, entity, nebo rozhodovací proměnné.
- Hodnoty výstupních proměnných jsou generovány (určeny) systémem, či jeho modelem.
- Náhodné proměnné obvykle určuje pravděpodobnostní funkce, nebo hustota pravděpodobnosti. V modelu mohou představovat náhodné jevy.

Dále se v modelu uvažují proměnné a konstanty jako:

- Identifikovaná proměnná nebo konstanta představuje konkrétní vlastnost reálného objektu. Je určena názvem a fyzikální jednotkou, v níž se měří.
- Neidentifikovatelné (pomocné) konstanty a proměnné slouží pro formalizaci matematického zápisu a implementaci algoritmů. U těchto konstant se obvykle uvádí bezrozměrná jednotka [7].

1.2.5 Identifikace

Metody ztotožnění modelu s vyšetřovaným objektem se nazývají identifikací. Identifikace a modelování jsou pojmy, které se navzájem prolínají.

1.2.6 Simulace

Pokud je k dispozici matematický model nějakého reálného objektu, je možné nahradit experimentování s tímto objektem (reálným modelem) experimenty s jeho matematickým modelem. Simulace je proces, při kterém se provádí experiment na matematickém modelu reálného objektu. V dnešní době se k simulaci využívají simulační programy na osobních počítačích. Příkladem může být výkonové prostředí Matlab, spolu s jeho rozšířením Simulink, které bude popsáno v rámci této práce.

Inženýrské návrhy systémů (dopravní letadlo, most, vodní elektrárna) jsou stále komplikovanější a komplexnější. Složité systémy jsou proto navrženy jako soubor komponent a jejich vzájemných vazeb. Interakce mezi komponenty může spadat do různých fyzikálních domén například elektrické, mechanické, tepelné, hydraulické atd. Kromě toho se u návrhů komplexních systémů využívá hierarchický model jednotlivých procesů. Každý z nich vykonává konkrétní úkol, nebo zajišťuje určitou funkci. Pro modelování složitých systémů je vhodné použít modulární modelovací přístup, ve kterém

je celkový model složen s několika částí. Nejprve se vytvoří modely základních fyzikálních komponentů, ze kterých se vytvoří jednotlivé subsystémy, které se spojí v jeden celkový model systému. Tento přístup je podporován i ve zmiňovaném prostředí Simulink.

Adekvátnost, respektive shodu matematického modelu s modelovaným objektem je možno zjistit pouze experimentálním způsobem [1, 3, 4].

1.3 Všeobecné principy matematického modelování procesů

Při vytváření matematického modelu je důležité dokonale porozumět modelovanému procesu (problému). Pro účely počítačového řízení je nutné sestavit matematický model tak, aby bylo možné nalézt jednoduchý algoritmus řízení. Matematické modely se rozdělují podle způsobu vzniku do tří skupin.

- Teoretické modely – odvození využívá fyzikální a chemické principy.
- Empirické modely – získávají se z naměřených veličin procesu pomocí metod matematické analýzy.
- Teoreticko-empirické modely – jsou získány kombinací teoretického a empirického přístupu.

Matematické modely technologických procesů vznikají na základě materiálových a energetických bilancí. Na získání dynamických modelů se využívají bilance v neustáleném stavu. Materiálová bilance může popisovat bilanci jednotlivých složek anebo bilanci celkovou. Veličiny vyjadřují kvantitativní chování procesů, jsou přirozené stavové veličiny. Změny stavových veličin jsou určeny bilančními stavovými rovnicemi. Matematické modely, které popisují dynamiky procesů, mají tvar diferenciálních rovnic. Mnohé popisované jevy spadají do typu procesů s rozloženými parametry. Tyto modely jsou ve tvaru parciálních diferenciálních rovnic. V obyčejných parciálních diferenciálních rovnicích jsou první parciální derivace závislé na čase. Při procesech s rozloženými parametry jsou derivace závislé i na prostorových proměnných. Ve většině případů je derivace veličin vztažena pouze k jedné prostorové souřadnici [2].

V úvodu této kapitoly byly zmíněny obecné cesty modelování. Zavádění automatizovaných systémů řízení, které jsou v současné době považovány za jednu z neúčelnějších cest, je nepřímé, tj. matematické modelování. Nyní se tato práce bude zabývat problémy spojenými s konstrukcí modelu.

Z metodického hlediska existují dva základní (krajní) postupy při identifikaci a modelování reálných objektů. Jedná se o analytické a experimentální metody identifikace, které budou popsány v kapitolách 1.4 a 1.5 [1, 5].

1.4 Analytické metody identifikace

Při konstrukci modelu zařízení pomocí analytické metody identifikace se vychází z materiálových a energetických bilancí daného zařízení. Dále se vychází ze znalostí fyzikálních, chemických, popřípadě biologických dílčích procesů, které v zařízení probíhají a z jejich matematického popisu. Tento postup využívá také údaje o materiálech a konstrukci příslušného zařízení. Aplikací všech těchto znalostí se získá analytický (matematický) model daného objektu [1].

Model, založený na analytické metodě identifikace se využívá když:

- není možné provést přímé měření na cílovém objektu,
- cílem je přenos dat na jiný objekt,
- lze poznat a kvantitativně popsat děje uvnitř objektu [5].

1.4.1 Charakteristika jednotlivých fází matematicko-fyzikální analýzy

Odvození modelů na základě matematicko-fyzikální analýzy je složitý proces, který lze obecně těžko formulovat. Kromě hlubokých znalostí oboru, do které svou fyzikální podstatou analyzovaný objekt náleží, se tu ve velké míře uplatňuje i intuice a zkušenost. Každý analytický model se začíná sestavovat formalizovaným popisem. Mezi nejvšeobecnější přístupy zpracování matematického popisu patří blokový princip. Podle tohoto principu sestavení matematického popisu předchází analýza jednotlivých elementárních dějů. Celkový postup jde rozdělit do tří fází

První fáze spočívá ve výběru souboru veličin a vztahů mezi nimi, které dostatečně přesně popisují uvažovaný reálný proces. U velmi složitých objektů se provádí dekompozice objektu na jednodušší části (podsystemy) a určují se hraniční (vazbové) podmínky. Při výběru příliš velkého počtu veličin se může stát, že v konečné fázi bude model příliš složitý a analýza mimořádně obtížná. Proto se při modelování eliminují nepodstatné veličiny, které mají na proces zanedbatelný vliv. První zjednodušující fází, jak už bylo v této práci zmíněno, je zjednodušení podmínek a předpokladů. Rozhodnutí, zda má veličina podstatný vliv na proces, není vždy jednoduché a vyžaduje určité zkušenosti, intuici a praxi.

Další fází modelování je sestavení obecných závislostí (fyzikálních vztahů) mezi vybranými veličinami objektu. Jde o fázi, která vytváří strukturu matematického modelu objektu. Patří k nejobtížnějším fázím postupu. Může jít například o odvození a sestavení nelineárních diferenciálních rovnic, které popisují určitý proces. Při této fázi se předpokládá výborná znalost odborné problematiky, do níž objekt svou fyzikální podstatou spadá. Je nutná rovněž znalost příbuzných a teoretických disciplín. Analytik musí být schopen posoudit, které závislosti jsou podstatné jak z hlediska chování procesu, tak i z hlediska řízení. Při tvorbě se vychází ze známých fyzikálních zákonů, nebo z rozličných odvozených závislostí, které mohou být stanoveny i empiricky (pomocí experimentu). Zákony, které se často používají při analýze lze rozčlenit na:

- a) Zákony typu zachování, kdy všeobecný tvar zákona lze zapsat takto:

$$\sum \text{přítoků} + \sum \text{zdrojů} - \sum \text{odtoků} - \sum \text{zániků} = \text{časová změna akumulace}. \quad (1)$$

Tento vztah je v podstatě bilanční rovnice, kterou je možné aplikovat na tok určité hmoty nebo energie. Pojmy zdroj (vznik) a zánik, použité ve všeobecné rovnici, je třeba chápat ve smyslu transformace jedné formy energie na druhou. Pokud je vyšetřovaný proces ustálený, levá strana rovnice je rovna nule, jde tedy o ustálený stav objektu.

- b) Zákony typu sdílení se používají při procesech, které probíhají samovolně jen v určitém směru. Jde o nevratné procesy, na které nestačí použít bilanční rovnici (1). Všeobecný tvar je popsán následující rovnicí

$$\text{tok} = \text{součinitel přenosu} \cdot \text{gradient určujícího parametru} \quad (2)$$

Součinitel přenosu je převrácená hodnota odporu sdílení. Jako příklad takového zákona lze uvést Newtonův zákon definující dynamickou, případně kinematickou viskozitu tekutin, Ohmův zákon, Fourierův zákon sdílení tepla vedením a podobně.

- c) Stavové rovnice se používají při popisu systému, pokud ve vyšetřovaném objektu existuje více stavových veličin, které jsou navzájem nezávislé. Je třeba sestavit stavové rovnice interpretující vazby mezi stavovými veličinami. Stavové rovnice se odvozují podle příslušných fyzikálních vztahů mezi stavovými veličinami.
- d) Rovnice bilance entropie se používají v tom případě, pokud vyšetřovaný proces obsahuje dva nebo více částečných nevratných dějů, například kdy pomocí superpozice vznikají nové jevy. Pro popis těchto jevů je nevyhnutelné použít právě tento typ rovnic.

Poslední fází analýzy je specifikace modelu procesu. Jedná se o určení neznámých hodnot parametrů a koeficientů. Tyto parametry určují platnost modelu pro daný konkrétní objekt v konkrétních podmínkách. Parametry lze určit z předepsaných parametrů reálného modelu, měřením, pokusy, nebo experimentální identifikací [6].

1.4.2 Pravidla pro sestavování analytických modelů jednoduchých objektů

Při sestavování modelu analytickým způsobem je vhodná metoda blokových schémat, při které se postupuje následujícím způsobem [5,6].

- 1) Sestavení skutečného funkčního schématu modelovaného objektu.
- 2) Označení všech prvků a veličin, které se vyskytují v obvodu. Naznačení směru (smyslu) působení veličin a signálů.
- 3) Sestavení vztahů jednotlivých veličin pomocí matematicko-fyzikální analýzy, díky které vzniknou příslušné diferenciální rovnice s obecnými konstantami. Výstupní veličiny se považují jako závislé, vstupní jako nezávislé proměnné. Pokud se model skládá z jednotlivých subsystémů, může nastat situace, kdy vstupní veličiny mohou být výstupní veličinou z jiného subsystému. V takovém případě je někdy nejvhodnější cestou postupovat od konce modelu směrem k začátku, ke vstupním veličinám celkového modelu.
- 4) Na základě odvozených diferenciálních rovnic a vzájemným vazeb se sestaví blokové schéma. Jednotlivé bloky se popíší a vyznačí se příslušné vstupní a výstupní veličiny.
- 5) Pokud jsou statické vztahy jednotlivých veličin lineární, nebo v okolí pracovních bodů linearizovatelné, je možné nahradit jednotlivé bloky operátorovými přenosy.
- 6) Jsou-li označeny jednotlivé bloky přenosovými funkcemi, lze zjednodušit celé schéma pomocí pravidel blokové algebry až na operátorový přenos. Ten nám v další fázi může být užitečný při návrhu řízení, výpočtu regulátoru.

1.5 Experimentální metody identifikace

Předmětem experimentální identifikace systémů je vyšetření dynamických vlastností systému a stanovení matematického modelu experimentálním postupem. Metody experimentální identifikace vyžadují existenci zkoumaného objektu a možnost experimentování s ním. Tento postup vychází z měření vstupních a výstupních veličin na reálném objektu. Výsledkem je experimentální model daného reálného objektu. Při tomto

postupu se nezkoumá co se děje ve zkoumaném objektu, který se považuje pouze za zdroj vztahů mezi vstupem a výstupem. Při popisu se většinou používá statických metod.

Jednou z výhod experimentální metody identifikace je, že není nutné studovat děje uvnitř objektu, stačí sledovat vstupní a výstupní veličiny. Nevýhodou je neinformovanost o podstatě děje, není možné přenést model na jiné zařízení. Metoda neumožňuje odpovědět např. na otázku, co se stane, pokud na soustavě spřažených pohonů vyměníme jeden motor za silnější. Struktura experimentálního modelu je volena (na základě experimentů) a neodpovídá vnitřní struktuře zkoumaného objektu.

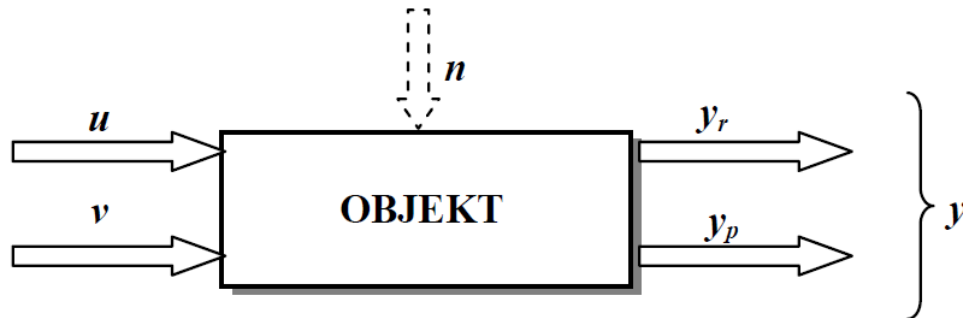
Experimentální metody jsou nákladné kvůli potřebné měřicí technice. Potřebná znalost procesů je nižší, než u metod analytické identifikace.

Empirický postup logicky vyžaduje existenci objektu, na kterém se provádí měření. V oblasti měření, pro kterou proces identifikace proběhl, může být experimentální model přesnější než model získaný analyticky. Výsledky měření v sobě obsahují i ty stránky reality, které při analytickém modelování nevyniknou (poruchy), nebo jsou zanedbatelné. Na druhou stranu, model je platný právě jen pro tuto oblast měření a pro jinou oblast změn (pohybu) vstupních veličin model nemusí být svým chováním totožný. Experimentální model je většinou podstatně jednodušší než model analytický.

Model získaný experimentální identifikací se lépe hodí v případech kdy:

- je k dispozici cílový objekt a lze na něm provozovat experimentální měření,
- cíl výzkumu je pouze vypracování matematického modelu konkrétního objektu, bez nutnosti přenášet data na jiný objekt,
- je velmi problematické rozpoznání a popsání děje probíhajícího uvnitř objektu [1, 3, 5].

1.5.1 Měřené veličiny při experimentální identifikaci



Obr. 1 – Schématické znázornění objektu experimentální identifikace [6]

Veličiny, které se měří při experimentální identifikaci (viz Obr. 1), se dělí na vstupní řídicí veličiny u , pomocí nichž se realizuje řízení a výstupy objektu y . Na výstupu jsou obecně zahrnuty řízené výstupní veličiny y_r , případně pomocné měřené veličiny y_p , jejichž regulace se nevyžaduje, ale jejich znalost přispívá ke zvýšení kvality řízení. Na objekt dále působí měřitelné externí poruchy v . Externí porucha ovlivňuje výstup objektu, na akční veličinu u tento signál nemá žádný vliv. Dále na vyšetřovaný objekt působí náhodná neměřitelná porucha n . Do této poruchy se zahrnují všechny neměřitelné vlivy okolí, změny uvnitř objektu, chyby měření a další negativní vlivy, které ovlivňují chování objektu. Náhodná veličina n způsobuje, že okamžité hodnoty vstupních veličin neurčují jednoznačně hodnotu budoucího výstupu. U dynamických systémů nestačí znalost aktuálních vstupů a to i v případě, že na systém nepůsobí žádná náhodná porucha. Je třeba znát stavy systému, případně historii vstupů a výstupů, počáteční stavy apodobně [6].

1.5.2 Měření, zpracování a vyhodnocení dat

Rozlišují se dva základní způsoby identifikace:

- online identifikace,
- offline identifikace.

Při online identifikaci se předpokládá přímé spojení počítače a identifikovaného procesu a bezprostřední vyhodnocení parametrů modelu. Data jsou zpracovávána průběžně v reálném čase.

Offline identifikace předpokládá nejdříve jednorázové zaznamenání a uchování dat na vhodném nosiči informace. Vyhodnocení parametrů modelu neprobíhá v průběhu identifikačního experimentu.

Při online identifikaci je možné získat parametry modelu bezprostředně po měření. Provádí-li se identifikace opakovaně, průběžně v čase, hovoří se o průběžné identifikaci. Dále je možné rozdělit identifikační algoritmy na rekurzivní a nerekurzivní.

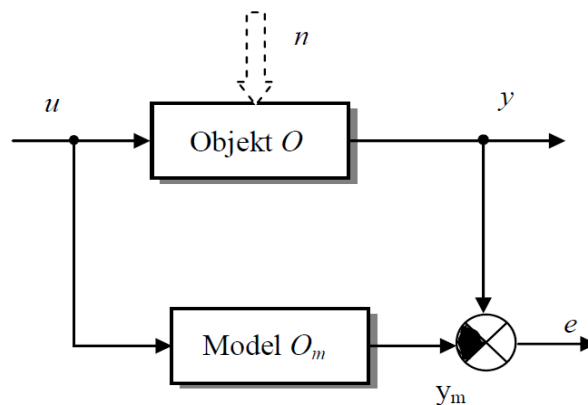
Rekurzivní algoritmy převážně pracují v reálném čase, kdy soubor naměřených dat je průběžně doplněn o naměřené dvojice hodnoty vstupu a výstupu. Vyhodnocení modelu proběhne po každém měření a pomocí nových hodnot se zpřesňuje (mění) používaný model. Tento postup je typický pro průběžnou identifikaci v reálném čase.

Nerekurzivní algoritmy vyhodnotí model až z celého souboru naměřených dat. Tyto algoritmy jsou použity při dávkovém zpracování dat [3].

1.5.3 Vyhodnocení kvality modelu

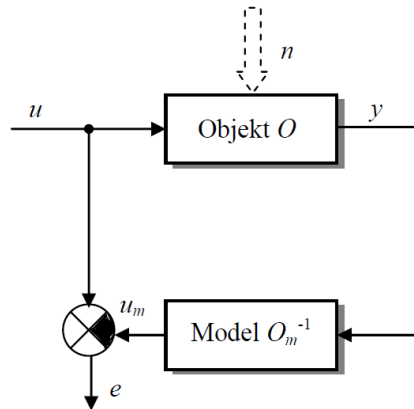
Velká většina identifikačních metod vychází s minimalizace funkcionálu, který vyhodnocuje chybu modelu. Velmi často se uplatňují kvadratická kritéria, která jsou použita jako účelové funkce při hledání nejlepšího řešení. Chybu modelu je možné definovat různým způsobem.

- 1) Chyba výstupu, kdy se určuje odchylka mezi výstupním signálem objektu y a modelem y_m . Schéma je znázorněno na Obr. 2.



Obr. 2 – Chyba výstupu [6]

- 2) Chyba vstupu je rovna odchylce e na straně vstupního signálu u_m a objektu u , jak ukazuje Obr. 3. Model je zapojen sériově s objektem.

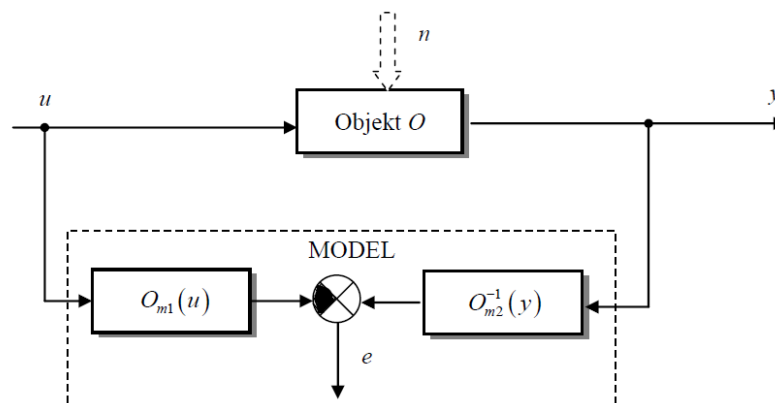


Obr. 3 – Chyba vstupu [6]

- 3) Chyba rovnice (ztotožněná chyba), která je obecně definována jako rozdíl. Uvádí se ve tvaru:

$$e = O_{m2}^{-1}(y) - O_{m1}(u) \quad (3)$$

kde O_{m2}^{-1} označuje invertovatelnou část modelu. Příčinou chyby rovnice je nevhodný vnější popis objektu (nesoulad mezi pravou a levou stranou modelu). Chyba rovnice se používá při modelech ve tvaru diferenciální a diferenční rovnice, přenosových funkcí a podobně. Schéma zapojení viz Obr. 4.



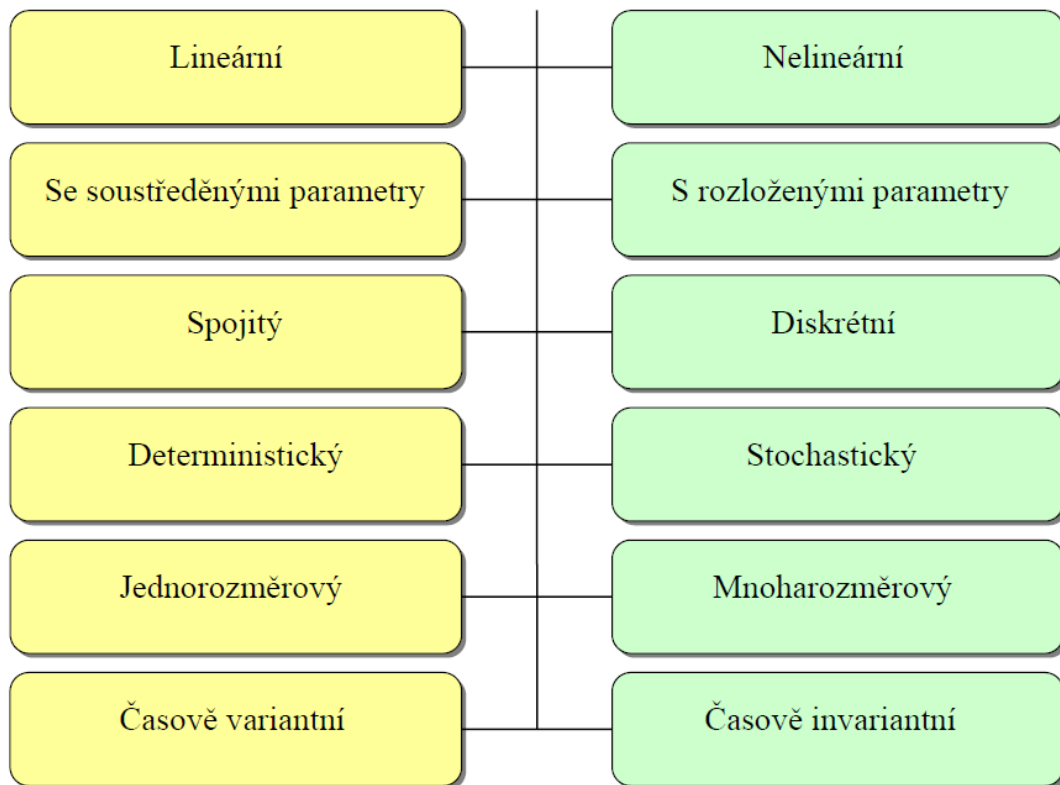
Obr. 4 – Chyba rovnice [6]

U mnoha metod experimentální identifikace s deterministickými signály se vyhodnocení kvality modelu provádí subjektivním hodnocením [3, 6].

1.6 Rozdělení dynamických systémů

Předchozí kapitoly se zabývaly problematikou sestavování modelu daného reálného objektu. V těchto kapitolách byla zmíněna určitá zjednodušení, která se připouští při modelování reálného objektu. Pokud se tedy zkoumaný objekt zařadí do určité třídy

dynamických systémů, děje se tak už s ohledem na tato zjednodušení. Rozdělení dynamických systémů do tříd je zobrazeno na Obr. 5. Teorie systému uvádí další možnosti třídění podle dalších kritérií, proto uvedený počet třídění není úplný. Pro potřeby této práce je zde uvedené třídění postačující.



Obr. 5 – Rozdělení dynamických systémů [1]

Z hlediska matematického charakteru se systémy dělí na lineární, všechny prvky matematického popisu systému jsou lineární operace (sčítání odčítání, násobení konstantou). Jako lineární se označují i systémy popsané lineárními diferenciálními rovnicemi. Vzájemné vazby mezi systémy jsou lineární. U nelineárního systému jsou tyto vazby nelineární, alespoň jedna z operací matematického popisu je nelineární (násobení, dělení, goniometrické funkce).

U systémů se soustředěnými parametry jsou jejich veličiny závislé pouze na čase. Veličiny systému s rozloženými parametry jsou funkcemi času a minimálně jedné prostorové proměnné.

Spojité systémy se mění s časem spojitě (například chladnutí čaje). Jsou definovány na spojitém časovém intervalu. Veličiny diskretních systémů se nemění v čase spojitě, ale mají diskretní skoky (například veličiny v počítači – počet bitů). Jsou tedy diskretními funkcemi v čase.

U deterministických systémů platí, že výstup (chování) je jednoznačně určen vstupem. Momentální stav systému je jednoznačně určen vstupem (např. logický obvod). Výstup stochastického systému je při stejných vstupních podmínkách jiný, lze jej určit jen s určitou pravděpodobností. Chování systému může mít při stejných podmínkách a stavu více variant a to každou s určitou pravděpodobností (např. hod kostkou)

Jednorozměrové systémy (SISO) mají jeden vstup a výstup. Mnohorozměrové systémy mají více než jeden vstup a minimálně jeden výstup.

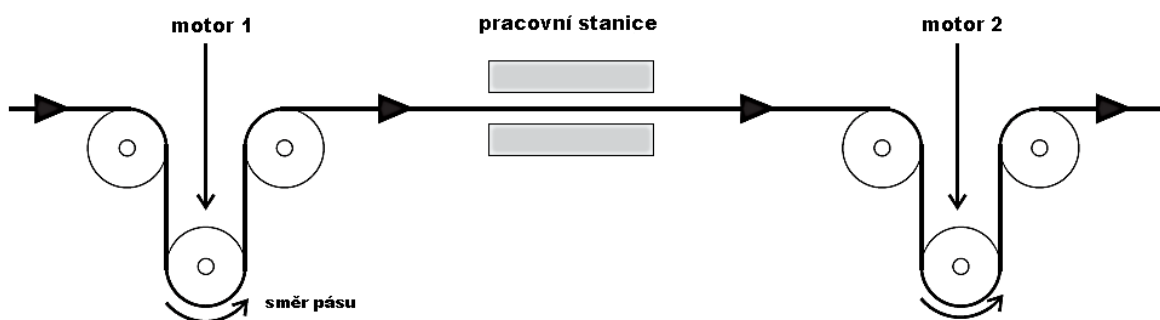
Systémy časově variantní (nestacionární systémy) mají proměnné měnící se v čase. Chování systému při daném vstupu závisí na čase, tedy se s časem mění (např. elektromotor). Parametry časově invariantních systémů (stacionární systémy) jsou v čase neměnné, vlastnosti systému se tedy v čase nemění. Chování systému při daném vstupu nezávisí na časovém intervalu, ve kterém se realizuje. Parametry matematického modelu jsou konstanty.

Každý systém může patřit v jedné horizontální linii pouze do jedné třídy, nemůže být současně lineární a nelineární. Pokud má systém oblast chování, ve které se chová nelineárně, a oblast ve které se chová lineárně, je nazván nelineárním systémem [1, 8].

2 LABORATORNÍ SOUSTAVA SPŘAŽENÝCH POHONŮ

Soustavu spřažených servomotorů (označení CE108) vyrábí firma TecQuipment Limited, která sídlí ve Velké Británii. Jde o MIMO model (multiple input multiple output) a je zejména určen pro výuku mnohorozměrových řídicích systémů. Přístroj byl vyvíjen za spolupráce s Centrem řídicích systémů Manchesterské university, Institutem pro vědu a technologii (UMIST).

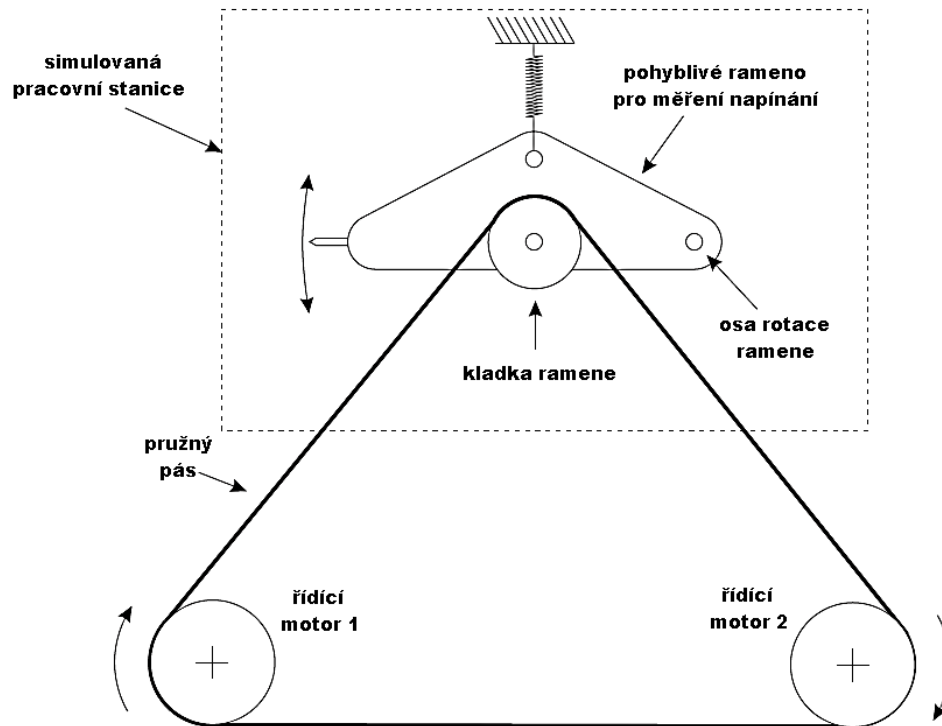
Tento přístroj simuluje praktické úlohy napínání pásu a rychlosti toku materiálu při spojitých procesech, které zahrnují dva nebo více pohonů. Příkladem může být řízení napínání a rychlosti nitě vinuté z jedné cívky na druhou. V provozech, jako je válcovna ocelového plechu, se materiál ztenčuje a napíná při průchodu přes každý válec, proto každý válec musí mít nastavenou různou rychlost. Další příklady lze najít při výrobě kabelů, papíru a všude tam, kde dochází k napínání spojitého pásu, nebo k vinutí. Při takovýchto procesech prochází materiál pracovní stanicí, kde se měří veličiny jako napínání a rychlost, které se navzájem ovlivňují (jsou na sobě závislé). U těchto procesů jsou motory umístěny před a za stanicí, viz Obr. 6. Tato situace je upravena pro laboratorní model tak, že pružný pás je upevněn na 3 kolech tvořící trojúhelník, kdy rychlost dvou kol je přímo úměrná rychlostí motorů. Třetí kladka je umístěna na výkyvném rameni a je poháněna pásem [9, 10].



Obr. 6 – Princip činnosti reálného procesu, na kterém je založen model CE108 [9]

2.1 Popis reálné soustavy spřažených pohonů

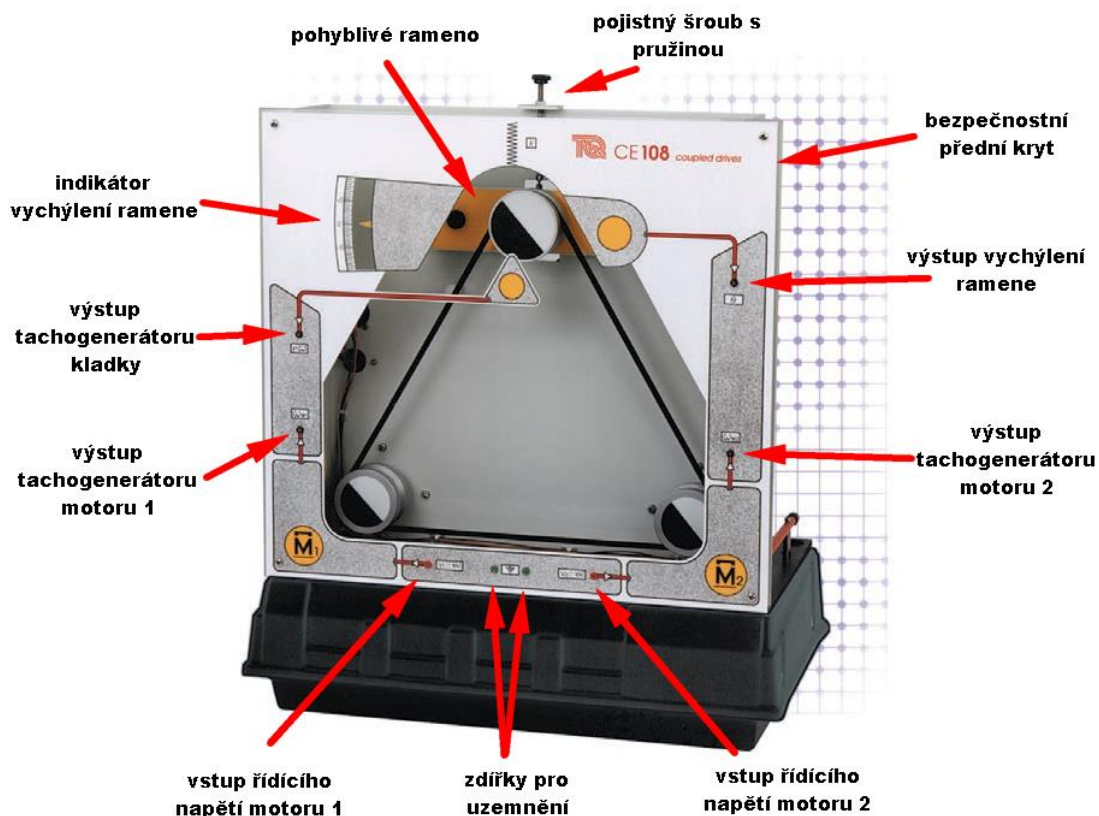
Reálný model je popsán v literatuře [9, 10, 11]. Základem modelu jsou dva stejnosměrné elektromotory. Rychlost dvou spodních kladek je přímo úměrná otáčkám motorů ovládaných pomocí vstupního napětí. Třetí kladka je umístěna v horní části modelu na výkyvném rameni zavěšeném na pružině.



Obr. 7 – Schéma principu činnosti modelu [9]

Vstupní (stejnoseměrné) napětí do servopohonů se pohybuje v rozmezí 0 – 10V. Takovéto napětí odpovídá 0 – 3000 ot/min. Model je možné ovládat také záporným napětím, s tím rozdílem, že se motory pohánějící spodní kladky točí opačným směrem (proti směru hodinových ručiček).

Měření napínání je realizováno nepřímě přes úhel pohyblivého ramene. Výstup napínání je v rozmezí $\pm 10V$, respektive $\pm 5^\circ$. Pokud je na soustavě umístěna pružina držící pohyblivé rameno, pak je napínání minimalizováno. Výkyvné rameno je zabezpečeno pojistnými kolíky, které jsou implementované do modelu a zabraňují tak většímu vychýlení ramene, než je povoleno.



Obr. 8 – Popis předního panelu CE108 [11]

Vstupy do přístroje jsou realizovány pomocí 2mm zdírek umístěných na předním panelu, viz Obr. 8. Řídicí vstupní napětí (+/- 10V) vstupuje do zesilovačů umístěných ve spodní desce přístroje (podstavci). Všechny vstupy a výstupy jsou chráněny proti zkratu a přetížení. Servozesilovače jsou obousměrné a umožňují tak řízení motorů v obou směrech. Další parametry týkající se laboratorního modelu C108 jsou shrnuty v Tab. 1. Všechny parametry lze nalézt na stránkách výrobce [11].

Tab. 1 – Vybrané parametry modelu CE108

Rozměry modelu	540 x 330 x 625 mm
Potřebný prostor	1000 x 750 mm
Váha modelu	53 kg
Napájecí napětí	230 V
Servomotory	18 V; 4,5 A

2.2 Hlavní části modelu

V modelu jsou použity dva stejné servomotory, které jsou řízené pomocí zesilovačů. Zesilovač je umístěn uvnitř přístroje. Motory mají malou setrvačnost a velmi dobrou

charakteristiku krouticího momentu. Motory jsou umístěny v zadní části, viz Obr. 9. Motory generují krouticí moment (Γ_1 , Γ_2), který je přímo úměrný napětí (u_1 , u_2). Servopohony jsou spojeny s tachogenerátory, které vytváří výstupní napětí reprezentující uhlovou rychlost spodních kladek (ω_1 , ω_2).



Obr. 9 – Pohled na hnací motor ze zadní části modelu

Tachogenerátor indikuje rychlost 0 až 3000 ot/min s výstupem 0 – 10V. Je připojen ke kladce na pohyblivém rameni a zajišťuje výstupní napětí y_1 , které je úměrné uhlové rychlosti třetí kladky, viz Obr. 10.



Obr. 10 – Tachogenerátor měřící otáčky třetí kladky

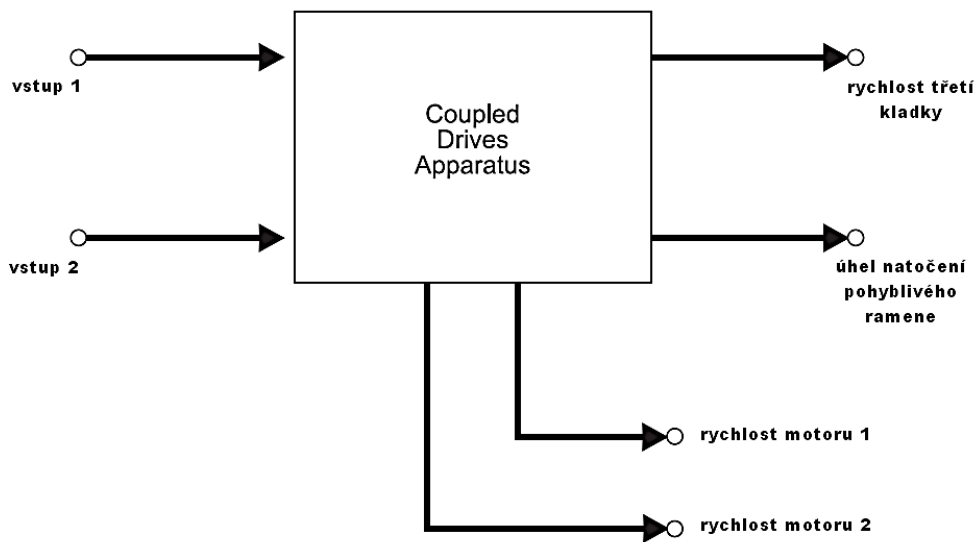
Servopotenciometr je umístěn axiálně k ose rotace ramene (viz Obr. 11). Zajišťuje druhou výstupní veličinu y_2 , která reprezentuje vychýlení ramene.



Obr. 11 – Servopotenciometr měřící vychýlení ramene

2.3 Pohled na model z hlediska teorie systémů

Z hlediska teorie systému je výše popsáný model nelineární, mnohorozměrový systém o dvou vstupech a dvou výstupech. Dále jde o spojitý, v některých případech (kombinace vstupních napětí) stochastický model.

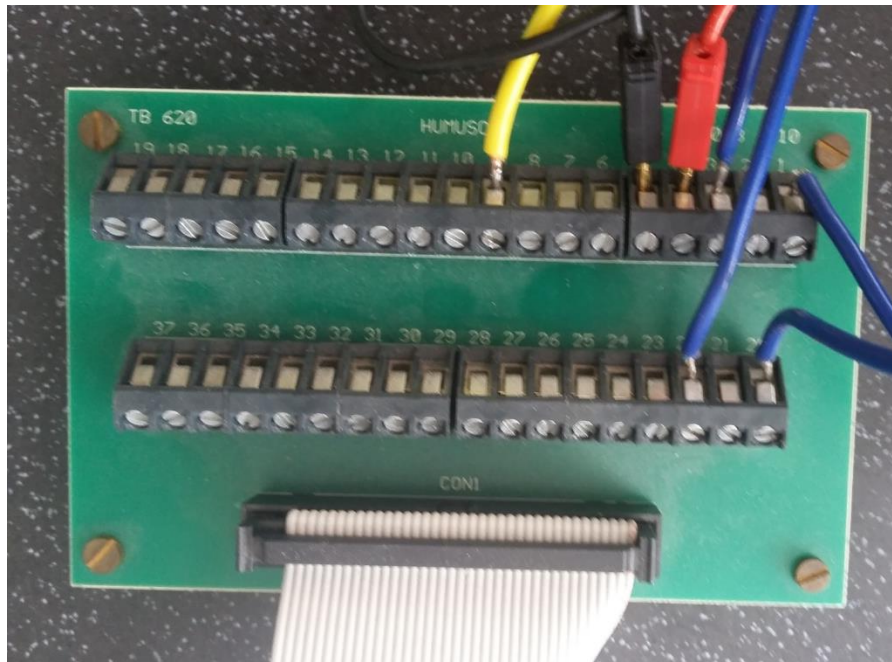


Obr. 12 – Blokové schéma funkce CE108 [9]

Na nákresu blokového schématu funkce modelu CE108 (viz Obr. 13) jsou vidět 4 výstupní veličiny. Za hlavní výstupy, které jsou důležité pro regulaci, lze označit úhlovou rychlost třetí kladky a úhel vychýlení ramene [9].

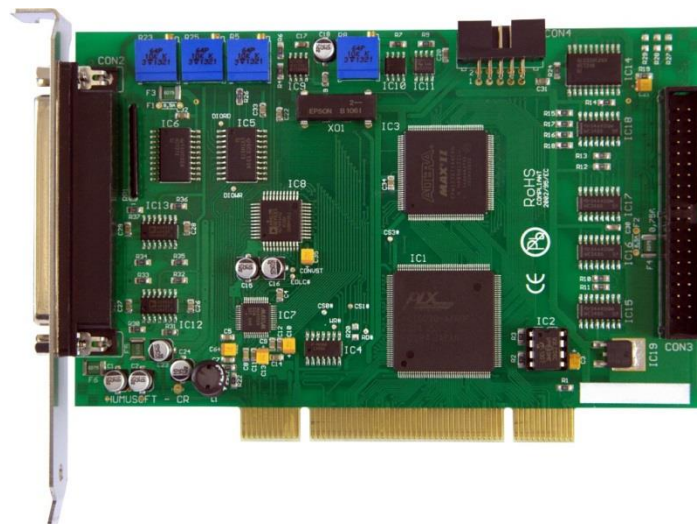
2.4 Propojení modelu CE108 s počítačem

Veškerá měřicí technika je od firmy Humusoft, s.r.o. [18]. Všechny vstupy a výstupy laboratorního modelu spřažených pohonů jsou nejprve přivedeny do univerzální svorkovnice TB 620, viz Obr. 14.



Obr. 13 – Univerzální svorkovnice TB 620

Měřicí karta je se svorkovnicí spojena pomocí 37 – žilového plochého kabelu. Karta nese označení MF 624. Jedná se o multifunkční vstupně-výstupní kartu, která je zapojena do základní desky počítače pomocí sběrnice PCI.



Obr. 14 – Multifunkční měřicí karta MF 624 [12]

Tato karta je podporována balíkem Real Time Toolbox, který je integrován do prostředí Matlab/Simulink. Umožňuje tak plně ovládat a měřit výstupní veličiny modelu v prostředí Matlab a Simulink. Komunikace v prostředí Simulink je zajištěna pomocí bloků RT In a RT Out. V těchto blocích se nastaví požadovaný kanál a perioda vzorkování. Rozsah signálu modelu (+-10V) a rozsah hodnot v Matlab/Simulink je totožný [12].



Obr. 15 – Vnitřní struktura reálného modelu v Simulink

Hlavními vlastnostmi multifunkční vstupně-výstupní karty MF 624 jsou [12]:

- 32 bitová architektura
- Osm kanálů 14 bitových analogových vstupů
- Osm kanálů 14 bitových analogových výstupů
- krátká doba převodu
- 8 digitálních vstupů, 8 digitálních výstupů
- vstupní, výstupní napětí $\pm 10V$

3 POPIS VÝVOJOVÉHO PROSTŘEDÍ MATLAB/SIMULINK

Před samotným odvozením matematického modelu a jeho implementací bude popsáno prostředí Matlab spolu s jeho nejpoužívanějším rozšířením (toolboxem) Simulink. Toolbox je rozšiřující modul v Matlabu, tzv. aplikační knihovna.

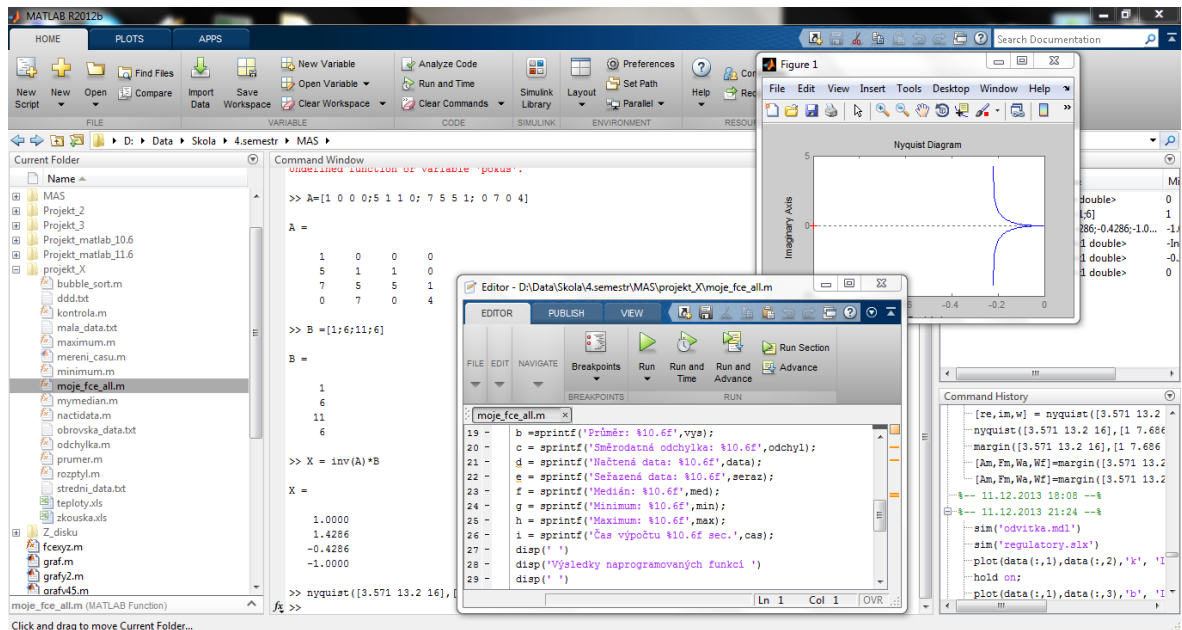
3.1 Matlab

MATLAB (MATrix LABoratory = maticová laboratoř) je výkonné prostředí a skriptovací programovací jazyk čtvrté generace pro vědecké výpočty. Spojuje technické výpočty, vizualizaci dat a programovací jazyk v jednom prostředí. Ukázka prostředí Matlab je vidět na Obr. 17. Díky dostupným modulům vytváří ideální prostředek pro inženýry, vědce, matematiky, učitele a studenty při řešení problémů z mnoha oblastí. Program je vyvíjen společností MathWorks [15].

Existuje široká komunita lidí, kteří používají při své práci Matlab. Firma MathWorks na svých internetových stránkách provozuje Matlab Central. Tato stránka slouží uživatelům Matlabu a jeho rozšíření pro výměnu informací. Nachází se zde tisíce příkladů ze všech oblastí lidského bádání, soubory jsou rozříděny do kategorií a jsou k dispozici k volnému stažení.

Mezi klíčové vlastnosti Matlabu patří [13]:

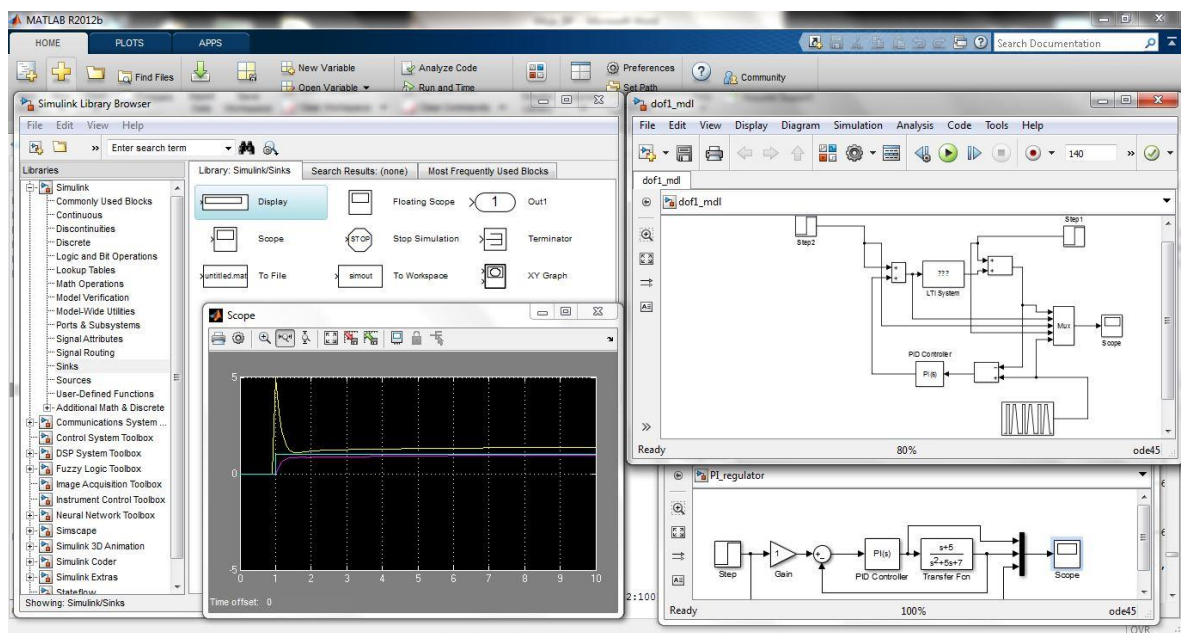
- vysokoúrovňový jazyk pro technické výpočty,
- otevřený a rozšířitelný systém,
- velké množství aplikačních knihoven,
- podpora vícerozměrných polí a struktur,
- interaktivní nástroje pro tvorbu GUI (graphical user interface – grafické uživatelské rozhraní),
- import a export dat do mnoha formátů,
- komunikace s externími měřícími a monitorovacími přístroji v reálném čase,
- rozšiřitelnost modulů jazyky C, C++, Fortran, Java.



Obr. 16 – Ukázka prostředí Matlab

3.2 Simulink

Název Simulink vznikl spojením dvou anglických slov SIMULATION a LINK – simulace a spojení. Je to jedno z nejznámějších a nejpoužívanějších rozšíření v Matlabu. Využívá Matlab pro modelování, simulaci a analýzu dynamických systémů v přehledném grafickém uživatelském prostředí, které je znázorněno na Obr. 18.



Obr. 17 – Ukázka prostředí Simulink

Tvorba modelů je velice rychlá. Simulink obsahuje obrovské množství předdefinovaných bloků pro syntézu a analýzu systémů [13, 14].

Pomocí Simulinku a jeho grafického editoru lze vytvářet modely lineárních, nelineárních, v čase diskretních nebo spojitých systémů pouhým přesunutím funkčních bloků myší.

Na základě výsledku logické podmínky je možné spouštět jen určitou část simulačního schématu. Spouštěné a povolované subsystémy umožňují použití programu v náročných simulačních experimentech. Samozřejmostí je otevřená architektura, která dovoluje uživateli vytváření vlastních funkčních bloků, s možností rozšíření rozsáhlé knihovny Simulinku.

Hierarchická struktura modelů umožňuje koncipovat i velmi složité systémy do přehledné soustavy subsystémů prakticky bez omezení počtu bloků. Simulink, stejně jako Matlab, dovoluje připojovat funkce, které napsal uživatel v jazyce C. Vynikající grafické možnosti Simulinku je možné přímo využít k tvorbě dokumentace. Neocenitelná vlastnost je nezávislost uživatelského rozhraní na počítačové platformě. Přenositelnost modelů a schémat mezi různými typy počítačů umožňuje vytvářet rozsáhlé modely, které vyžadují spolupráci většího kolektivu řešitelů na různých úrovních [14].

3.3 Real-Time toolbox

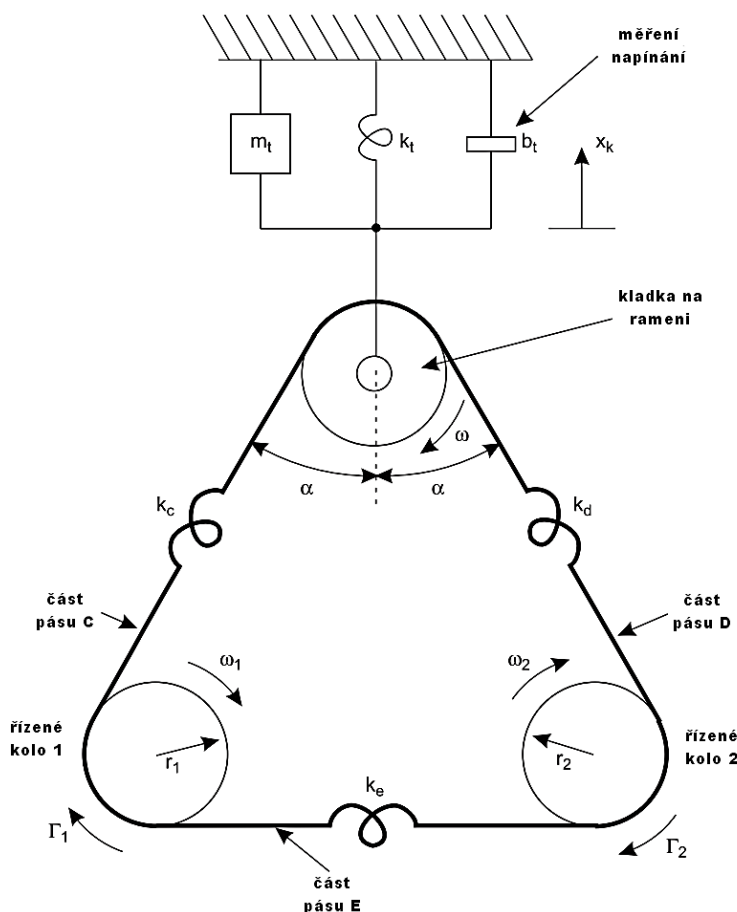
Real-Time Toolbox je rozšiřující knihovna programového prostředí Matlab/Simulink pro práci se skutečnými reálnými signály. Umožňuje spouštět modely vytvořené pomocí Simulink v reálném čase propojené s fyzickými zařízeními. Obsahuje vstupně-výstupní bloky, pomocí kterých je možné propojit reálné signály se Simulink. Zde je možné, pomocí navrženého modelu, signály dále zpracovávat a distribuovat jako reálné výstupy. Vše probíhá v reálném čase. Komunikace s okolím je zajištěna podporou ovladačů pro I/O zařízení od několika výrobců (například firma Humusoft, s.r.o [18]). Zpracovávané signály mohou být v analogové i digitální podobě viz [17].

V nejnovějších verzích Matlabu se už nejedná o samostatný toolbox, ale o program, který je integrován do balíku Simulink Desktop Real-Time [19].

4 MODELOVÁNÍ LABORÁTORNÍ SOUSTAVY CE108

V této kapitole vytvoříme matematický model reálné soustavy sprážených pohonů. Postup vychází z kapitoly 1.4. Model by měl být ideálně platný v celém pracovním rozsahu i při působení různých vnějších vlivů. Ne vždy lze takového cíle dosáhnout. Pro vytvoření kopie laboratorního modelu CE108 využijeme znalosti jak z matematiky a fyziky, tak z teorie systémů. Vytvořený model bude tvořit základ pro celý zbytek této práce. Odvození bylo vytvářeno na základě uživatelského manuálu k modelu [9]. Shodné výsledky uvádí i literatura [10, 20].

4.1 Zjednodušující předpoklady



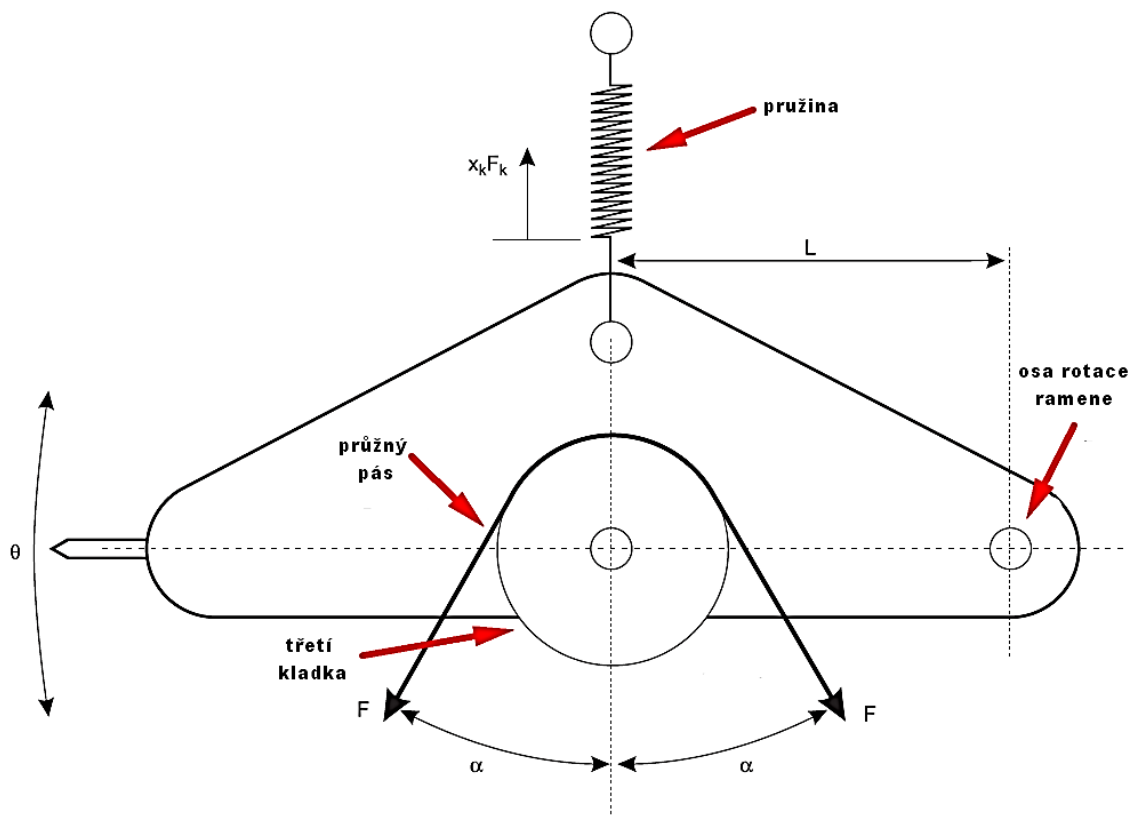
Obr. 18 – Schéma systému pro účely modelování [9]

Při vytváření matematického modelu se předpokládá, že obě části pásu mají u horní kladky stejný odklon pásu od vertikály α . Dále se předpokládá malá změna úhlu natočení pohyblivého ramene, aby bylo možné použít vzdálenost x_k . Pás lze rozdělit na lineární části o tuhosti k_c , k_d , k_e , přičemž kladky 1 a 2 mají momenty setrvačnosti a koeficienty rotační frikce I_1 , I_2 , a b_1 , b_2 . Systém je zobrazen na Obr. 18.

4.2 Odvození základních vztahů a rovnic pro pohyblivé rameno

Výstupní napětí y_2 reprezentuje změnu úhlu θ , jak je označeno na přední desce modelu, a také pohyb pružiny x_k , která je úměrná síle napínání pásu F , která je označena v rovnici 4. Schéma modelu vystihuje Obr. 12.

$$F = \frac{1}{2 \cos(\alpha)} F_k \quad (4)$$



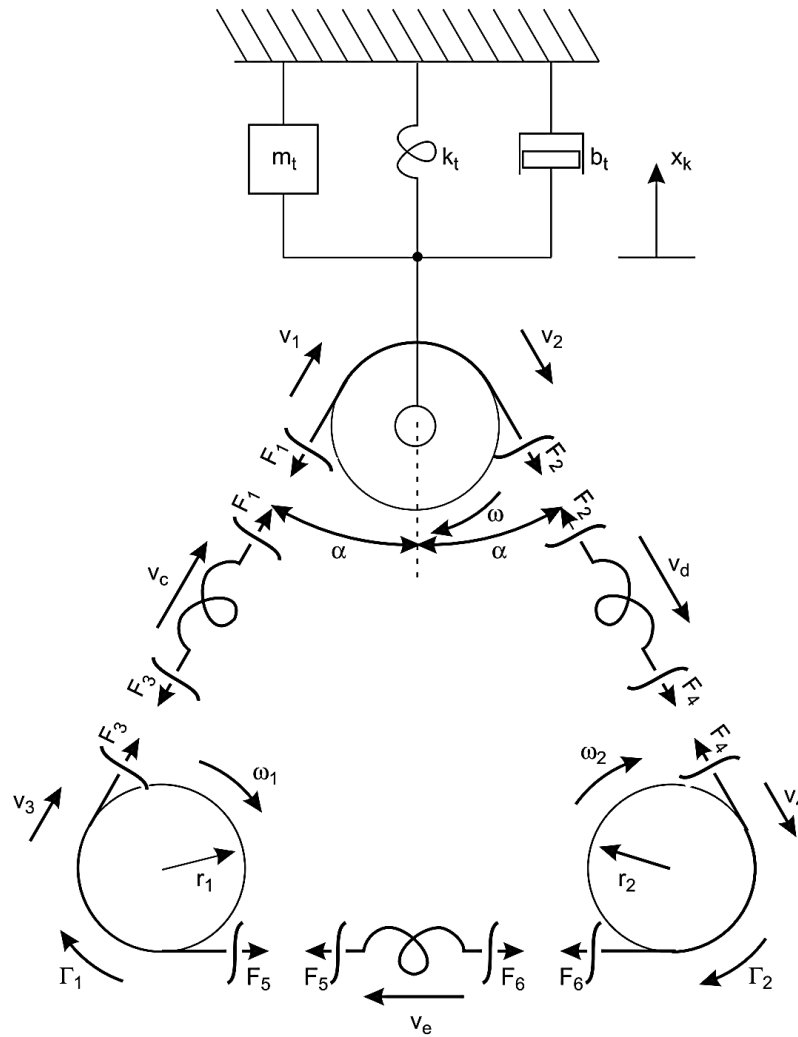
Obr. 19 – Schéma pohyblivého ramene [9]

Pohyb pružiny je vztažen k síle F_k pomocí vztahu:

$$F_k = k_t x_k. \quad (5)$$

Pro reprezentaci změny úhlu platí $\theta = \frac{x_k}{L}$, kde L je vzdálenost mezi osou otočného ramene a osou třetí kladky. Síla pružiny F_k je úměrná napínání pásu F podle vztahu (4). Srovnáním rovnic 4 a 5 získáme výslednou rovnici síly působící na rameno ve tvaru: $F = \frac{k_t}{\cos(\alpha)} x_k$, kde α je odklon pásu od vertikály [9, 10].

4.3 Odvození matematického modelu



Obr. 20 – Vztahy přenosových funkcí pro úhlové rychlosti [9]

Rychlosti částí pásu jsou označeny v s příslušnými indexy. Předpokládá se, že třetí kladka rotuje bez frikce. Platí tedy $F_1 = F_2 = F$, převedením sil na vertikálu je pak $F_k = 2\cos(\alpha)F$ a platí zde zákon zachování energie $\dot{x}_k F_k = F(v_1 - v_2)$. Tedy platí $\dot{x}_k (2\cos(\alpha)) = v_1 - v_2$. Síla F_k je pak dána

$$F_k = \dot{p} + k_t x_k + b_t \dot{x}_k, \quad (6)$$

kde \dot{p} je momentum hybnosti m_t (váha pohyblivého ramene). Rovnováha kroutících momentů kladek 1 a 2 je dána rovnicemi

$$\Gamma_1 + F_3 r_1 - F_5 r_1 = \dot{h}_1 + b_1 \omega_1, \quad (7)$$

$$\Gamma_2 + F_6 r_2 - F_4 r_2 = \dot{h}_2 + b_2 \omega_2, \quad (8)$$

kde h_1, h_2 jsou úhlová momenta $h_1 = I_1 \omega_1, h_2 = I_2 \omega_2$ a úhlové rychlosti ω_1, ω_2 jsou dány rovnicemi $v_3 = \omega_1 \Gamma_1, v_4 = \omega_2 \Gamma_2$. Rovnováha sil pásu dává $F = k_c x_c = k_d x_d, F' = k_e x_e$, kde $F' = F_5 = F_6$ a $F = F_1 = F_2 = F_3 = F_4$ a x_c, x_d a x_e jsou odpovídající velikosti částí pásu. Jestliže jsou stavy systému dány $h_1, h_2, x_c, x_d, x_e, x_k$ a p , pak platí:

$$\begin{aligned} \dot{h}_1 &= \left[\frac{-b_1}{I_1} \right] h_1 + r_1 k_c x_c - r_1 k_e x_e + \Gamma_1, \\ \dot{h}_2 &= \left[\frac{-b_2}{I_2} \right] h_2 + r_2 k_c x_c - r_2 k_e x_e + \Gamma_2, \\ \dot{x}_c &= \left[1 + \frac{k_c}{k_d} \right]^{-1} \left[-h_1 \frac{r_1}{I_1} + h_2 \frac{r_2}{I_2} + p \frac{2 \cos(\alpha)}{m_t} \right], \\ \dot{x}_e &= \frac{r_1}{I_1} h_1 - \frac{r_2}{I_2} h_2, \\ \dot{x}_k &= \frac{p}{m_t}, \\ \dot{p} &= 2 \cos(\alpha) k_c x_c - k_t x_k - \frac{b_t}{m_t} p. \end{aligned} \quad (9)$$

Tyto stavové rovnice (9) představují základ, ve kterém lze nalézt všechny vztahy a přenosové funkce přístroje. Vztahy lze dále zjednodušit. Protože použité motory jsou stejné, máme $I_1 = I_2 = I, b_1 = b_2 = b$, dále víme, že kladky mají stejný poloměr tedy $r_1 = r_2 = r$ a úseky pásů jsou stejně dlouhé, tedy $k_c = k_d = k_e = k$. Po použití těch zjednodušení obdržíme rovnici $\dot{h}_1 = \dot{h}_2 = -\frac{b}{I}(h_1 + h_2) + \Gamma_1 + \Gamma_2$, odkud plyne vztah pro první přenosovou funkci:

$$\omega_1(s) + \omega_2(s) = \frac{1}{Is + b} [\Gamma_1(s) + \Gamma_2(s)]. \quad (10)$$

Pro rychlost v_c platí:

$$v_c(s) = \left[\frac{m_t s^2 + b_t s + k_t}{\left(1 + \frac{k_c}{k_d}\right)(m_t s^2 + b_t s + k_t) - (2 \cos(\alpha))^2 k_c} \right] r[\omega_1(s) - \omega_2(s)], \quad (11)$$

$$v_c(s) = \left[\frac{m_t s^2 + b_t s + k_t}{2(m_t s^2 + b_t s + k_t) - (2 \cos(\alpha))^2 k_c} \right] r[\omega_1(s) - \omega_2(s)].$$

Pro úhlové rychlosti pak platí:

$$\omega_1(s) = \left[\frac{Is^2 + bs + k^1(s)}{(Is + b)(Is^2 + bs + 2k^1(s))} \right] \Gamma_1 s + \left[\frac{k^1(s)}{(Is + b)(Is^2 + bs + 2k^1(s))} \right] \Gamma_2 s,$$

$$\omega_2(s) = \left[\frac{Is^2 + bs + k^1(s)}{(Is + b)(Is^2 + bs + 2k^1(s))} \right] \Gamma_2 s + \left[\frac{k^1(s)}{(Is + b)(Is^2 + bs + 2k^1(s))} \right] \Gamma_1 s, \quad (12)$$

kde $k^1(s) = r^2(k_c G_1(s) + k_e) = r^2 k(G_1(s) + 1)$. $G_1(s)$, vyjadřující vztah mezi úhlovými rychlostmi servopohonů, je definováno jako

$$G_1(s) = \frac{m_t s^2 + b_t s + k_t}{2(m_t s^2 + b_t s + k_t) - (2 \cos(\alpha))^2 k}. \quad (13)$$

Pro $k^1(s)$ platí $k^1(s) = r^2 k \left(\frac{m_t s^2 + b_t s + k_t}{2(m_t s^2 + b_t s + k_t) - (2 \cos(\alpha))^2 k} + 1 \right)$. Díky stavitelnému

šroubu, který na modelu drží pružinu ovlivňující pohyb výkyvného ramene, je $k^1(s)$

konstantní, tedy $k^1(s) \rightarrow k^1 = r^2 \left(k_c + \frac{k_c}{1 + \frac{k_c}{k_d}} \right)$ a jelikož platí $k_c = k_d$, pak $k^1 = \frac{3}{2} k r^2$, kde

pravá strana rovnice udává efektivní torzní tuhost pásu.

Úhlová rychlost třetí kladky může být vyjádřena v závislosti na úhlových rychlostech zbylých dvou kol, tedy $\omega(s) = \omega_1(s) + G_1(s)[\omega_2(s) - \omega_1(s)]$, po dosazení úhlových rychlostí dostaneme rovnici:

$$\omega(s) = \frac{1}{Is^2 + bs + 2k^1} \left(\left[\frac{Is^2 + bs + k^1}{Is + b} \right] \Gamma_1(s) + \left[\frac{k^1}{Is + b} \right] \Gamma_2(s) + s G_1(s) [\Gamma_2(s) - \Gamma_1(s)] \right) \quad (14)$$

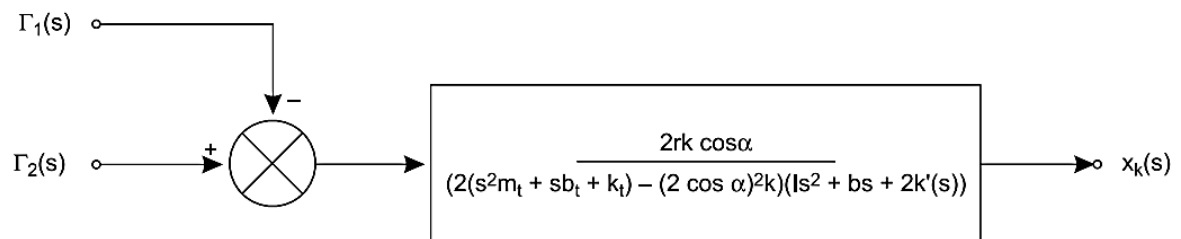
Přenosová funkce udávající posun pohyblivého ramene má tvar:

$$x_k(s) = \frac{2rk \cos(\alpha)(\Gamma_2(s) - \Gamma_1(s))}{\left[\left(1 + \frac{k_c}{k_d} \right) (m_t s^2 + b_t s + k_t) - (2 \cos(\alpha))^2 k_c \right] [Is^2 + bs + 2k^1(s)]} \quad (15)$$

Rovnice (10) lze zjednodušit na tvar:

$$x_k(s) = \frac{2rk \cos(\alpha)(\Gamma_2(s) - \Gamma_1(s))}{[2(m_t s^2 + b_t s + k_t) - (2 \cos(\alpha))^2 k] [Is^2 + bs + 2k^1(s)]} \quad (16)$$

Napínání pásu se tedy určuje na základě úhlového posunu ramene x_k . Vztah mezi výstupy $\omega(s)$, $x_k(s)$ a vstupy $\Gamma_1(s)$ a $\Gamma_2(s)$ udává následující obrázek (Obr. 21) [9, 10].

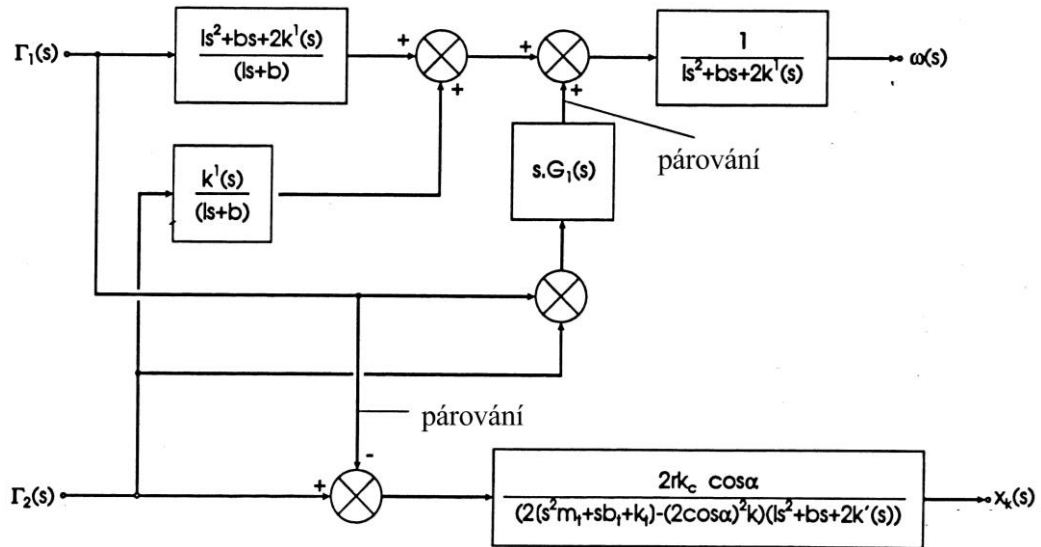


Obr. 21 – Přenosová funkce pro vychýlení ramene [9]

4.4 Shrnutí analýzy

Podle předchozí analýzy lze přístroj popsat stavovými rovnicemi (9). Po zjednodušení vztahů je úhlová rychlost pohyblivé kladky je dána rovnicí (14). Vztahy mezi rychlostmi a krouticími momenty motoru popisují rovnice (12). Úhlový posun pohyblivého ramene je dán rovnicí (16).

Pokud se použijí všechny potřebné přenosové funkce, které se zapojí v závislosti na potřebných vstupech, vznikne tak celkový model systému (Obr. 22) [9, 10]. Význam parametrů bude podrobněji vysvětlen v kapitole 7.3.



Obr. 22 – Celkový model soustavy spřažených pohonů [9]

4.4.1 Celkový model s uvažováním akčních členů a snímačů

Systém je ovládán pomocí napětí u_1 a u_2 , které vstupují do zesilovačů motorů g_a a g_b . Výstupy systému, tedy otáčky třetí kladky ω a vychýlení ramene θ jsou získány na základě výstupu z tachogenerátoru y_1 a snímače napínání y_2 . Pro tyto signály platí:

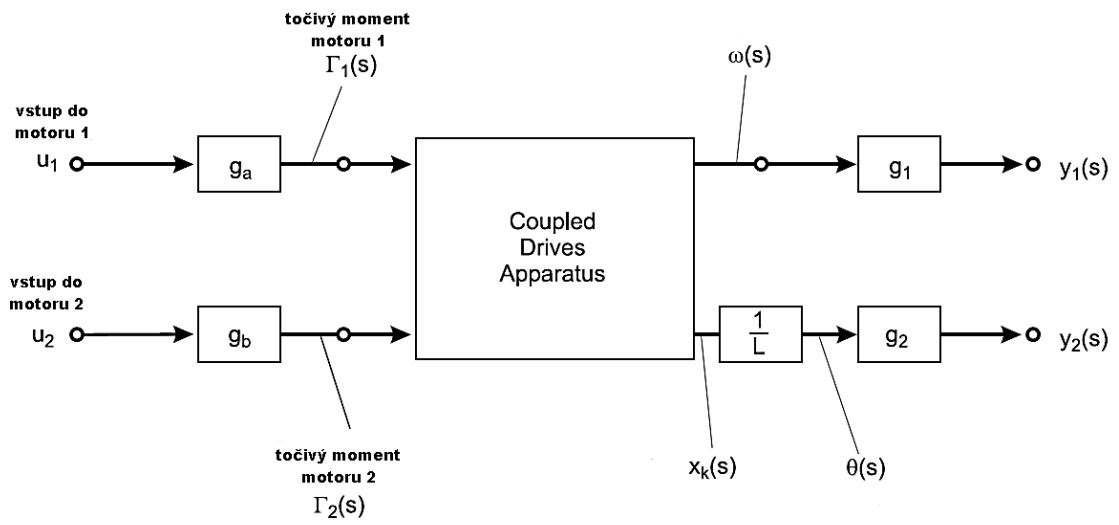
$$\Gamma_1 = g_a \cdot u_1, \quad (17)$$

$$\Gamma_2 = g_b \cdot u_2, \quad (18)$$

$$y_1 = g_1 \cdot \omega, \quad (19)$$

$$y_2 = g_2 \cdot x_k. \quad (20)$$

Konstanty g_1 a g_2 jsou dány konstrukcí tachogenerátoru a snímače napínání.



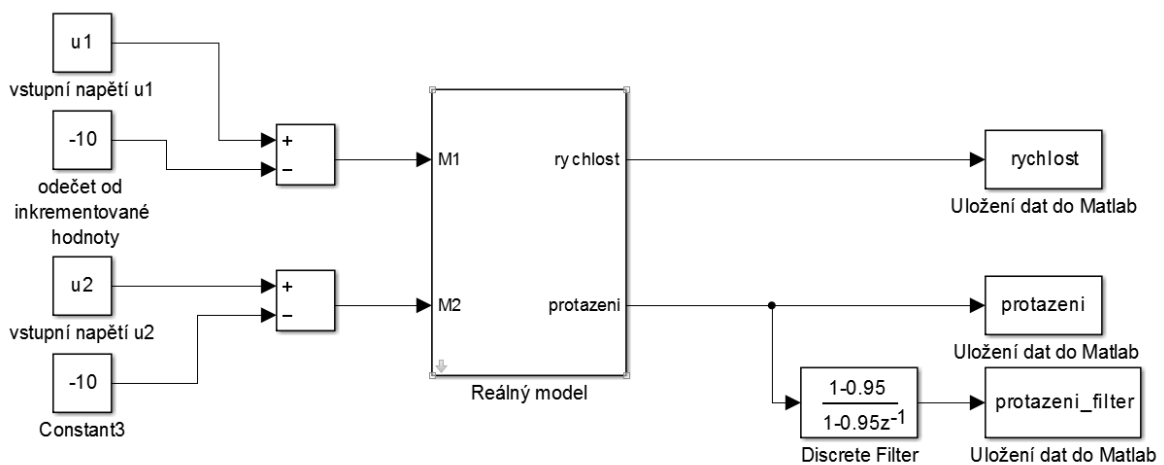
Obr. 23 – Vztah mezi u_1 , u_2 a měřitelnými výstupy [9]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 STATICKÉ CHARAKTERISTIKY REÁLNÉHO MODELU

Statická charakteristika je grafická závislost výstupní veličiny systému na vstupní veličině v ustáleném stavu. V tomto případě je výstupní veličinou rychlost třetí kladky, dále jen rychlost, a vychýlení výkyvného ramene v závislosti na vstupním napětí jednotlivých elektromotorů v ustáleném stavu. Pojem vychýlení ramene bude v další části této práce nazýván protažením. Ze získaných statických charakteristik systému lze například navrhnout optimální pracovní oblast pro řízení.

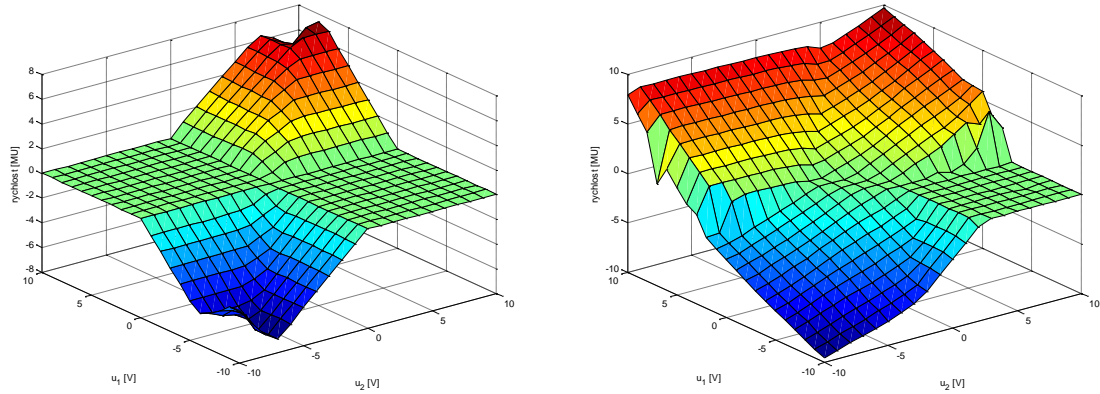
Protože výstupy modelu závisí na obou vstupech, bylo měření prováděno pro všechny kombinace vstupního napětí. Napětí se zvětšovalo po jednom voltu v celém pracovním rozsahu, tedy od -10V po 10V.



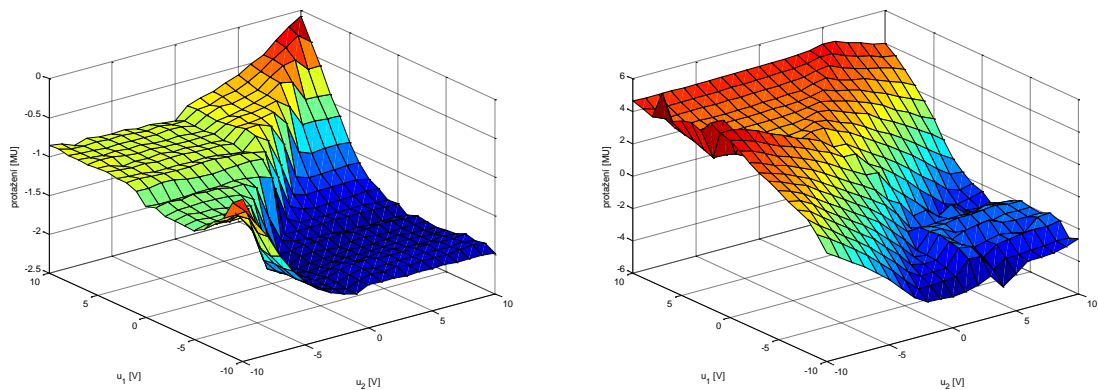
Obr. 24 – Simulinkové schéma pro měření charakteristik modelu

Schéma na Obr. 24 bylo spouštěno pomocí skriptu, který nastavoval kombinace napětí a zpracovával naměřená data. Nastavení všech kombinací napětí zajišťoval vnořený cyklus, který inkrementoval napětí u_2 , vnější cyklus, zajišťoval inkrementaci napětí u_1 . Celkem vzniklo 441 kombinací vstupních napětí, tedy 441 přechodových charakteristik a 441 hodnot pro statickou charakteristiku. Hodnoty do statických charakteristik byly spočítány pomocí průměru 20-ti posledních naměřených hodnot v rámci jednoho cyklu s periodou vzorkování 0,1 sekundy. Systém se ustálil po 2 sekundách, při měření byla brána určitá rezerva, proto jedno měření trvalo 15 sekund. Protože byl servopotenciometr měřící protažení velmi citlivý, byl použit pro úpravu signálu diskretní IIR filtr ve tvaru (21).

$$G(z) = \frac{0,05}{1 - 0,95z^{-1}} \quad (21)$$



Graf 1 – Statická charakteristika rychlosti starého pásu (vlevo) a nového pásu (vpravo)



Graf 2 – Statická charakteristika protažení starého pásu (vlevo) a nového pásu (vpravo)

První měření proběhlo na starém pásu, který byl na modelu používán mnoho let. Starý pás byl značně vytahaný, opotřebovaný a natržený, hrozilo přetržení pásu (Obr. 25). Nový pás měl kratší délku, díky tomu byl více napnutý a měl větší přilnavost. Díky těmto aspektům vznikly rozdíly v grafech (viz Graf 1 a 2). Zkratka MU znamená Matlab Unit. Používá se k popisu signálu zpracovávaného v Simulink. Firma TecQuipment Limited dodává k modelu určitý počet náhradních pásů. Z informací získaných od vyučujících, kteří mají model na starost, bylo zjištěno, že poslední výměna pásu proběhla přibližně před deseti lety.

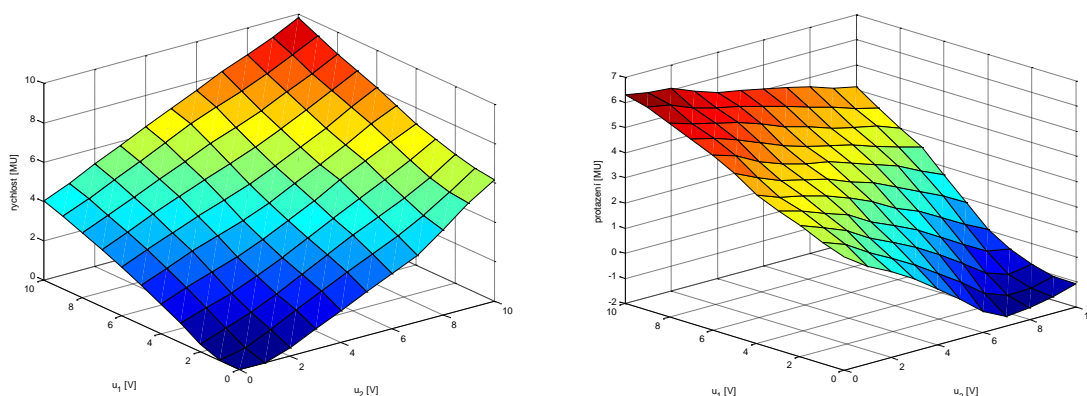


Obr. 25 – Detail natrhnutého pásu

Na modelu, s novým vyměněným pásem, byly provedeny desítky podobných měření. Výsledky měření se i při stejných průbězích vstupních napětí vždy lišily. Největší rozdíly vznikaly při kombinaci, kdy jedno z napětí bylo kladné a druhé záporné. Při těchto kombinacích vykazoval model nelineární chování a výstupní veličiny se v některých případech ani neustálily. Systém dosáhl vyšších výstupních hodnot při měření s novým pásem. Obzvláště při měření protažení.

Největší rozdíly vznikaly při měření v rozmezí $u_1 = 0 - 10V$ a $u_2 = -10 - 0V$. Při této kombinaci se třetí kladka často otáčela náhodně kladným, nebo záporným směrem otáčení. V některých případech model měnil směr otáčení kladky v době, kdy už se zdálo, že je výstupní hodnota ustálená.

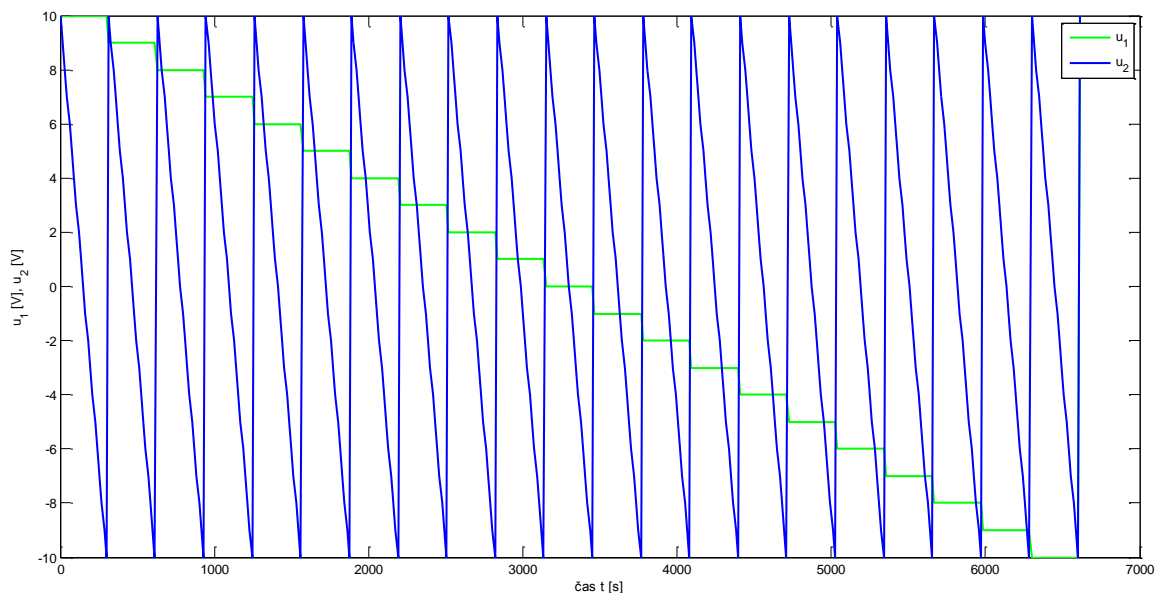
Další měření bylo provedeno pouze pro kombinaci kladného napětí, kdy se napětí u_2 měnilo pomocí vnějšího cyklu a napětí u_1 pomocí vnitřního cyklu.



Graf 3 – Statická charakteristika rychlosti (vlevo) a protažení (vpravo) pro kladná vstupní napětí

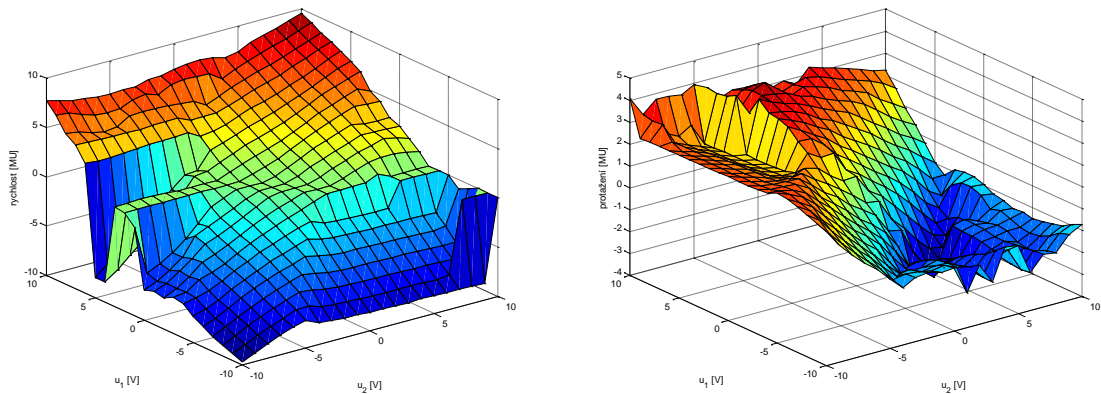
Oblast, kde se využívá pouze kombinace kladných napětí, obsahuje nejvíce lineárních oblastí. Při nastavení kombinací pouze záporného napětí je tvar plochy podobný jako v Grafu 3.

Při nastavování napětí od největšího po nejmenší (opačný směr než v předchozím případě) se zjistilo, že průběhy jsou podobné a tato změna na chování modelu nemá velký vliv. Dalším pokusem byla úprava vstupních hodnot (Graf 4). V předchozích případech se motory před nastavením další kombinace vždy zastavily a simulační schéma se znovu spustilo s další kombinací vstupního napětí. Úkolem bylo zjistit, jak se změní statické charakteristiky, pokud se motor nezastaví. Motor tedy bude napájen předchozí kombinací napětí a skokovou změnou přejde na další kombinaci. Měření probíhalo pouze pomocí schématu vytvořeného v Simulink. Výsledek měření je zobrazen v Grafu 5



Graf 4 – Vstupní hodnoty napětí u_1 a u_2 v závislosti na čase

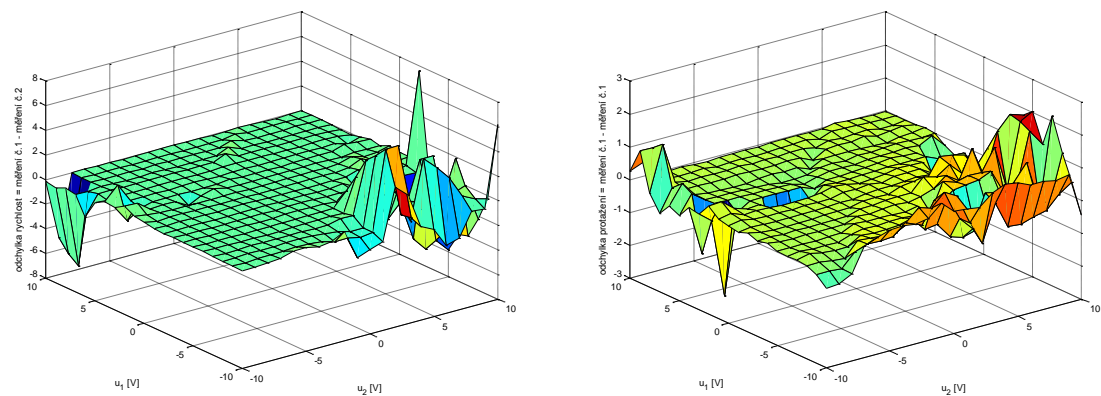
Průběh napětí byl zajištěn pomocí bloku Repeating Sequence Stair, který na základě nastavené periody postupně snižoval hodnotu napětí.



Graf 5 – Statická charakteristika rychlosti (vlevo) a protažení (vpravo) při postupné změně vstupního napětí

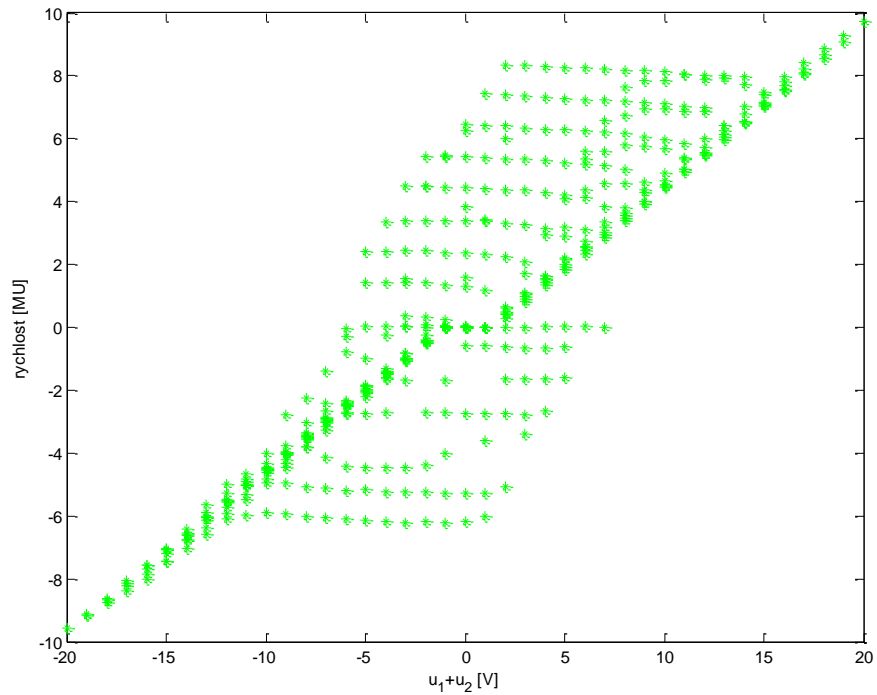
5.1 Porovnání měření

Z měření byly vybrány dvě statické charakteristiky, změřené za stejných podmínek. Jejich absolutní hodnoty byly od sebe odečteny a vyneseny do Grafu. Jak moc se od sebe tyto měření liší, je zobrazeno v Grafu 6.

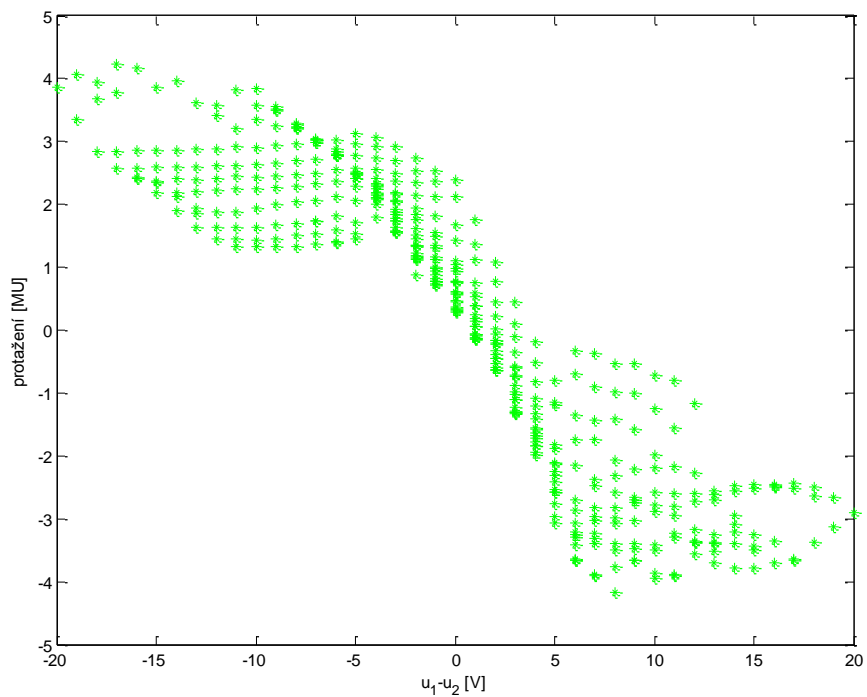


Graf 6 – Odchylka při měření statických charakteristik rychlosti (vlevo) a protažení (vpravo)

Pokud by byl systém lineární, jeho statickou charakteristikou by byla rovná plocha. Pro zkoumání takového jevu byly vytvořeny grafy znázorňující závislost rychlosti na součtu nastavených napětí. Ustálená hodnota protažení je vynesena v závislosti na rozdílu nastavených napětí.



Graf 7 – Závislost rychlosti pásu na napětí $u_1 + u_2$

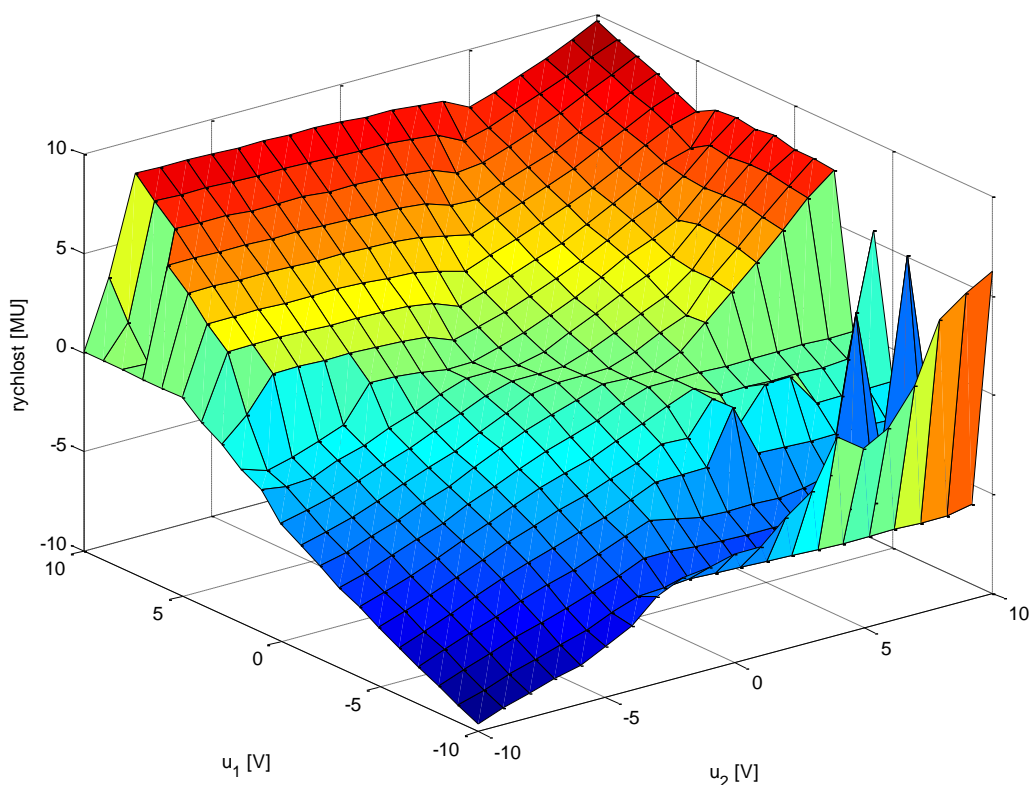


Graf 8 – Závislost protažení pásu na napětí $u_1 - u_2$

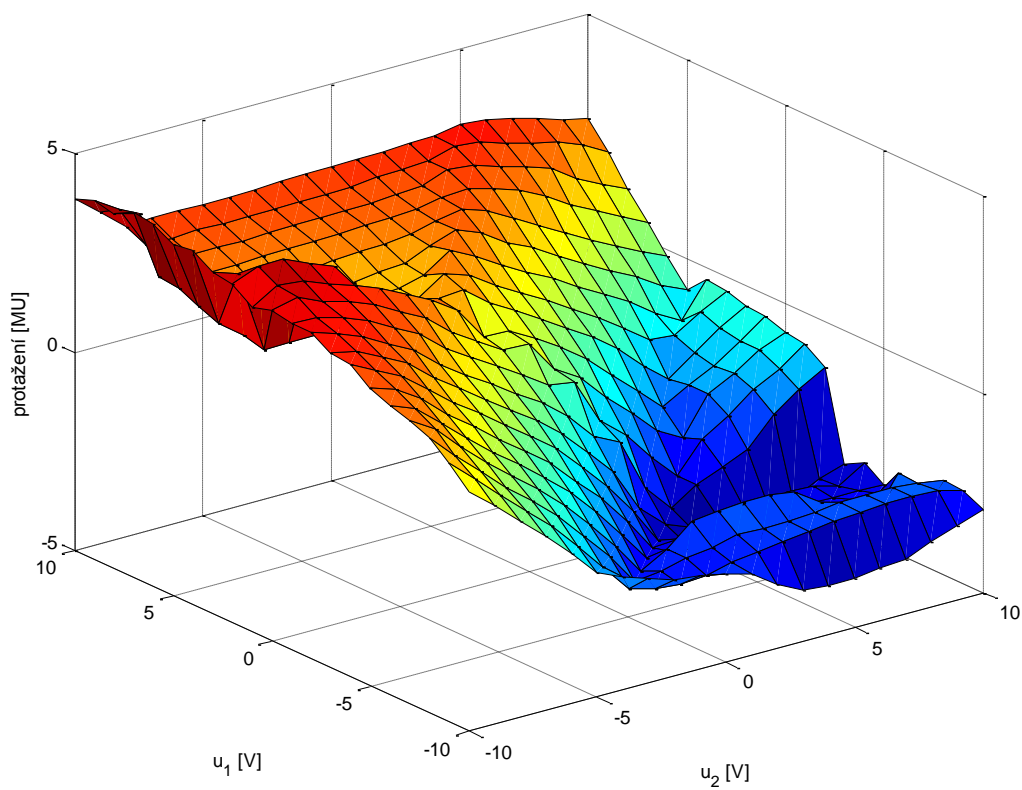
Při vynesení hodnot v grafu č. 7 a 8 lze pozorovat, jak moc se hodnoty vzdalují od přímky, která by vznikla za předpokladu, že by byl model lineární. Výsledkem statické

charakteristiky by tedy byla zcela rovná plocha. Z grafů je patrné, v jaké oblasti se hodnoty pohybují.

Všechna naměřená data, spolu s vynesnými grafy a spouštěcími skripty jsou přiložena k této práci. Měření jsou rozdělena podle data, kdy se měření provádělo. Vzhledem k množství naměřených dat nebylo možné v této práci publikovat všechna měření, která byla provedena. Ze všech naměřených statických charakteristik bylo vybráno pouze jedno měření, které bude použito jako referenční při vytváření simulačního modelu viz kapitola 7. (měření č. 1 ze dne 18. 2. 2016). Referenční statické charakteristiky jsou znázorněny na následujících dvou grafech. Toto měření bylo vybráno na základě podobnosti s ostatními statickými charakteristikami. Jeho průběh je typický a vyskytuje se ve většině měření, které byly na modelu provedeny za stejných podmínek v určitém časovém období.



Graf 9 – Referenční statická charakteristika rychlosti

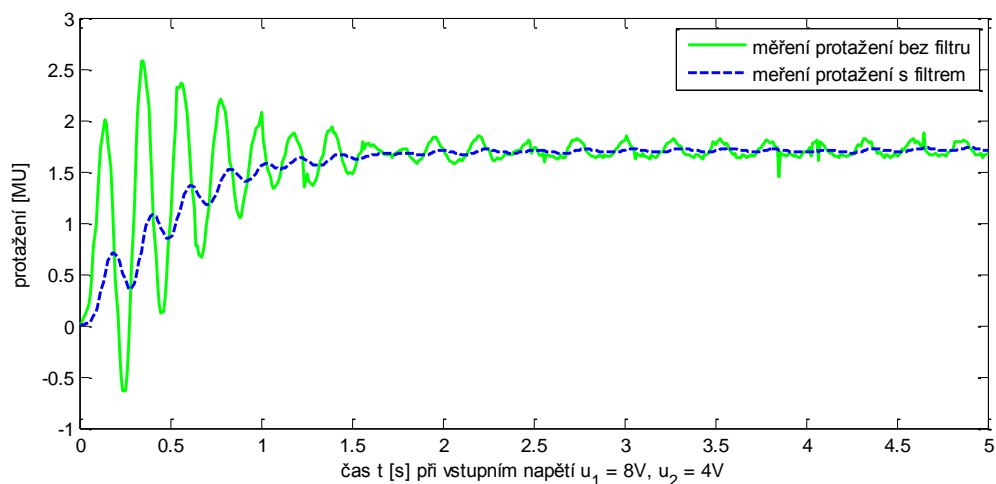


Graf 10 – Referenční statická charakteristika protažení

6 DYNAMICKÉ CHARAKTERISTIKY REÁLNÉHO MODELU

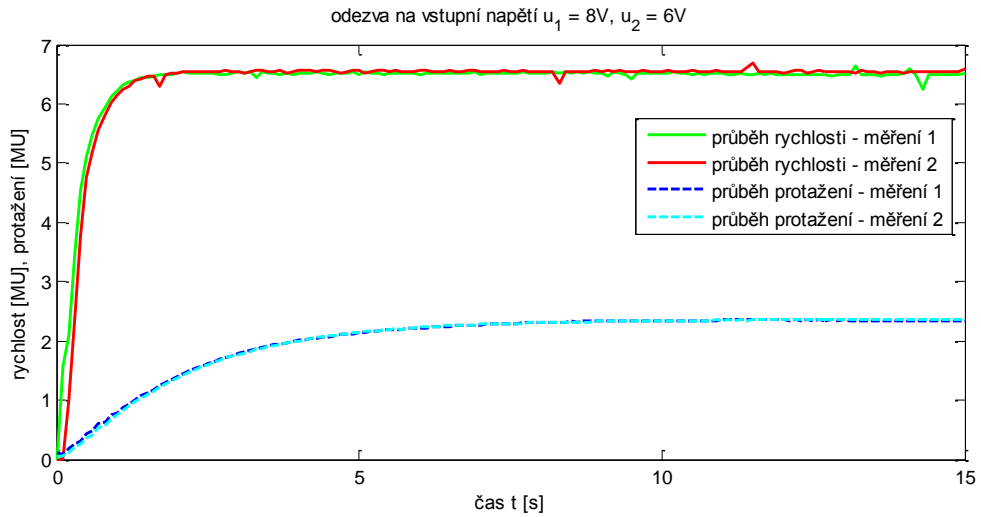
Přechodová funkce, vyjadřuje odezvu systému na vstupní signál $u(t)$ ve tvaru jednotkového (Heavisideova) skoku při nulových počátečních podmínkách. Přechodové charakteristiky jsou grafickým vyjádřením přechodové funkce. V tomto případě bude přechodová charakteristika vyjadřovat časovou závislost rychlosti a protažení na skokové změně jednotlivých otáček motorů.

Díky měření statické charakteristiky byly změřeny stovky přechodových charakteristik. V rámci této práce bude zobrazena pouze malá část. V elektronické příloze bude přiložen skript, který vykreslí přechodové charakteristiky při všech kombinacích vstupního napětí. Během měření přechodové charakteristiky protažení byl pro úpravu signálu použit opět IIR filtr.

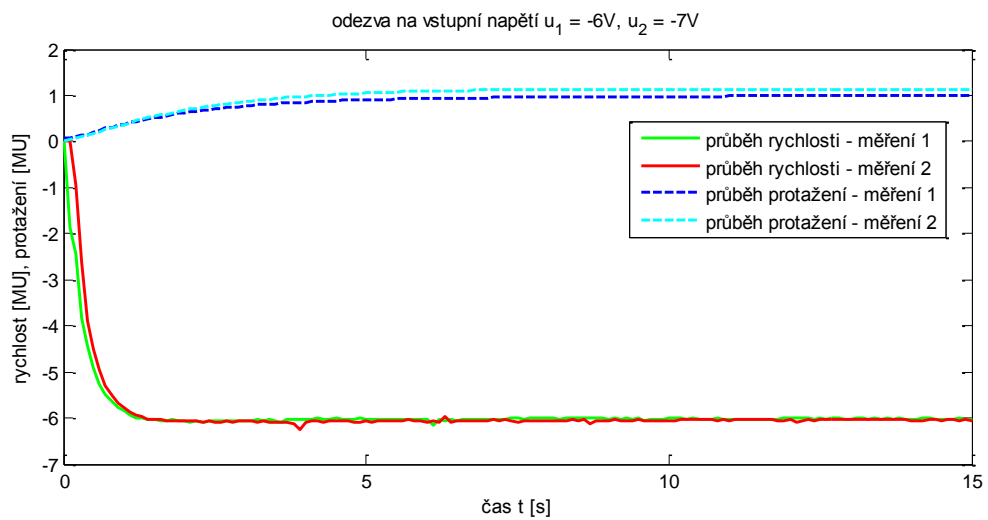


Graf 11 – Ukázka filtrace signálu pomocí použitého filtru

Všechny následující přechodové charakteristiky budou odezvy na skokové napětí z 0V na uvedenou hodnotu v grafu. Následující dva grafy ukazují průběh výstupních veličin, při nastavení stejného směru otáčení servomotorů.

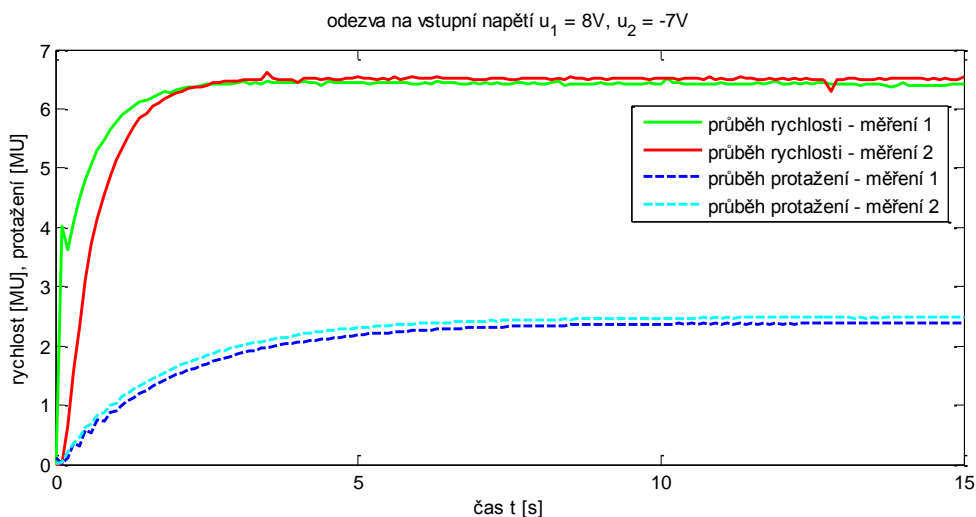


Graf 12 – Přechodové charakteristiky při kladném napětí

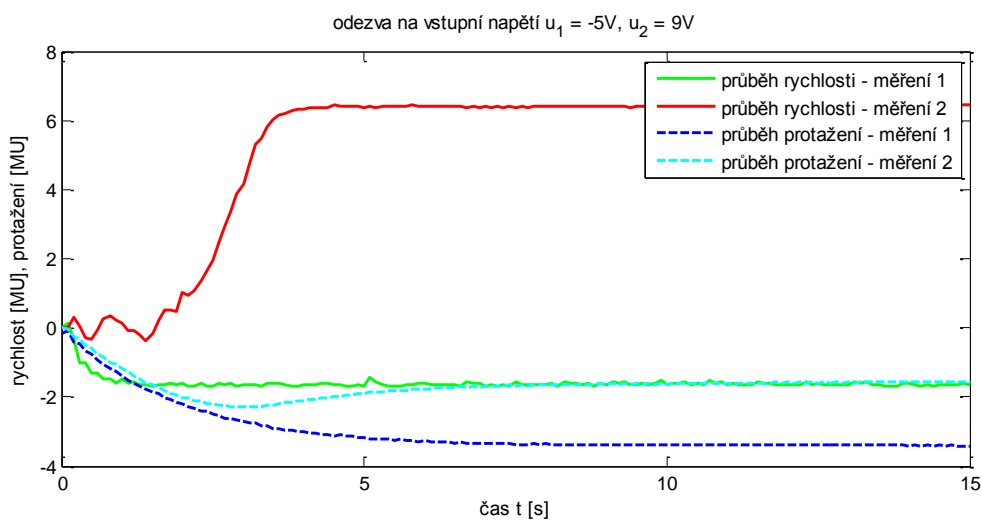


Graf 13 – Přechodové charakteristiky při záporném napětí

V dalších grafech vstupovalo do servopohonů kombinace napětí s opačnou polaritou. Při porovnání dvou měření není dynamický průběh úplně shodný. V Grafu 15 se dokonce při druhém měření kladka otáčela opačným směrem.



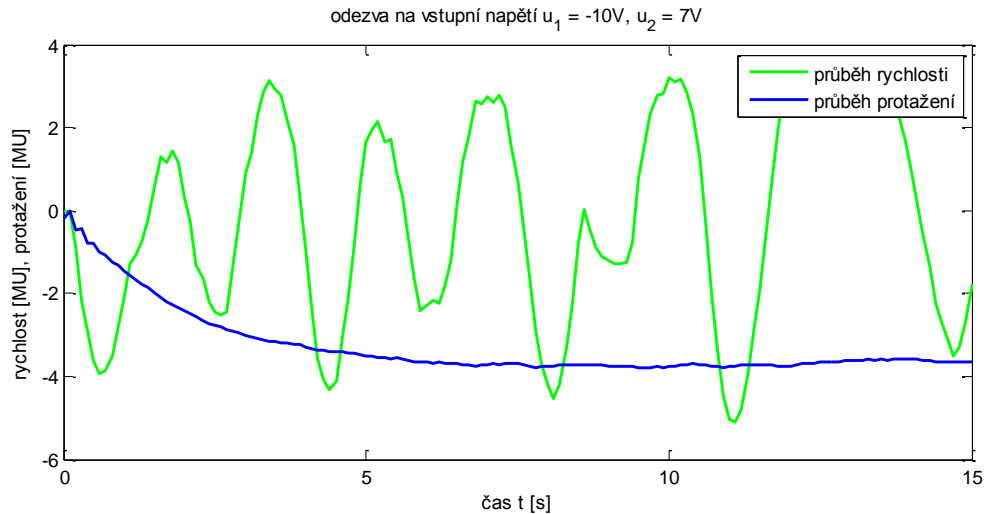
Graf 14 – Přechodové charakteristiky při rozdílném směru otáčení motorů



Graf 15 – Přechodové charakteristiky při rozdílném směru otáčení motorů

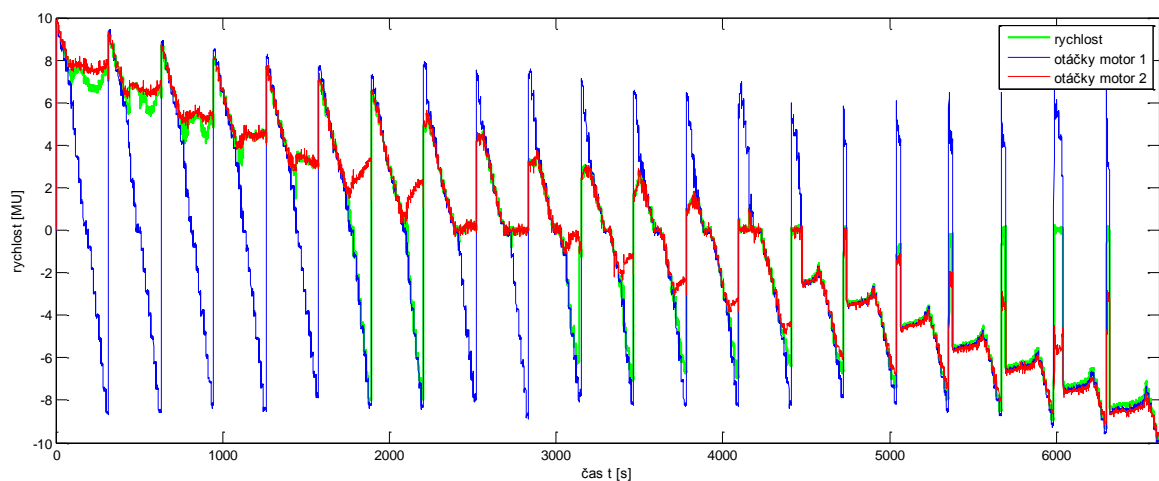
Z předešlých grafů vyplývá, že se rychlost kladky ustálí během 2 sekund. Protažení se ustaluje pomaleji v rozmezí 5 – 10 sekund. Pokud by mělo být vystiženo chování systému v lineární oblasti simulačním modelem, postačila by identifikace proporcionalním systémem prvního maximálně druhého řádu.

Při vykreslování přechodových charakteristik byly nalezeny určité kombinace napětí, při kterých se reálná soustava chovala zcela náhodně a nelineárně (viz Graf 16).



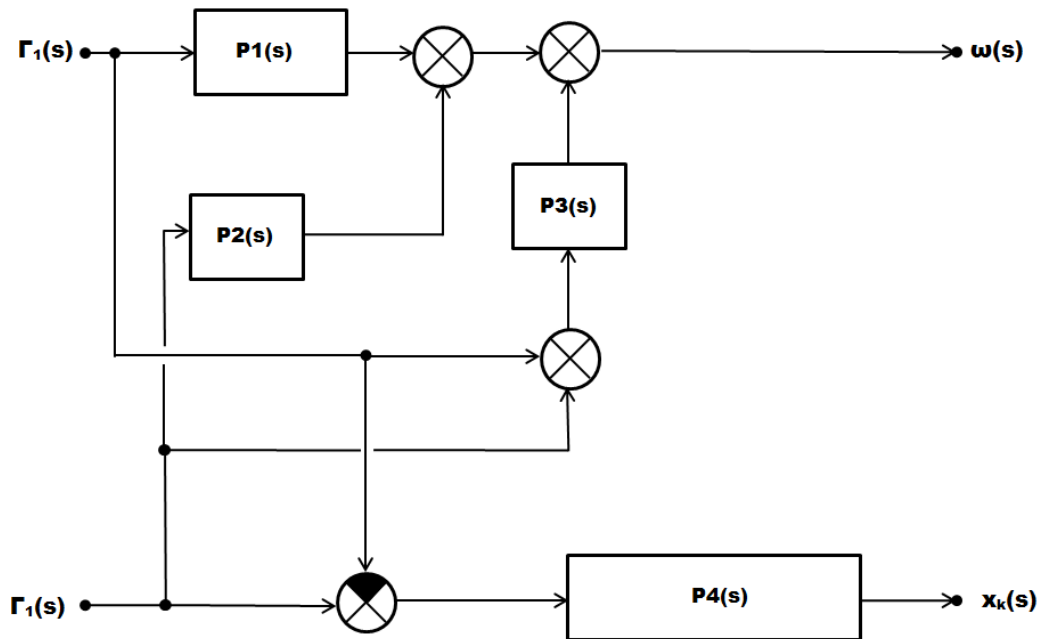
Graf 16 – Ukázka nelineárního chování reálného modelu

Při této situaci se třetí kladka otáčela nejprve stejným směrem jako motor 1 a poté se otáčela opačným směrem podle směru otáčení motoru 2.



Graf 17 – Zobrazení chování rychlosti spolu s rychlostmi obou motorů

Zobrazený Graf 17 byl získán nepřetržitým měřením pomocí schématu vytvořeného v Simulink s využitím bloků Repeating Sequence Stair (motory běžely po celou dobu měření bez zastavení). Před přechodem na další kombinaci napětí do motorů vstupovala předešlá nastavená hodnota. Otáčky třetí kladky se ve většině případů otáčí stejným směrem jako motor 2. Situace kdy se rychlost pásu netočí podle ani jednoho z motorů nastává pouze výjimečně. Pás prokluzuje pouze u jedné z kladek motorů a podle druhé z kladek se otáčí. Prokluz mezi oběma motory zaráz tedy vzniká pouze ojediněle.



Obr. 27 – Upravené schéma modelu pro použití v Simulink

7.2 Roznásobení jednotlivých přenosů

Přenosy musely být roznásobeny pro další použití na základní tvar, kdy se jednotlivé proměnné vyskytují u jednotlivých mocnin komplexní proměnné s . Konečný tvar jednotlivých přenosů vyjadřují rovnice 23 – 26. Celkový výpočet byl proveden pomocí programu MuPAD, který je obsažen v Matlab. Vzhledem k velikosti je zlomek v rovnici 25 a 26 rozdělen na dvě části, kde druhá část zlomku pokračuje na druhém řádku. Konečné tvary jednotlivých přenosů jsou následující:

$$P1(s) = \frac{1}{Is + b} \quad (23)$$

$$P2(s) = \frac{3r^2k}{2I^2s^3 + 4Ibs^2 + (6Ikr^2 + b^2)s + 6r^2bk} \quad (24)$$

$$P3(s) = \frac{m_i s^2 + b_i s + k_i}{2Im_i s^4 + (2Ib_i + 2bm_i)s^3 + (6km_i r^2 - 4Ik_i \cos(\alpha)^2 + 2Ik_i + 2bb_i)s^2 \dots} \quad (25)$$

$$P4(s) = \frac{rk \cos(\alpha)}{Im_i s^4 + (Ib_i + bm_i)s^3 + (3km_i r^2 - 2Ik \cos(\alpha)^2 + Ik_i + bb_i)s^2 \dots} \quad (26)$$

$$+ (3b_i kr^2 - 2bk \cos(\alpha)^2 + bk_i)s - 6r^2 k^2 \cos(\alpha)^2 + 3r^2 kk_i$$

7.3 Určení neznámých parametrů

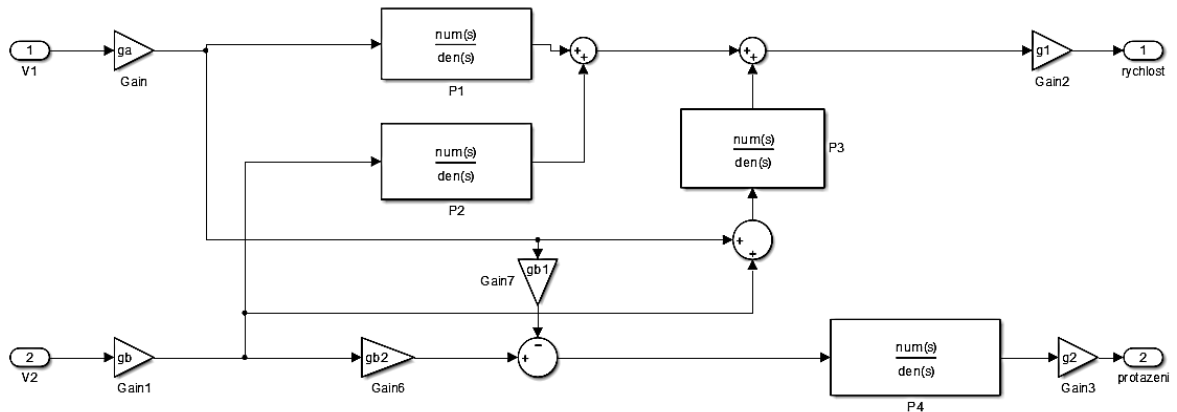
V rámci této kapitoly budou uvedeny parametry soustavy spřažených servopohonů. Jak vyplývá z kapitoly 4.3, která se zabývá shrnutím celé matematické analýzy, je v soustavě velké množství parametrů, jejichž hodnota je neznámá. Jedná se celkem o 12 parametrů. Parametry byly převzaty z literatury [16], kromě vstupních a výstupních převodních konstant, pomocí kterých se kalibrovaly statické charakteristiky. Parametry spolu s hodnotami jsou následující:

- $r = 0.03m$ - poloměr kladek, v literatuře [9] označován jako Γ
- $k_t = 200Nm^{-1}$ - tuhost pružiny, na které je zavěšené rameno
- $\alpha = 30^\circ$ - odklon pásu od vertikály
- $k = 50Nm^{-1}$ - tuhost pásu
- $b_t = 0,5Ns^{-1}$ - koeficient tření na zavěšeném rameni
- $b = 9 \cdot 10^{-2} Nms^{-1}$ - koeficient rotační frikce (tření) motorů 1 a 2
- $I = 8 \cdot 10^{-4} kgm^2$ - moment setrvačnosti motorů 1 a 2
- $m_t = 035kg$ - hmotnost pohyblivého ramene se zavěšenou kladkou
- $ga = 0,7$ - převodní konstanta vstupního napětí u_1
- $gb = 1,3$ - převodní konstanta vstupního napětí u_2
- $gb_1 = -1,5$ - pomocná převodní konstanta vstupního napětí u_1 pro protažení
- $gb_2 = -0,7$ - pomocná převodní konstanta vstupního napětí u_2 pro protažení
- $g_1 = 0,0361$ - výstupní převodní konstanta pro rychlost
- $g_2 = 6,9357$ - výstupní převodní konstanta pro protažení

Správnost parametrů jako je např. poloměr kladek r a odklon pásu od vertikály α byly ověřeny na reálném modelu. Ostatní parametry byly brány jako správné, získání některých parametrů by bylo velmi obtížné a zdlouhavé. Prokluz pásu je do modelu zahrnut pomocí převodních konstantám ga a gb . Díky tomu jsou otáčky třetí kladky více závislé na motoru 2, do kterého vstupuje vyšší napětí. Pás na motoru 1 tedy více prokluzuje (výstupní rychlost je na tomto motoru méně závislá) jak lze vidět i při reálném měření statických charakteristik rychlosti.

7.4 Vytvoření modelu v Simulink

Pomocí bloků Transfer Function bylo vytvořeno celkové zapojení modelu. Jednotlivé parametry modelu spolu s přechodovými funkcemi byly napsány do skriptu *roznasobeni.m*, který je potřeba spustit před použitím vytvořeného schématu.



Obr. 28 – Schéma matematického modelu vytvořené v Simulink

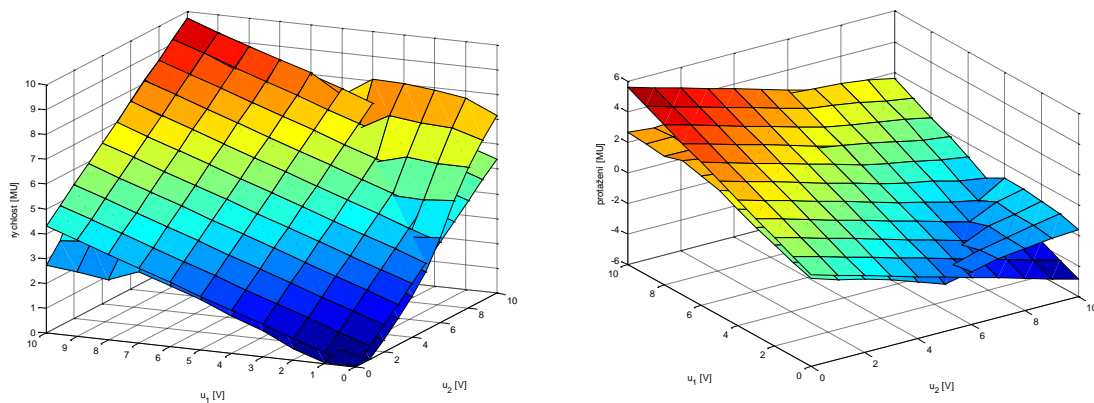
Po vytvoření modelu byla nutná kalibrace převodních konstant. Výstupem 3D statické charakteristiky byla rovná plocha, která obsahovala vysoké funkční hodnoty. Vytvořený model šel použít pouze pro určité části pracovní oblasti, kdy se model choval lineárně.

7.5 Srovnání vytvořeného matematického modelu s reálným modelem

Model bude srovnán pouze v pracovní oblasti, ve které se chová lineárně. Obě vstupní napětí budou pouze kladná, nebo pouze záporná

7.5.1 Srovnání matematického modelu s reálným systémem při kladném napětí

Bylo využito stejného skriptu a schématu, jako při měření statických charakteristik, s tím rozdílem, že se reálný model ve schématu vyměnil za simulační.



Graf 18 – Porovnání statických charakteristik simulačního a reálného modelu při kladném vstupním napětí

Získané přesnosti se dosáhlo experimentálním nastavováním převodních konstant. Pomocí těchto konstant byla plocha nakláněna, dokud se výsledek nepodobal reálnému měření. Čím více se hodnoty vstupních napětí od sebe liší, tím větší vzniká odchylka mezi reálným a simulačním modelem.

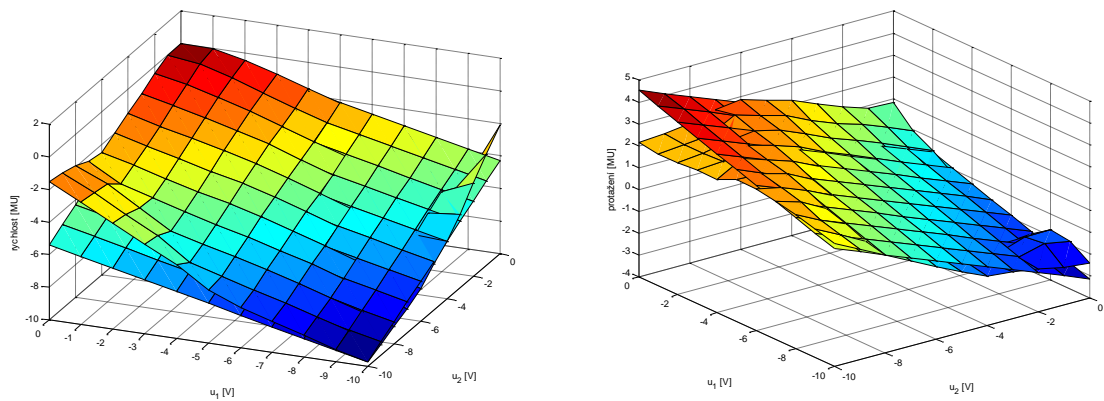
7.5.2 Srovnání matematického modelu s reálným systémem při záporném napětí

Při nastavení záporného napětí bylo zjištěno, že dochází k větším odchylkám, proto se některé převodní konstanty opravily, aby byl model přesnější. Konkrétně byly upraveny hodnoty převodních konstant, které měly vliv na hodnotu protažení. Porovnání statických vlastností reálného a simulačního modelu pro záporné napětí je v Grafu 19.

Upravené hodnoty byly označeny následovně:

- $gb_{1z} = -4,4272$ - pomocná převodní konstanta vstupního napětí u_1 pro protažení při záporném vstupním napětí
- $gb_{2z} = -3,4495$ - pomocná převodní konstanta vstupního napětí u_2 pro protažení při záporném vstupním napětí
- $g_{2z} = 1.3135$ - výstupní převodní konstanta pro protažení při záporném napětí

Ostatní převodní konstanty zůstaly nezměněny. Výše uvedené konstanty jsou modifikací konstant gb_1 , gb_2 a g_2 .



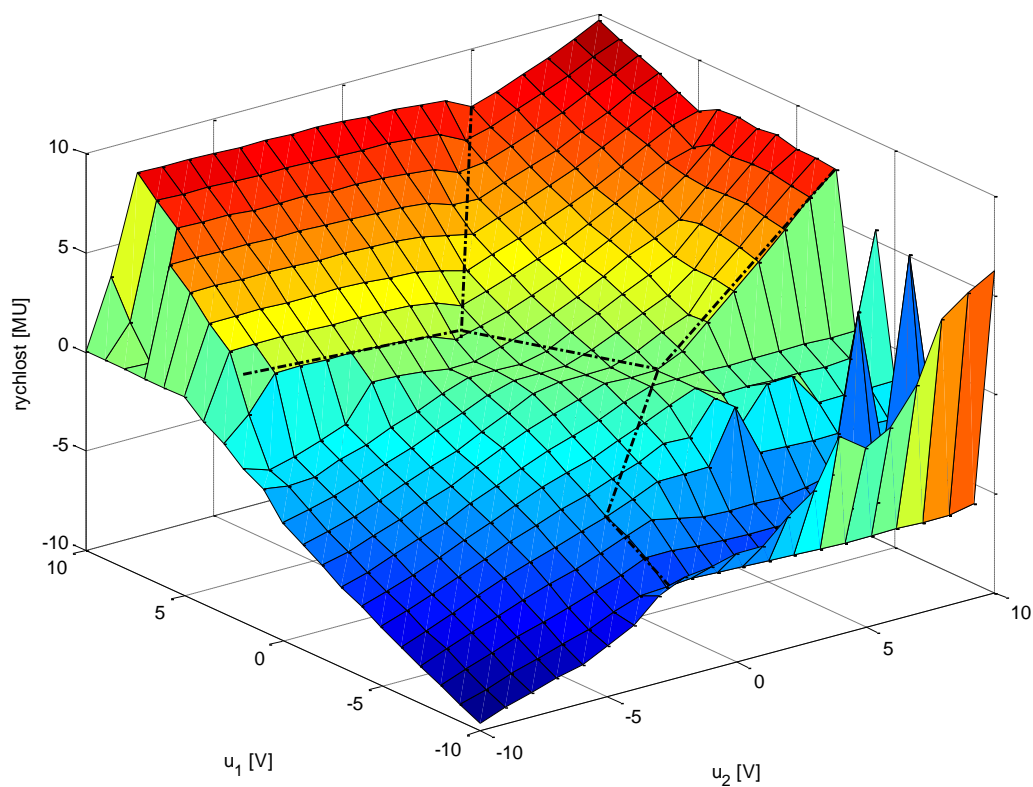
Graf 19 – Porovnání statických charakteristik simulačního a reálného modelu při záporném vstupním napětí

7.6 Vytvoření celkového modelu

Při vytváření celkového modelu se zjistilo, že bude potřeba použít více submodelů, a ty poté za určitých podmínek spouštět. Aby se model choval podle naměřených charakteristik, bylo nutné přidat k modelu, vytvořeného pomocí manuálu další modely, které byly získány experimentální identifikací. Celkový model je tvořen množinou submodelů, z nichž každý je použit pro určitou pracovní oblast.

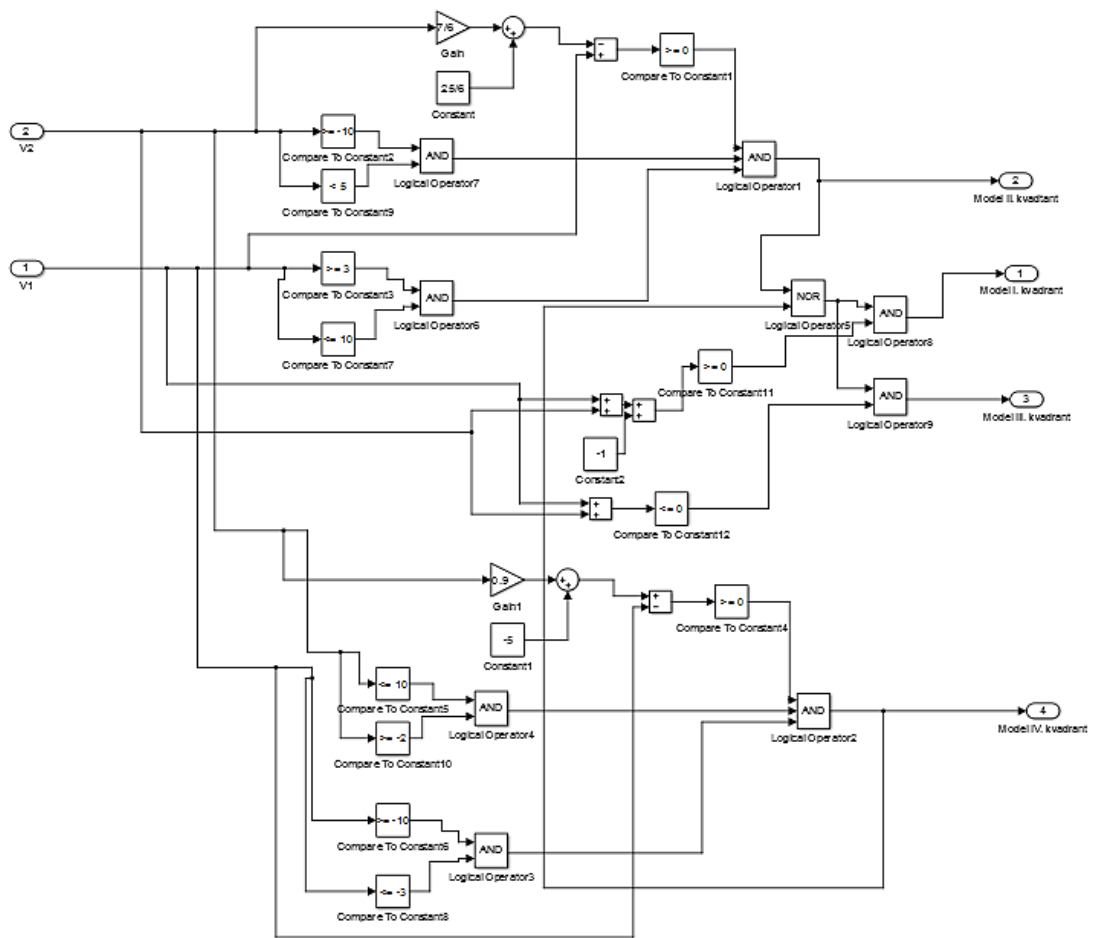
7.6.1 Rozdělení oblasti modelů

Modely byly rozděleny do určitých oblastí ohraničených přímkami. Velikost ploch byla stanovena pomocí naměřené statické charakteristiky rychlosti. Rozdělení ploch reprezentují čerchované černé čáry v následujícím grafu.



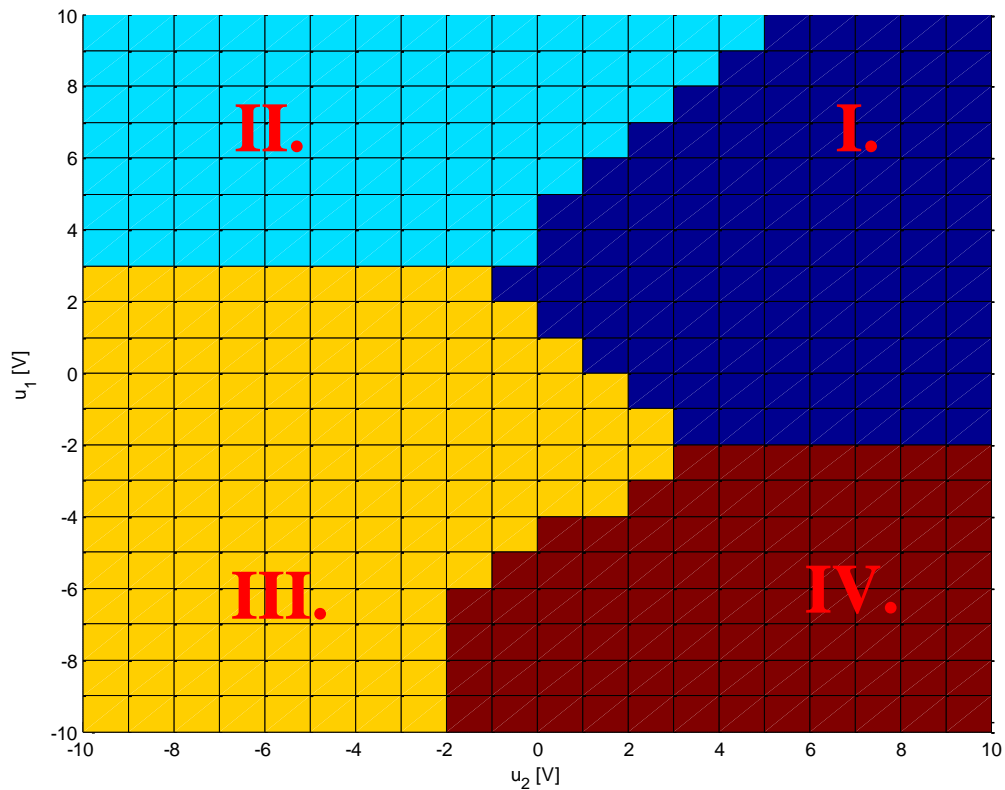
Graf 20 – Rozdělení jednotlivých oblastí modelu

Model je rozdělen celkem na 4 oblasti. Bylo potřeba vytvořit logické schéma, které bude za určité kombinace napětí (v závislosti ve které oblasti se nachází) spínat určitý model.



Obr. 29 – Vytvořené logické schéma v Simulink pro přepínání modelů

Pomocí logických funkcí a porovnávacích členů bylo vytvořeno schéma, které pomocí log. 1 sepne správný model. Tvar oblastí byl vytvořen na základě měření. Lze jej vidět na Grafu 21. Některé hranice mezi plochami jsou ohraničeny pomocí úseček. Nejprve byly spočítány rovnice přímek pomocí bodů, které daným přímkám náležely. Následně byly implementovány do logického schématu, kde se zjišťovalo, zda leží bod pod, nebo nad přímkou. Poté byly přímky ohraničeny nerovnostmi, aby vytvořily dané úsečky.



Graf 21 – Výstup logické funkce rozdělení plochy na jednotlivé oblasti

Do oblastí byly použity následující modely:

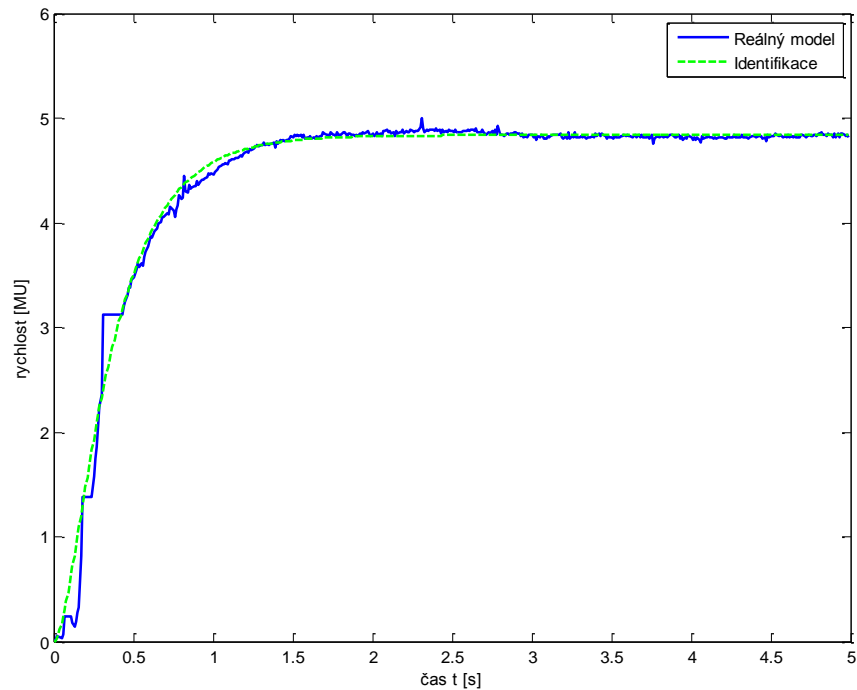
- I. oblast – model vytvořený pomocí manuálu pro kladné napětí
- II. oblast – model získaný experimentální identifikací
- III. oblast – model vytvořený pomocí manuálu pro záporné napětí
- IV. oblast – model získaný experimentální identifikací

Pro vytvoření celkového modelu zbývalo udělat experimentální identifikaci ve dvou oblastech.

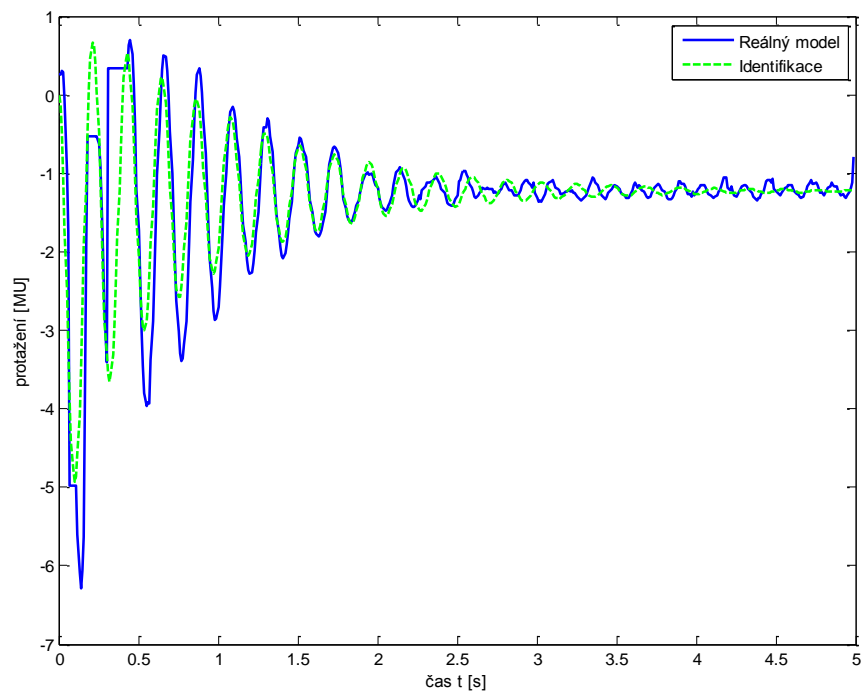
7.6.2 Vytvoření modelů pomocí experimentální identifikace

Ve druhé a čtvrté oblasti byly vybrány různé kombinace napětí a bylo provedeno měření přechodových charakteristik. Z těchto charakteristik byla vybrána jedna charakteristika pro každou oblast. Experimentální identifikaci zajišťovala funkce *fminsearch*, která hledala minimum na účelové funkci, která byla zvolena jako kvadratická

funkce odchylky mezi reálným a identifikovaným modelem. Ve skriptu vytvořeném pro identifikaci jde nastavit požadovaný tvar hledaného procesu.

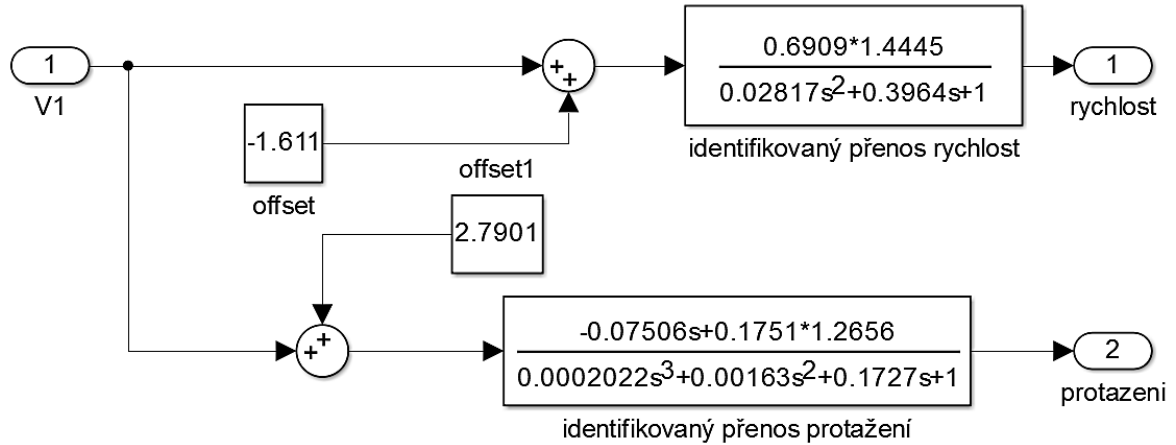


Graf 22 – Ukázka identifikace rychlosti pro model ve II. oblasti



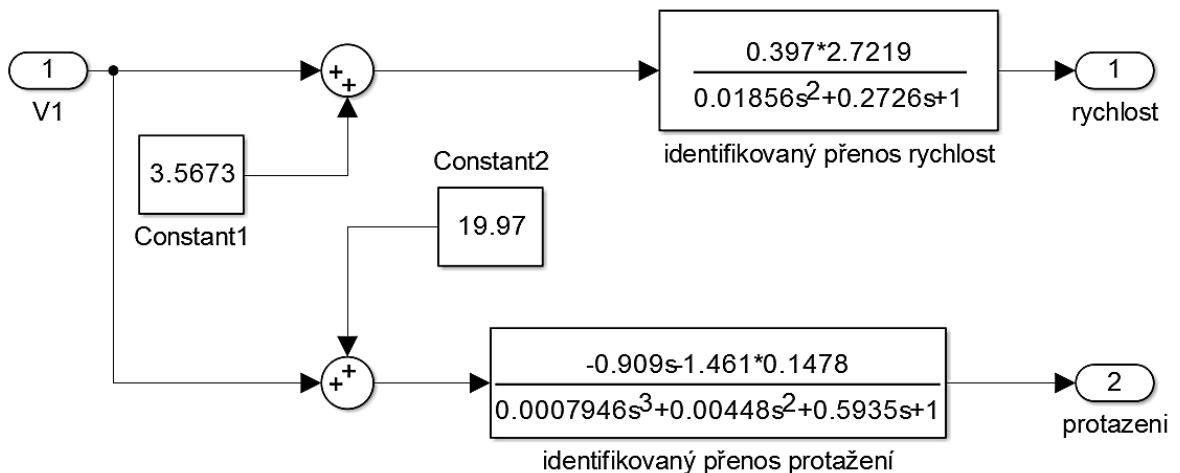
Graf 23 – Ukázka identifikace protažení pro model ve II. oblasti

V obou oblastech byla rychlost identifikována pomocí systému druhého řádu a protažení pomocí systému třetího řádu. Zesílení získaných přenosů bylo upraveno tak, aby bylo rovno směrnici přímký ve statické charakteristice.



Obr. 30 – Schéma vytvořeného modelu pro II. oblast

Identifikované systémy jsou závislé pouze na napětí u_1 . Stejně tak se chová reálný model jako je vidět na jeho statických charakteristikách (Graf 9). Do vstupního napětí je přičtena hodnota, která vyjadřuje offset přímký. Přímký jsou rovnoběžné s plochou statické charakteristiky v příslušné oblasti.

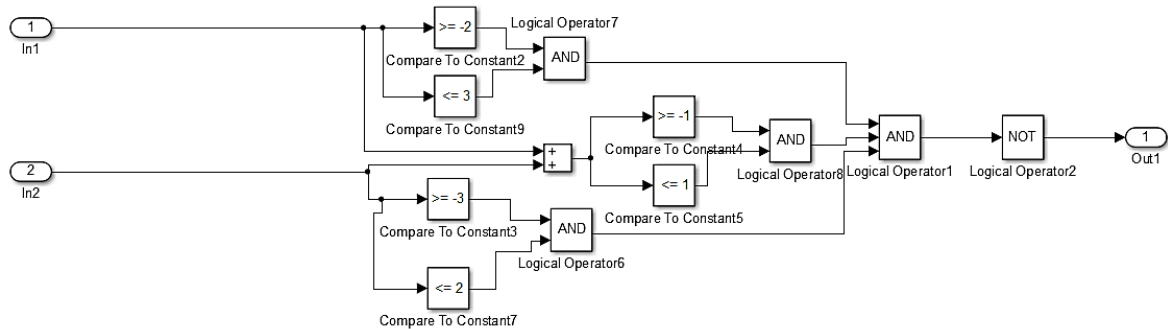


Obr. 31 – Schéma vytvořeného modelu pro IV. oblast

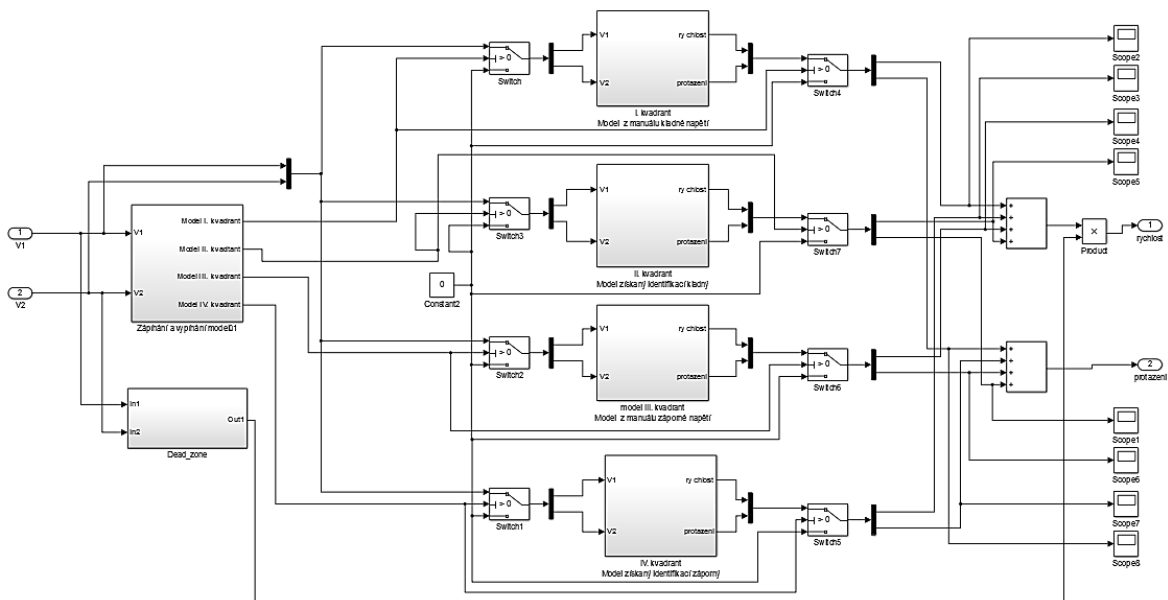
7.6.3 Celkový model reálné soustavy spřažených servopohonů

Ze všech 4 modelů byly vytvořeny submodely, které byly použity v celkovém zapojení. Do modelu byl také implementován submodel „Dead zone“. Uvnitř tohoto bloku je logická funkce, která při určité kombinaci nízkého napětí nuluje výstupní rychlost

celkového modelu. Tento jev byl vypořizován na reálném soustavě spřažených servomotorů, a byl implementován do celkového simulačního modelu.



Obr. 32 – Schéma vnitřní struktury bloku *Dead_zone*

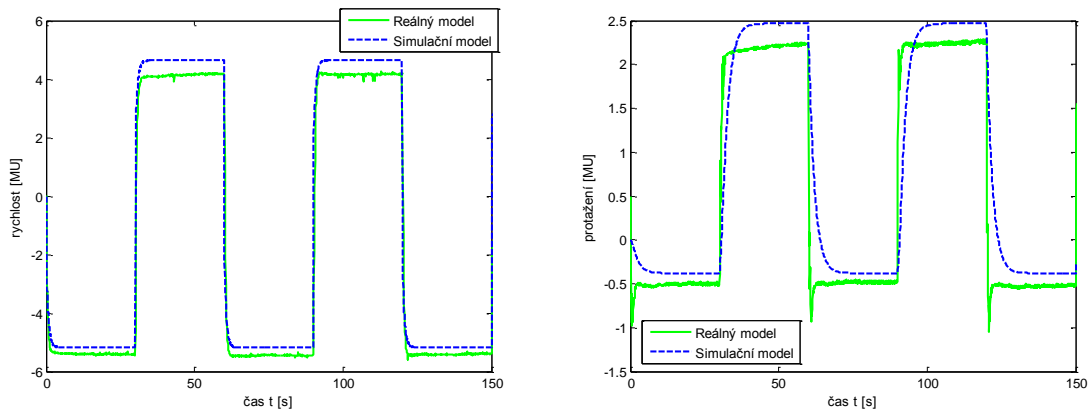


Obr. 33 – Schéma zapojení celkového modelu

Na začátku modelu vstupuje vstupní napětí. Poté se pomocí vytvořené logické funkce sepne správný model. Celkem byly vytvořeny 4 modely, které se spínají za určitých podmínek pomocí bloku Switch (přepínač) v Simulink. Spínání modelu bylo rozděleno tedy na 4 oblasti. Výstup správného modelu se spíná za určité kombinace vstupních napětí u_1 a u_2 . Model byl kalibrován podle jednoho z vybraných měření (referenční statická charakteristika). Přechody mezi modely zajišťují switche, které jsou ovládány pomocí vytvořené logické funkce. Je zajištěno, aby nedocházelo ke spínání více modelů zároveň.

Ukázka přepínání mezi modely je uvedena v následujícím grafu. Přepínání mohlo být realizováno i jiným způsobem, například využitím bloku Enabled Subsystem, který modely spouští podobným způsobem. Také mohl být na výstup použit filtr, který by

eliminovat špičky, které mohou vznikat při přepínání. Realizované přepínání mezi modely je bráno jako dostačující.

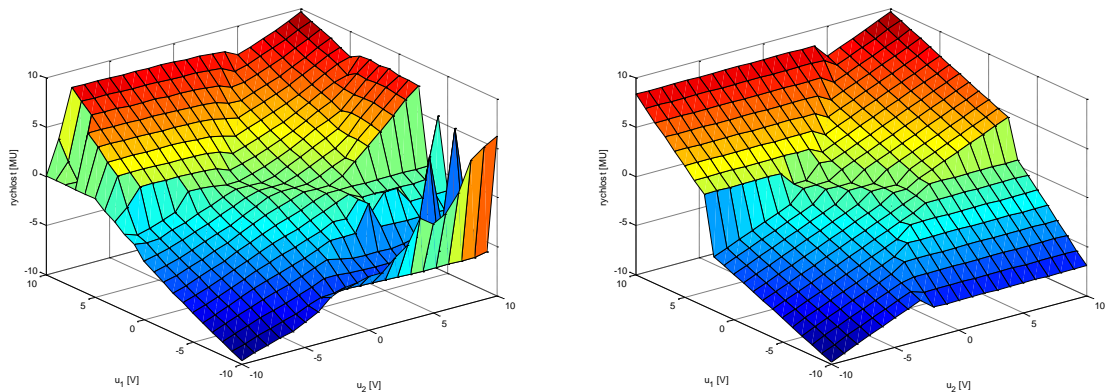


Graf 24 – Ukázka simulačního modelu a reálného systému při přechodu mezi oblastmi.

Při kladné rychlosti byl aktivní submodel pro I. oblast. V čase 30 sekund se na základě vstupu přepnul celkový model na submodel pro III. oblast (viz Graf 24). Výstupní hodnota protažení se u simulačního a reálného modelu v tomto případě liší jak dynamickým náběhem, tak i trvalou odchylkou vzniklou při ustálení obou modelů. Dynamický náběh je způsoben nevhodným řešením přepínání mezi modely. Pokud by si modely navzájem předávali informace o stavech, přechody mezi modely by se stali věrohodnější vůči reálnému modelu. Při řešení tohoto problému nebyly v Simulinku nalezeny potřebné bloky, které by tuto vlastnost zajišťovali.

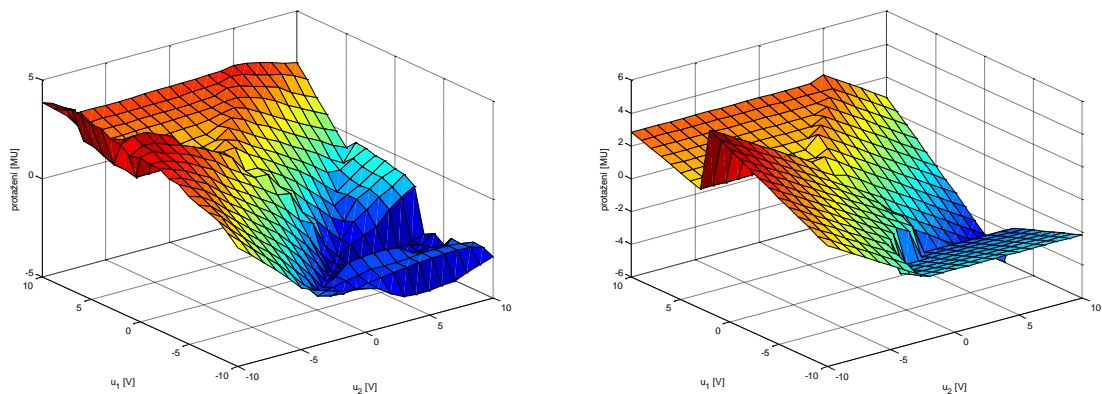
7.6.4 Porovnání statických vlastností celkového simulačního modelu s reálným modelem

V následujících grafech bude porovnána statická charakteristika reálného modelu umístěná vlevo a vytvořeného nelineárního simulačního modelu umístěná vpravo.



Graf 25 – Porovnání statických charakteristik rychlosti reálného (vlevo) a simulačního modelu (vpravo)

Podobnost statických vlastností byla zajištěna pomocí kalibrace vstupních a výstupních konstant. U modelů použitých v druhé a čtvrté oblasti se upravilo zesílení přenosu a vstupní napětí do takové podoby, aby plocha svírala stejný úhel jako plocha naměřená u reálného modelu. K získání stejného úhlu posloužily dva body statické charakteristiky, ze kterých se vypočítala rovnice přímky.



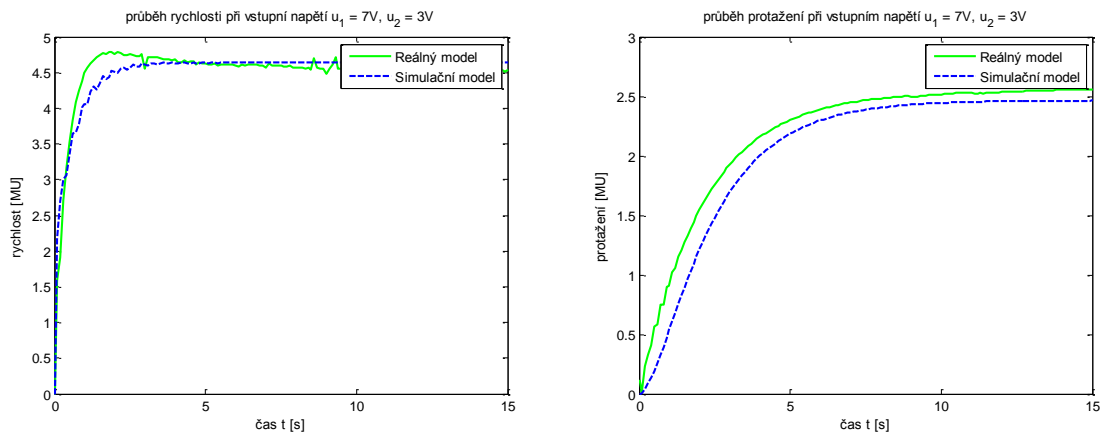
Graf 26 – Porovnání statických charakteristik protažení reálného (vlevo) a simulačního modelu (vpravo)

U protažení vznikají v některých místech větší odchylky. Například ve čtvrté oblasti je výstup statické charakteristiky simulačního modelu plocha. Reálný model v této oblasti vykazuje vysokou nelinearitu. Vytvořit přesný nelineární model, který vykazuje takovéto chování, by bylo opravdu složité. Protože je na model aplikováno ve většině případů lineární řízení, nebyla těmto odchýlkám a této oblasti věnována větší pozornost.

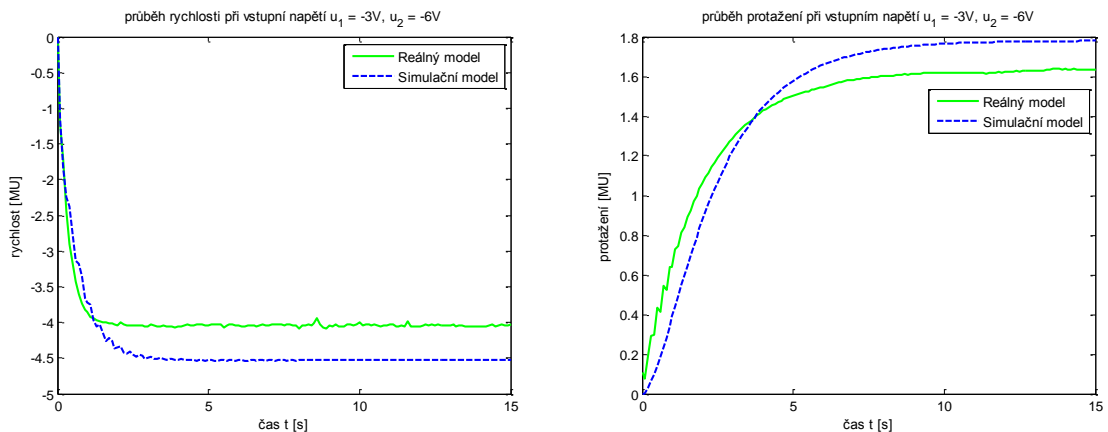
Celkový simulační model aproximuje reálný nelineární model množinou lineárních modelů pro určité oblasti stavového prostoru. Díky použití více modelů, které byly získány rozdílným způsobem je vytvořený model věrohodnější, než v případě kdyby nelineární reálný systém popisoval pouze jeden submodel.

7.6.5 Porovnání dynamických vlastností celkového simulačního modelu s reálným modelem

Existuje mnoho kombinací vstupů, ve kterých je možné porovnat dynamické charakteristiky simulačního modelu a reálné soustavy CE108. K této práci je přiložen skript `vykresleni_vsech_prechodovych_char.m`, vytvořený v Matlab, který vykreslí přechodové charakteristiky při všech kombinacích vstupního napětí.



Graf 27 – Srovnání přechodových charakteristik simulačního a reálného modelu při kladném napětí



Graf 28 – Srovnání přechodových charakteristik simulačního a reálného modelu při záporném napětí

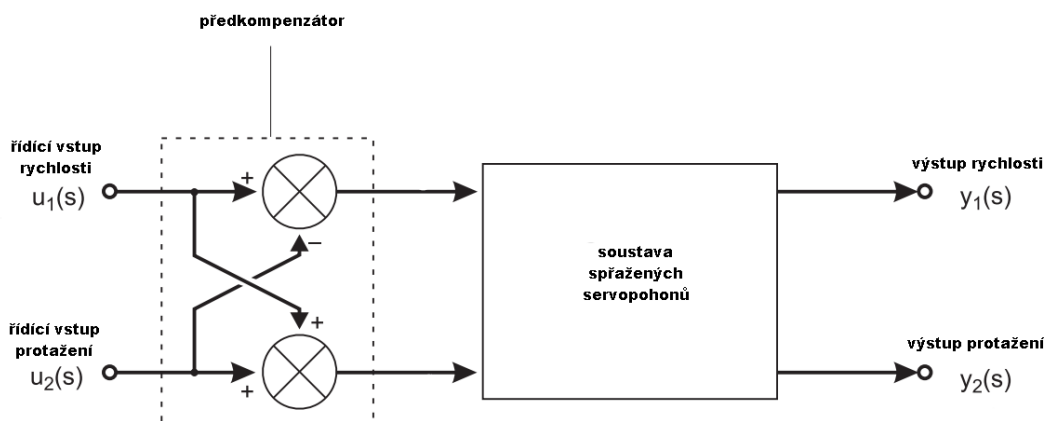
Dynamické vlastnosti se reálnému modelu podobají, existují ale stovky kombinací vstupních napětí, ve kterých se simulační model podobá reálnému modelu více, či méně. Proto se parametry modelu jako je např. tuhost pružiny, nebo moment setrvačnosti motoru nijak neupravovaly, při jejich změně se v některých oblastech choval simulační model podobněji, ale v některých místech docházelo k velkým rozdílům.

Statické i dynamické chování vytvořeného simulačního modelu se nejvíce podobá v oblastech I. a III. Největší podobnost je přibližně uprostřed těchto oblastí. Statické vlastnosti submodelů pro oblast II. a IV. jsou díky získané rovnici přímky ve velké části případů také velmi podobné. Reálný model se v těch oblastech chová značně nelineárně, proto se dynamické chování těchto modelů při některých kombinacích vstupů značně odlišuje.

8 NÁVRH A VERIFIKACE ŘIDÍCÍCH ALGORITMŮ

V rámci této kapitoly budou navrženy dva typy regulátorů a to PID regulátor s parametry získanými pomocí PID Tune a regulátor získaný polynomiální metodou umístění pólů ve 2DOF konfiguraci. Velká část této práce se zabývá zkoumáním chování reálného a simulačního modelu. V této práci je regulace použita hlavně k posouzení věrohodnosti vytvořeného simulačního modelu vůči chování reálné soustavy spřažených servopohonů. Proto zde nebyly použity moderní přístupy k řízení.

Při návrhu regulátorů nebude k modelu přistupováno jako k MIMO soustavě. Model se tedy nebude řídit jako celek. Pomocí napětí u_1s se bude ovládat rychlost otáčení třetí kladky a napětím u_2s se bude ovládat druhá výstupní veličina protažení. Protože výstupy jsou navzájem ovlivňovány a záleží na obou hodnotách vstupů, je tento způsob řízení nesnadný. Problémem jsou křížné vazby MIMO systému, které je třeba potlačit. Je nutné eliminovat efekt, kdy jednotlivý vstup ovlivňuje oba výstupy.

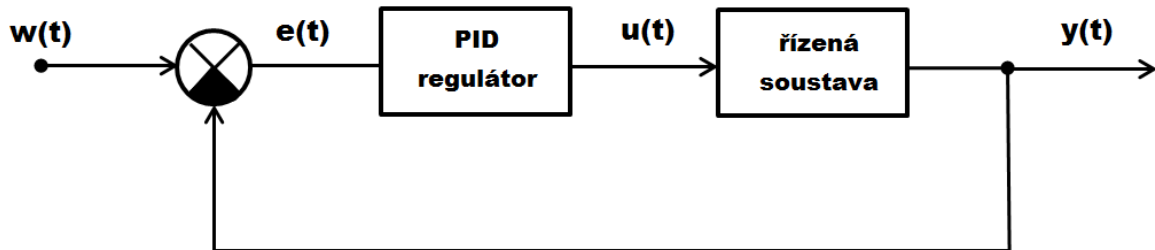


Obr. 34 – Schéma systému s předkompenzátorem

Předkompenzátor (viz Obr. 34) potlačuje křížné vazby mezi vstupy a výstupy systému. Pokud bude použito stejné napětí u_1 na oba motory, lze předpokládat, jestliže jsou oba motory stejné, že rychlost poroste, zatímco protažení bude nezměněné a analogická formulace platí i pro napětí u_2 . V anglické literatuře [9] se pro tento předkompenzátor používá pojem „decoupling“.

8.1 Zpětnovazební řízení s PID regulátorem

Struktura řízení bude připomínat dvě oddělené regulace dvou SISO systémů, s tím rozdílem, že výstupy modelu se budou navzájem ovlivňovat a budou si navzájem způsobovat chyby měření.



Obr. 35 – Schéma zpětnovazebního zapojení PID regulátoru

Základními požadavky kladenými na zpětnovazební regulační obvod 1DOF (viz Obr. 35) je stabilita regulačního obvodu, přesnost regulace, doba ustálení výstupní veličiny a překmit výstupní veličiny. Všechny tyto hodnoty lze určit z diferenciální rovnice popisující zpětnovazební obvod. Popis jednotlivých symbolů použitých ve schématu je následující:

- $w(t)$ vstupní žádaná veličina
- $e(t)$ regulační odchylka
- $u(t)$ akční veličina
- $y(t)$ výstupní veličina

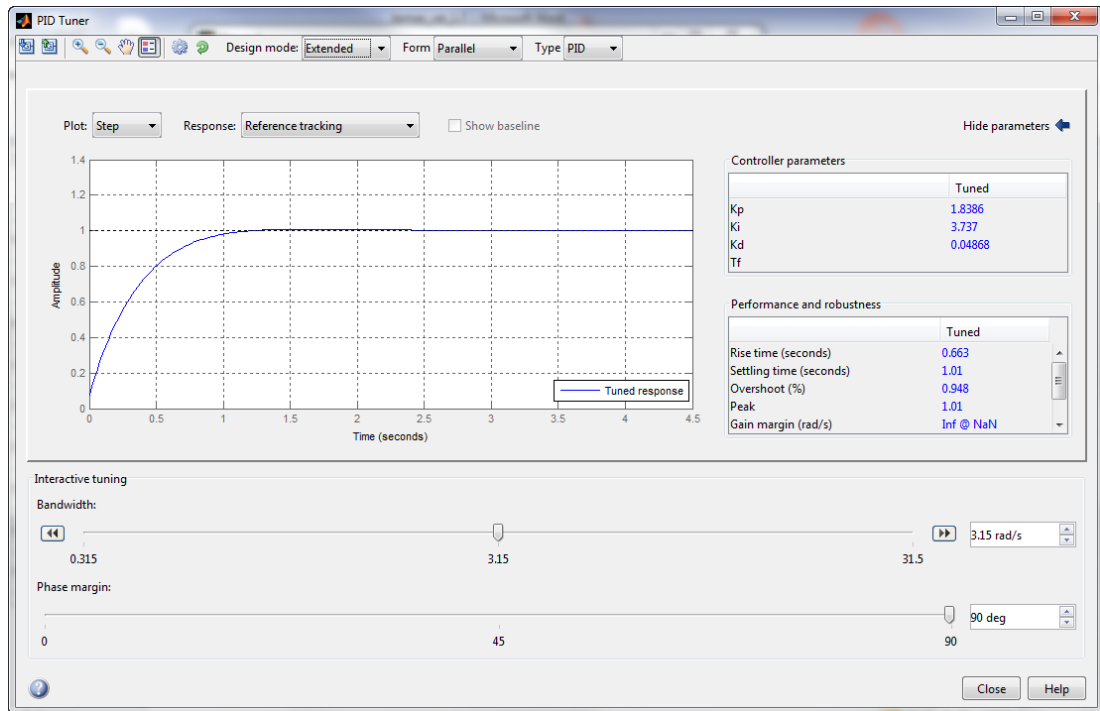
Přenos ideálního PID regulátoru je:

$$G_R(s) = P + \frac{I}{s} + Ds \quad (27)$$

kde P, I, D jsou nastavitelné parametry regulátoru.

Tyto složky budou získány pomocí grafického nástroje PID Tuner (viz Obr. 36), který je součástí Matlab [21]. Jde o nejjednodušší způsob jak nastavit PID regulátor zapojený v jednosmyčkovém regulačním obvodu. Při použití PID Tuneru stačí importovat identifikovanou soustavu. Poté se provede automatická linearizace a program navrhne hodnoty parametrů PID regulátoru. K výpočtu je používán algoritmus balancující výkonost a robustnost regulačního pochodu při zachování stability. Uživatel může výsledek dále ovlivnit pomocí nastavení dvou posuvníků. První posuvník určuje rychlost regulačního

pochodu. Druhý posuvník určuje kompromis mezi agresivitou a robustností přechodové odezvy.



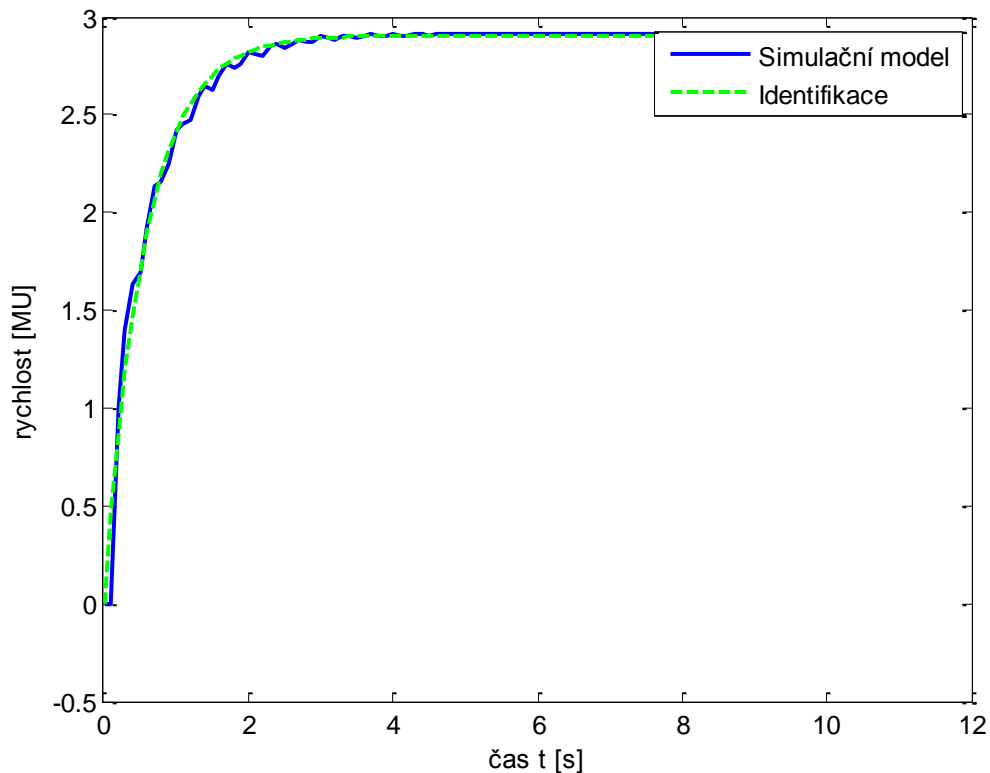
Obr. 36 – Ukázka nástroje PID Tuner

8.1.1 Výběr pracovního bodu a identifikace

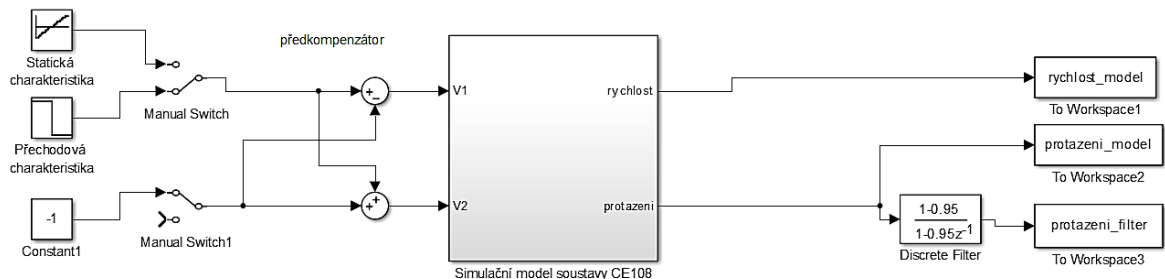
Nastavování regulátorů v Simulink je založeno na práci s modelem regulované soustavy. Model regulované soustavy bude získán na základě údajů, naměřených při identifikačním experimentu a bude použit při návrhu obou typů regulátorů. Při identifikaci byla opět použita funkce *fminsearch*, tak jako v případě získání modelů do druhé a čtvrté oblasti v celkovém simulačním modelu. Dané charakteristiky byly získány přivedením skokové změny na odpovídající vstup při ustáleném stavu systému. K identifikaci byl podle zadání použit vytvořený simulační model.

Při identifikaci rychlosti byl pro vstup u_1 použit jednotkový skok ze 4 na 7V. Napětí u_2 bylo nastaveno na -1V. Přechodová charakteristika rychlosti byla identifikována pomocí proporcionální soustavy prvního řádu. Po identifikaci má soustava tvar:

$$G(s)_{\text{rychlost}} = \frac{1,714}{s + 1,77} \quad (28)$$



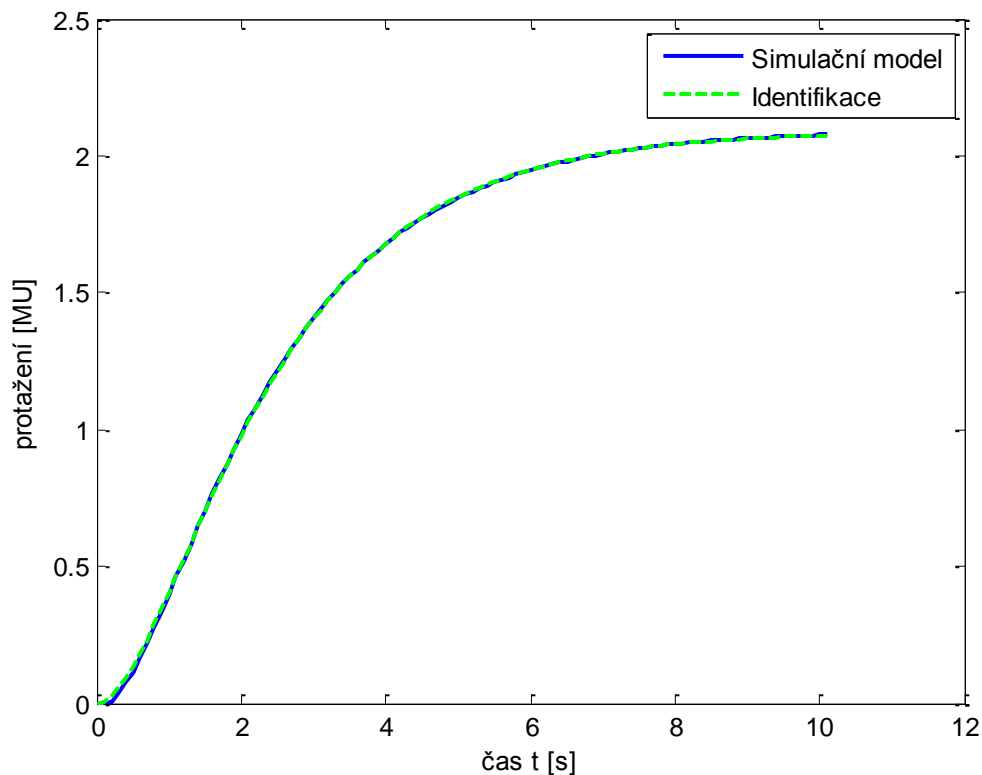
Graf 29 – Porovnání přechodových charakteristik rychlosti simulačního modelu a identifikovaného modelu pro návrh regulátoru



Obr. 37 – Simulinkové schéma pro identifikaci přenosu rychlosti

Při identifikaci protažení se postupovalo obdobným způsobem. Schéma vytvořené pro identifikaci protažení je podobné jako na Obr. 37, s opačným využitím vstupů modelu. Na vstup u_2 byl použit skok z 0 na $-2V$. Napětí u_1 bylo nastaveno na $5V$. Přechodová charakteristika rychlosti byla identifikována pomocí proporcionální soustavy druhého řádu. Po identifikaci má soustava tvar:

$$G(s)_{\text{protazeni}} = \frac{-0,7157}{s^2 + 1,807s + 0,6848} \quad (29)$$



Graf 30 – Porovnání přechodových charakteristik protažení simulačního modelu a identifikovaného modelu pro návrh regulátoru

8.1.2 Průběh regulace při zpětnovazebním řízení pomocí PID regulátoru

Parametry jednotlivých regulátorů získaných pomocí PID Tune jsou následující:

PI regulátor pro řízení rychlosti:

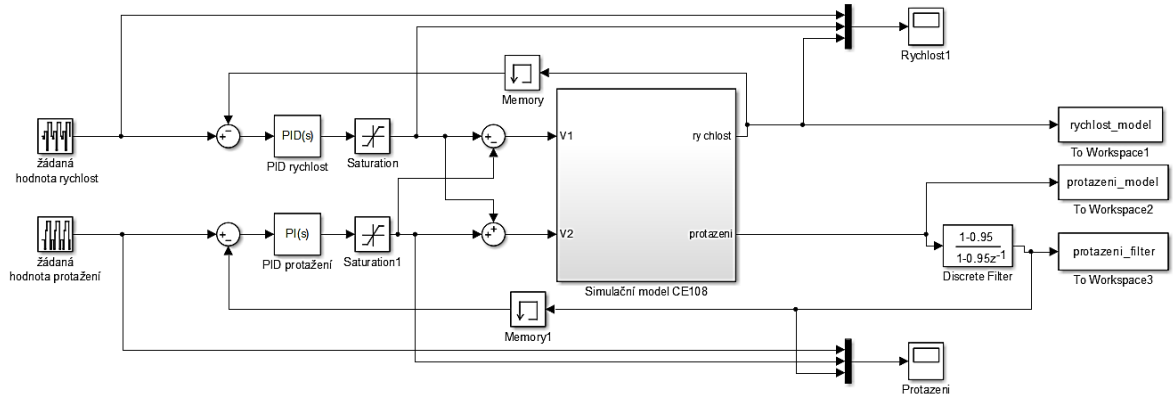
- proporcionální složka $P = 1,1601$
- integrační složka $I = 2,3768$

PI regulátor pro řízení protažení:

- proporcionální složka $P = -1,0967$
- integrační složka $I = -0,4322$

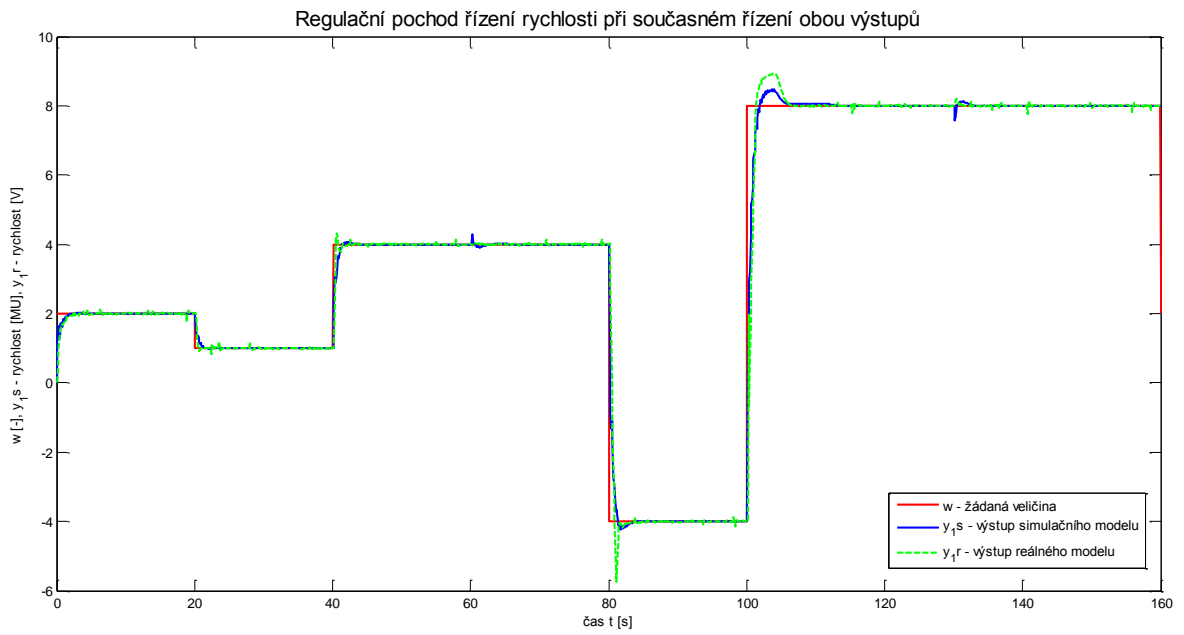
V obou případech byl použit pouze PI regulátor. Při nastavení derivační složky podle PID Tune se systém dostával do nestabilních stavů, jak při simulaci, tak při reálném měření. Výstupní veličiny se nejdříve řídily samostatně. Po odladění se provedlo současné řízení obou výstupních veličin. Simulinkové schéma je na Obr. 38. V rámci této práce je

uvedeno pouze současné řízení. Samostatné řízení jednotlivých veličin je uvedeno v elektronické příloze v podobě grafů vytvořených pomocí Matlab.

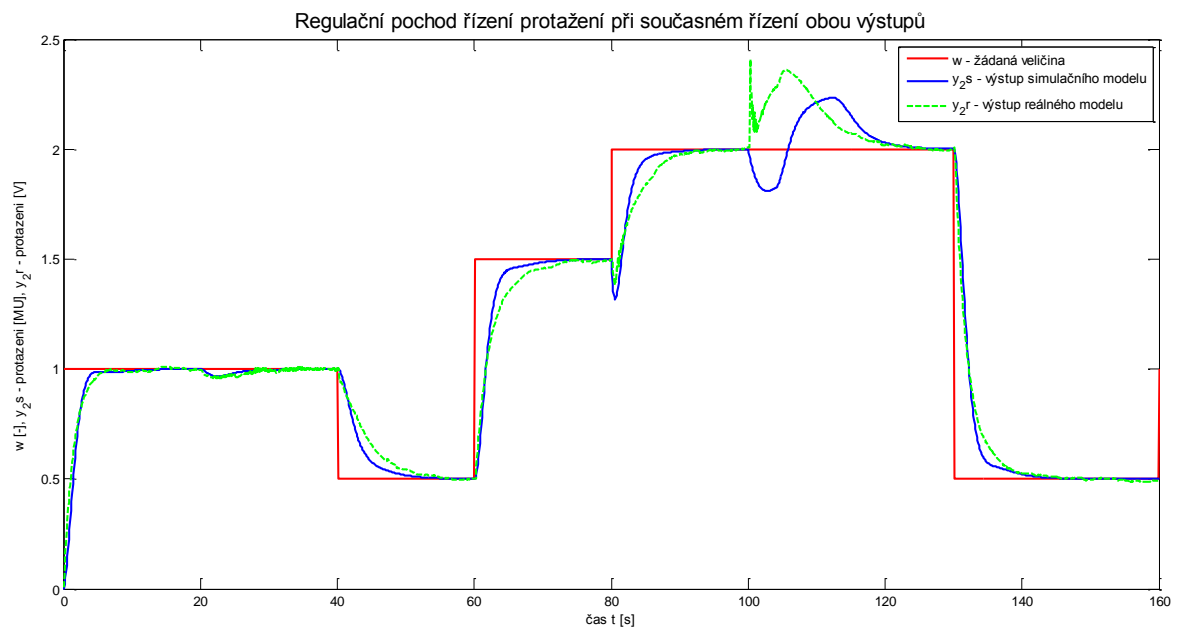


Obr. 38 – Simulinkové schéma pro současné řízení rychlosti a protažení simulačního modelu pomocí PID regulátoru

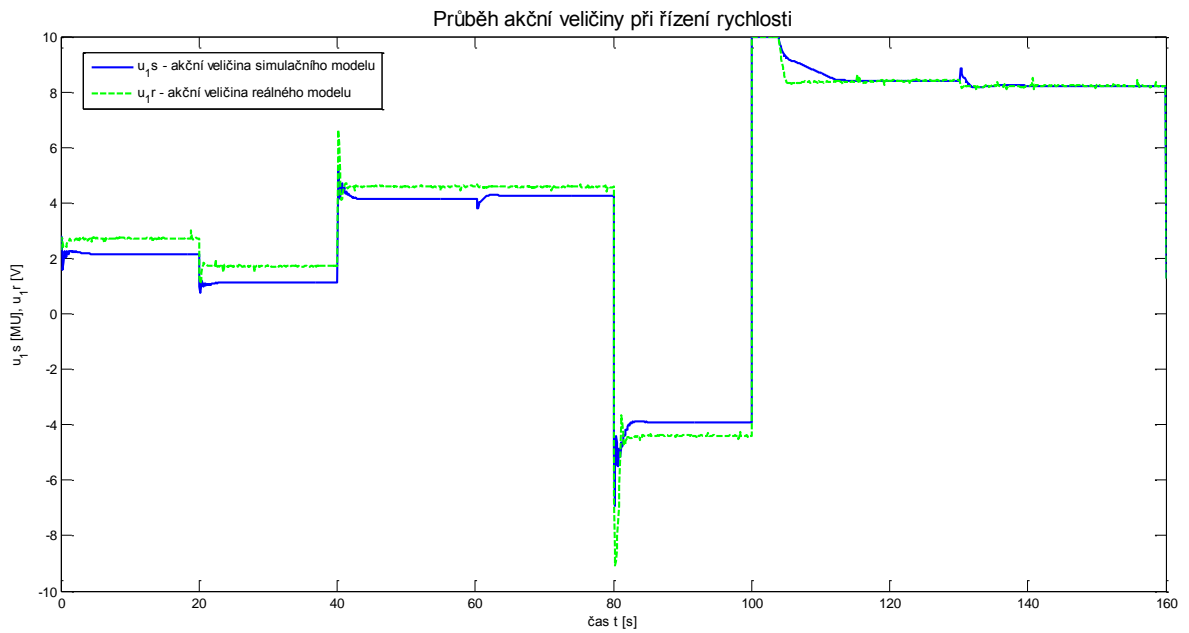
Do simulačního modelu byly zakomponovány bloky Saturation, které omezily hodnoty vstupního signálu na hodnotu $-10 - 10$. V tomto rozmezí jsou saturovány vstupy a výstupy reálného modelu.



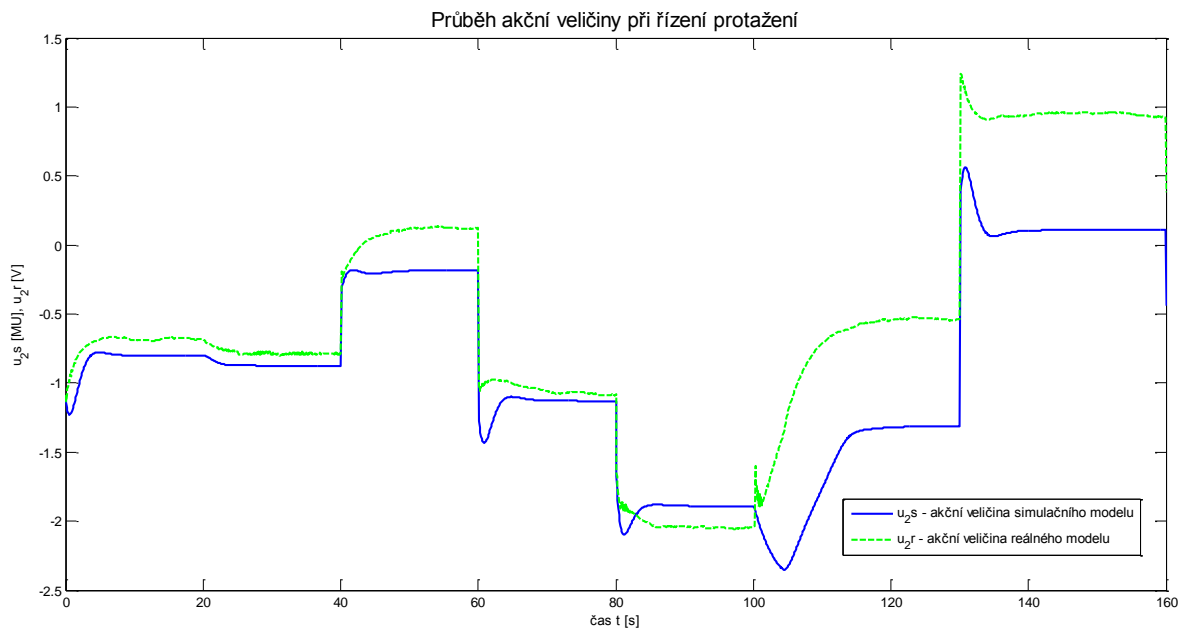
Graf 31 – Regulační pochod řízení rychlosti při současném řízení obou výstupů (PID)



Graf 32 – Regulační pochod řízení protažení při současném řízení obou výstupů (PID)



Graf 33 – Průběh akční veličiny při regulaci rychlosti (PID)



Graf 34 – Průběh akční veličiny při regulaci protažení (PID)

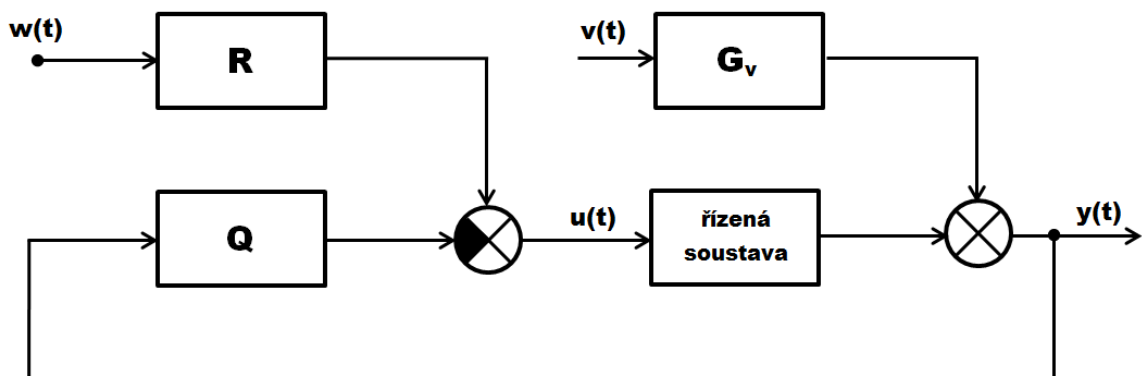
Parametry PID regulátorů byly navrhovány tak, aby regulovaná veličina sledovala žádanou veličinu s co nejmenším překmitem. Žádaná hodnota rychlosti se pohybuje v kladných i záporných otáčkách. Výstupy jsou na sobě závislé, proto v čase 100 sekund rychlost vzdaluje od žádné hodnoty. Důvodem této chyby je velký skok žádané hodnoty protažení. I přes tento velký požadavek se obě výstupní veličiny nakonec ustálí na svých

žádaných hodnotách. Vzájemné chování výstupních veličin lze pozorovat v Grafech 31 a 32.

Rozdíly akčních veličin jsou způsobeny odchylkou mezi vytvořeným simulačním modelem a reálným systémem. Při různých úrovních napětí dochází k rozdílným odchylkám. Modely mají rozdílné počáteční podmínky, a na reálný model mohou působit další vnější okolní vlivy, které do simulačního modelu nebyly zahrnuty. Při porovnání vykazuje rychlost věrohodnější chování než protažení, při kterém vnikají větší rozdíly v chování výstupní a akční veličiny. Při přivedení maximálního možného napětí na vstup dochází jen k malé změně protažení. Bylo nutné najít správné rozsahy žádaných hodnot, aby výstupní veličiny byly regulovatelné a systém se tak nedostával do nestabilních stavů. Další rozdíly mohou být způsobeny také řadou zjednodušení, která se při vytváření modelu uvažovala.

8.2 Řízení pomocí polynomiální metody přiřazení pólů v konfiguraci 2DOF

U tradiční metody syntézy se volí nejprve typ regulátoru a následně na základě vybraného kritéria se získají parametry regulátoru. Aplikace polynomiální metody umožňuje získat nejen strukturu vhodného regulátoru, ale i jeho parametry. Struktura regulátoru závisí na požadavcích kladených na systém řízení.



Obr. 39 – 2DOF konfigurace systému řízení

Označení konfigurace na Obr. 39 vzniklo z anglického slova two degrees of freedom (dva stupně volnosti). Regulátor v tomto případě obsahuje vedle zpětnovazební Q i přímovazební část R . V regulačním obvodu se uvažuje porucha G_v , která působí na výstup systému. [22]

V této práci nebude uvedeno celé odvození. Odvození rovnic pro výpočet stupňů jednotlivých polynomů spolu s dalšími informacemi je uvedeno v literatuře [22].

8.2.1 Odvození polynomiální metody přiřazení pólů ve 2DOF konfiguraci

Přenosy pro výpočty regulátorů byly použity z kapitoly 8.1.1 Výběr pracovního bodu a identifikace.

8.2.1.1 Výpočet regulátoru pro řízení rychlosti

Přenos pro protažení má tvar:

$$G(s)_{\text{rychlost}} = \frac{1,714}{s+1,77} = \frac{b_0}{s+a_0} = \frac{b(s)}{a(s)}. \quad (30)$$

Je uvažována skoková změna žádané i poruchové veličiny $w(t) = w_0(t)$, $v(t) = v_0(t)$.

Jejich obrazy jsou

$$W(s) = \frac{w_0}{s}, V(s) = \frac{v_0}{s}. \quad (31)$$

pak polynomy $f_w(s)$ a $f_v(s)$ mají tvar:

$$f_w(s) = s, f_v(s) = s. \quad (32)$$

Rovnice pro výpočet stupňů polynomů jsou následující:

$$\begin{aligned} \deg q &= \deg a + \deg f_v - 1 = 1 + 1 - 1 = 1 && \rightarrow q_1 s + q_0 \\ \deg r &= \deg f_w - 1 = 1 - 1 = 0 && \rightarrow r_0 \\ k_1 &= \deg f_w - \deg f_v - \deg a = 1 - 1 - 1 = -1 \rightarrow k = 0 \\ \deg \tilde{p} &= \deg a - 1 + k = 1 - 1 + 0 = 0 && \rightarrow \tilde{p}_0 \\ \deg d &= 2 \deg a + \deg f_v - 1 + k = 2 \cdot 1 + 1 - 1 + 0 = 2 \\ \deg t &= 2 \cdot \deg a + \deg f_v - \deg f_w - 1 + k = 2 \cdot 1 + 1 - 1 - 1 + 0 = 1 && \rightarrow t_1 s + t_0 \end{aligned} \quad (33)$$

Výsledný regulátor je nyní dán řešením dvojice polynomiálních rovnic:

$$\begin{aligned} a(s)f_v(s)\tilde{p}(s) + b(s)q(s) &= d(s), \\ t(s)f_w(s) + b(s)r(s) &= d(s). \end{aligned} \quad (34)$$

Polynom $d(s)$ byl zvolen ve tvaru mnohonásobného pólu

$$d(s) = (s + \alpha)^{\deg d}. \quad (35)$$

Po dosazení do první polynomiální rovnice je získán tento tvar:

$$(s + a_0)(s)(\tilde{p}_0) + b_0(q_1s + q_0) = (s^2 + 2\alpha s + \alpha^2). \quad (36)$$

Po roznásobení má rovnice tvar:

$$a_0\tilde{p}_0s + \tilde{p}_0s^2 + b_0q_1s + b_0q_0 = s^2 + 2\alpha s + \alpha^2. \quad (37)$$

Metodou porovnání koeficientů u jednotlivých mocnin komplexní proměnné s , se získají rovnice pro výpočet jednotlivých parametrů regulátoru

$$\begin{aligned} s^2 : \tilde{p}_0 &= 1 \\ s^1 : a_0\tilde{p}_0 + b_0q_1 &= 2\alpha \Rightarrow q_1 = \frac{2\alpha - a_0\tilde{p}_0}{b_0} \\ s^0 : q_0 &= \frac{\alpha^2}{b_0}. \end{aligned} \quad (38)$$

Druhá polynomiální rovnice má tvar:

$$t(s)f_v(s) + b(s)r(s) = d(s). \quad (39)$$

Po dosazení a roznásobení jednotlivých koeficientů je rovnice ve tvaru:

$$\begin{aligned} (t_1s + t_0)s + b_0(r_0) &= (s^2 + 2\alpha s + \alpha^2), \\ t_1s^2 + t_0s + b_0r_0 &= s^2 + 2\alpha s + \alpha^2. \end{aligned} \quad (40)$$

Porovnáním jednotlivých mocnin u komplexní proměnné s je koeficient regulátoru roven:

$$s^0 : r_0 = \frac{\alpha^2}{b_0}. \quad (41)$$

Výsledné regulátory jsou ve tvaru:

$$\begin{aligned} Q(s) &= \frac{q(s)}{f_v(s)\tilde{p}(s)} = \frac{q_1s + q_0}{s(\tilde{p}_0)}, \\ R(s) &= \frac{r(s)}{f_v(s)\tilde{p}(s)} = \frac{r_0}{s(\tilde{p}_0)}. \end{aligned} \quad (42)$$

8.2.1.2 Výpočet regulátoru pro řízení protažení

Přenos pro protažení má tvar:

$$G(s)_{\text{protažení}} = \frac{-0,7157}{s^2 + 1,807s + 0,6848} = \frac{b_0}{s^2 + a_1s + a_0} = \frac{b(s)}{a(s)}. \quad (43)$$

Opět je uvažována skoková změna žádané i poruchové veličiny $w(t) = w_0(t)$, $v(t) = v_0(t)$.

Jejich obrazy jsou

$$W(s) = \frac{w_0}{s}, V(s) = \frac{v_0}{s}, \quad (44)$$

pak

$$f_w(s) = s, f_v(s) = s. \quad (45)$$

Výpočet stupňů jednotlivých polynomů je následující

$$\begin{aligned} \deg q &= \deg a + \deg f_v - 1 = 2 + 1 - 1 = 2 && \rightarrow q_2s^2 + q_1s + q_0 \\ \deg r &= \deg f_w - 1 = 1 - 1 = 0 && \rightarrow r_0 \\ k_1 &= \deg f_w - \deg f_v - \deg a = 1 - 1 - 2 = -2 \rightarrow k = 0 \\ \deg \tilde{p} &= \deg a - 1 + k = 2 - 1 + 0 = 1 && \rightarrow \tilde{p}_1s + \tilde{p}_0 \\ \deg d &= 2 \deg a + \deg f_v - 1 + k = 2 \cdot 2 + 1 - 1 + 0 = 4 \\ \deg t &= 2 \cdot \deg a + \deg f_v - \deg f_w - 1 + k = 2 \cdot 2 + 1 - 1 - 1 + 0 = 3 && \rightarrow t_3s^3 + t_2s^2 + t_1s + t_0. \end{aligned} \quad (46)$$

Výsledný regulátor je nyní dán řešením dvojice polynomiálních rovnic:

$$\begin{aligned} a(s)f_v(s)\tilde{p}(s) + b(s)q(s) &= d(s), \\ t(s)f_w(s) + b(s)r(s) &= d(s). \end{aligned} \quad (47)$$

Polynom $d(s)$ byl zvolen ve tvaru:

$$d(s) = (s + \alpha)^{\deg d}. \quad (48)$$

Po dosazení do první polynomiální rovnice je získán tento tvar:

$$(s^2 + a_1s + a_0)(s)(\tilde{p}_1s + \tilde{p}_0) + b_0(q_2s^2 + q_1s + q_0) = (s^4 + 4\alpha s^3 + 6\alpha^2s^2 + 4\alpha^3s + \alpha^4). \quad (49)$$

Po roznásobení má rovnice tvar:

$$\begin{aligned} \tilde{p}_1s^4 + \tilde{p}_0s^3 + a_1\tilde{p}_1s^3 + a_1\tilde{p}_0s^2 + a_0\tilde{p}_1s^2 + a_0\tilde{p}_0s + b_0q_2s^2 + b_0q_1s + b_0q_0 \\ = s^4 + 4\alpha s^3 + 6\alpha^2s^2 + 4\alpha^3s + \alpha^4. \end{aligned} \quad (50)$$

Metodou porovnání koeficientů i jednotlivých mocnin u komplexní proměnné s , se získají rovnice pro výpočet jednotlivých parametrů regulátoru

$$\begin{aligned}
 s^4 : \tilde{p}_1 &= 1 \\
 s^3 : \tilde{p}_0 + a_1 \tilde{p}_1 &= 4\alpha \Rightarrow \tilde{p}_0 = 4\alpha - a_1 \tilde{p}_1 \\
 s^2 : a_1 \tilde{p}_0 + a_0 \tilde{p}_1 + b_0 q_2 &= 6\alpha^2 \Rightarrow q_2 = \frac{6\alpha^2 - a_1 \tilde{p}_0 - a_0 \tilde{p}_1}{b_0} \\
 s^1 : q_1 &= a_0 \tilde{p}_0 + b_0 q_1 = 4\alpha^3 \Rightarrow q_1 = \frac{4\alpha^3 - a_0 \tilde{p}_0}{b_0} \\
 s^0 : q_0 &= \frac{\alpha^4}{b_0}.
 \end{aligned} \tag{51}$$

Druhá polynomiální rovnice má tvar:

$$t(s)f_w(s) + b(s)r(s) = d(s). \tag{52}$$

Po dosazení a roznásobení jednotlivých koeficientů je rovnice ve tvaru:

$$\begin{aligned}
 (t_3 s^3 + t_2 s^2 + t_1 s + t_0)s + b_0(r_0) &= (s^4 + 4\alpha s^3 + 6\alpha^2 s^2 + 4\alpha^3 s + \alpha^4), \\
 t_3 s^4 + t_2 s^3 + t_1 s^2 + t_0 s + b_0 r_0 &= s^4 + 4\alpha s^3 + 6\alpha^2 s^2 + 4\alpha^3 s + \alpha^4.
 \end{aligned} \tag{53}$$

Porovnáním jednotlivých mocnin u komplexní proměnné s je koeficient regulátoru roven:

$$s^0 : r_0 = \frac{\alpha^4}{b_0}. \tag{54}$$

Výsledné regulátory jsou ve tvaru:

$$\begin{aligned}
 Q(s) &= \frac{q(s)}{f_v(s)\tilde{p}(s)} = \frac{q_2 s^2 + q_1 s + q_0}{s(\tilde{p}_1 s + \tilde{p}_0)}, \\
 R(s) &= \frac{r(s)}{f_v(s)\tilde{p}(s)} = \frac{r_0}{s(\tilde{p}_1 s + \tilde{p}_0)}.
 \end{aligned} \tag{55}$$

8.2.2 Průběh regulace při návrhu metodou polynomiální syntézy

Po odladění regulačních pochodů byl polynom $d(s)$ zvolen ve tvaru $d(s) = (s + 2)^2$, $\alpha = 2$ pro řízení rychlosti. Při řízení protažení bylo nutné koeficient α snížit, protože regulační pochod byl nestabilní. V konečné fázi byl polynom pro řízení protažení zvolen ve tvaru: $d(s) = (s + 1,9)^2$, $\alpha = 1,9$.

Výsledný regulátor pro rychlost je ve tvaru:

$$Q(s) = \frac{q_1 s + q_0}{s(\tilde{p}_0)} = \frac{1,301s + 2,334}{s(\tilde{p}_0)}, \quad (56)$$

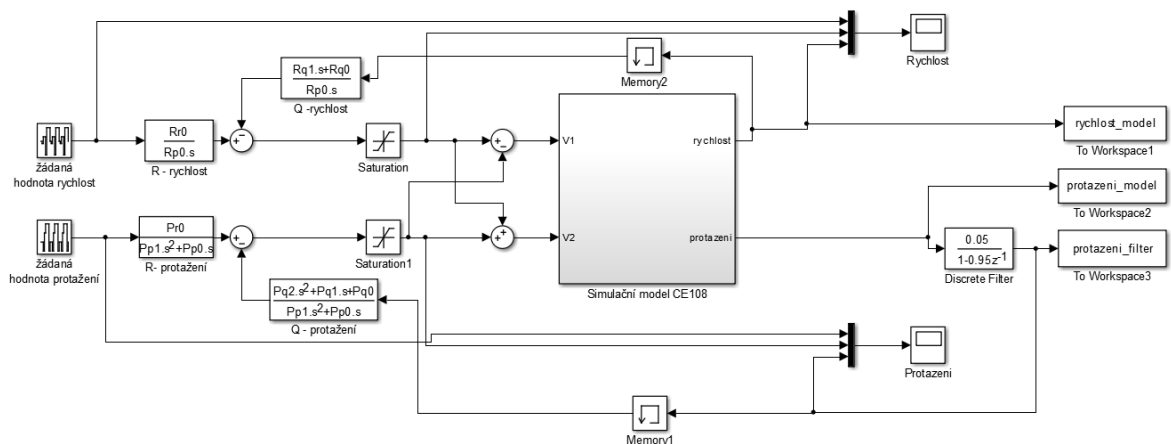
$$R(s) = \frac{r_0}{s(\tilde{p}_0)} = \frac{2,334}{s}.$$

Výsledný regulátor pro protažení má tvar:

$$Q(s) = \frac{q_2 s^2 + q_1 s + q_0}{s(\tilde{p}_1 s + \tilde{p}_0)} = \frac{-14,68s^2 - 32,79s - 18,21}{s^2 + 5,793s}, \quad (57)$$

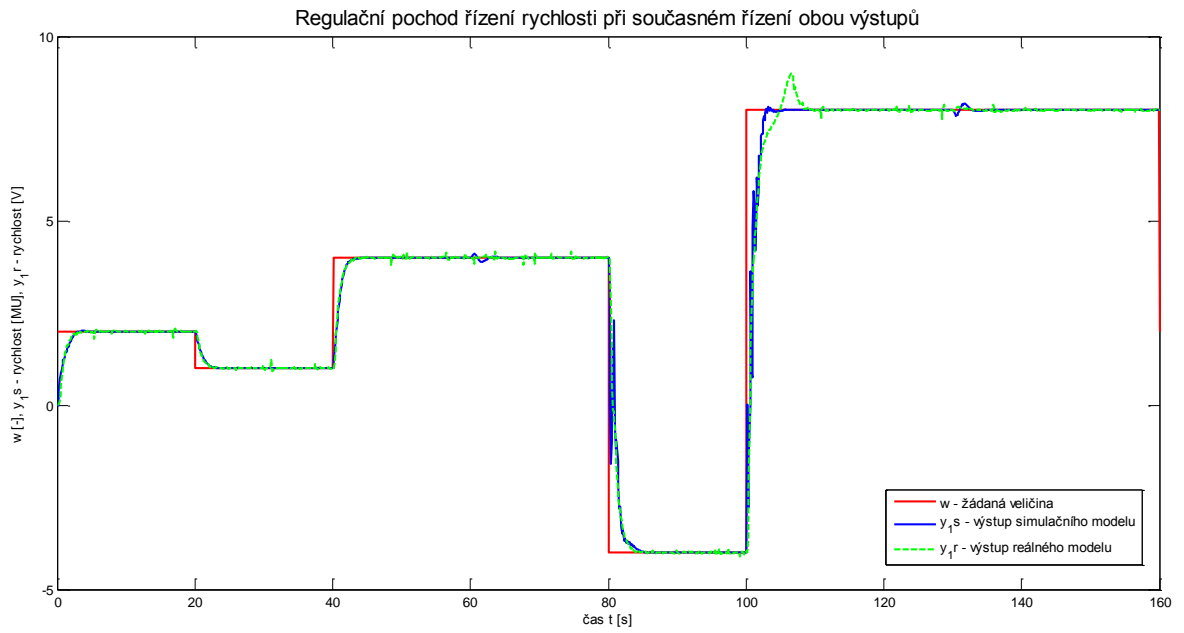
$$R(s) = \frac{r_0}{s(\tilde{p}_1 s + \tilde{p}_0)} = \frac{-18,21}{s^2 + 5,793s}.$$

Při řízení protažení byla použita maximální přípustná hodnota koeficientu $\alpha = 1,9$. Při nižším nastavení koeficientu je regulace plynulejší, ale náběh je pomalejší.

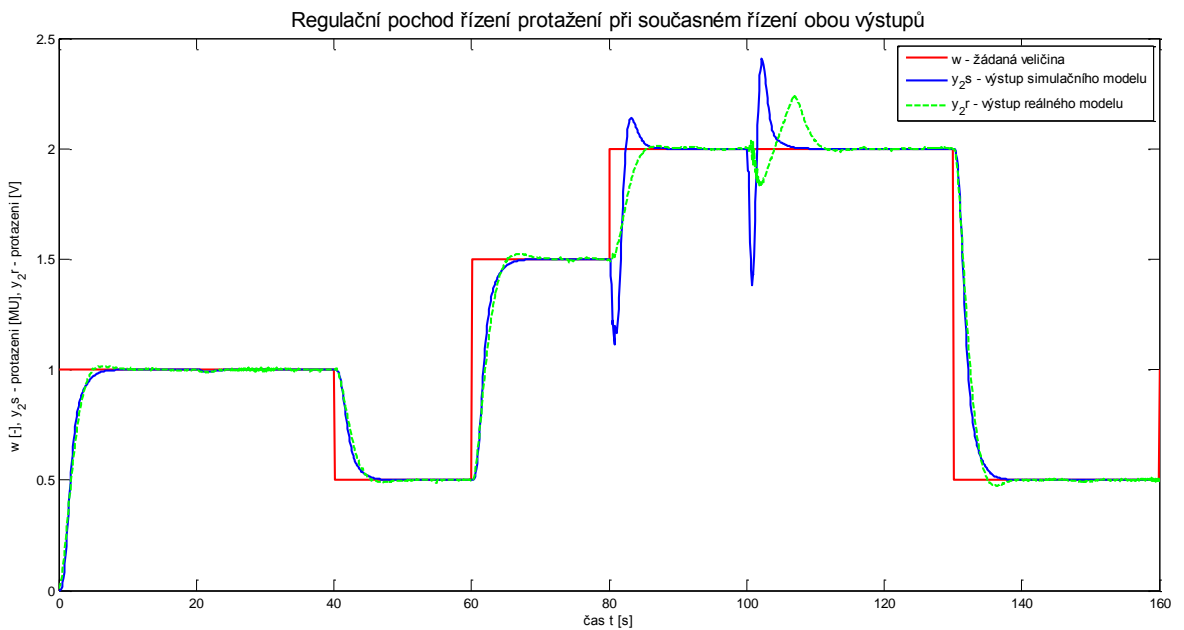


Obr. 40 – Simulinkové schéma pro současné řízení rychlosti a protažení simulačního modelu pomocí polynomiální metody přiřazení pólů

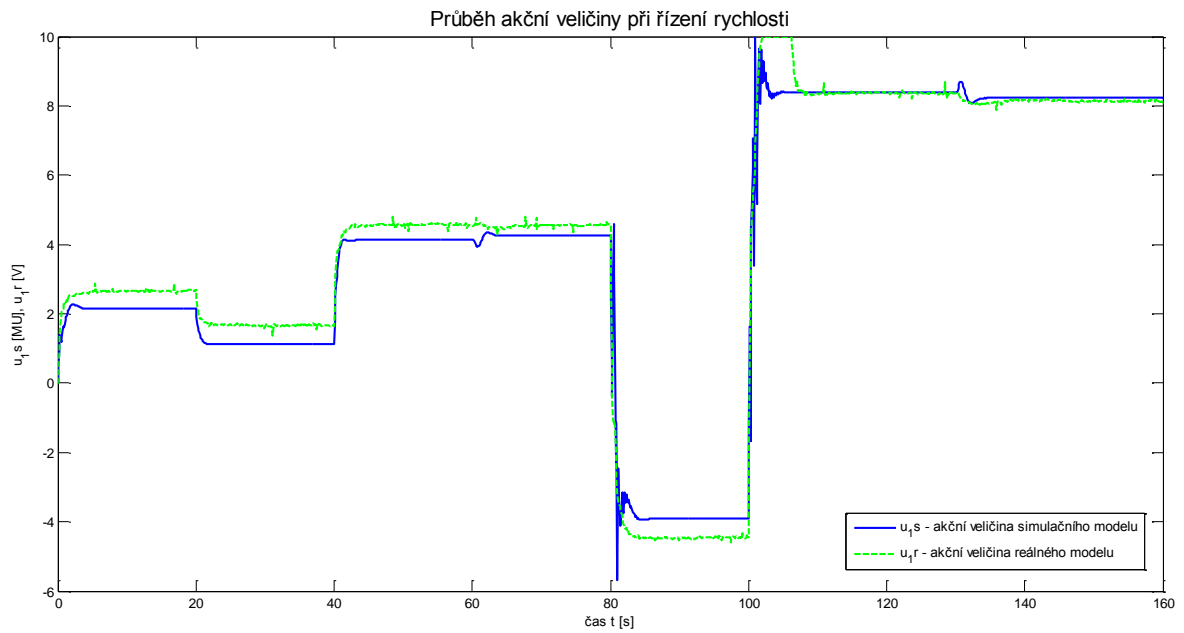
Výsledné regulační schéma (Obr. 40) ukazuje 2DOF konfiguraci. K modelu se opět přistupovalo jako ke dvěma samostatným SISO modelům. Při regulaci simulačního modelu bylo nutné použít blok Memory, aby nedocházelo k výpočetním chybám. Blok zajišťuje zpoždění o jeden integrační časový krok a byl použit i při regulaci pomocí PID regulátorů.



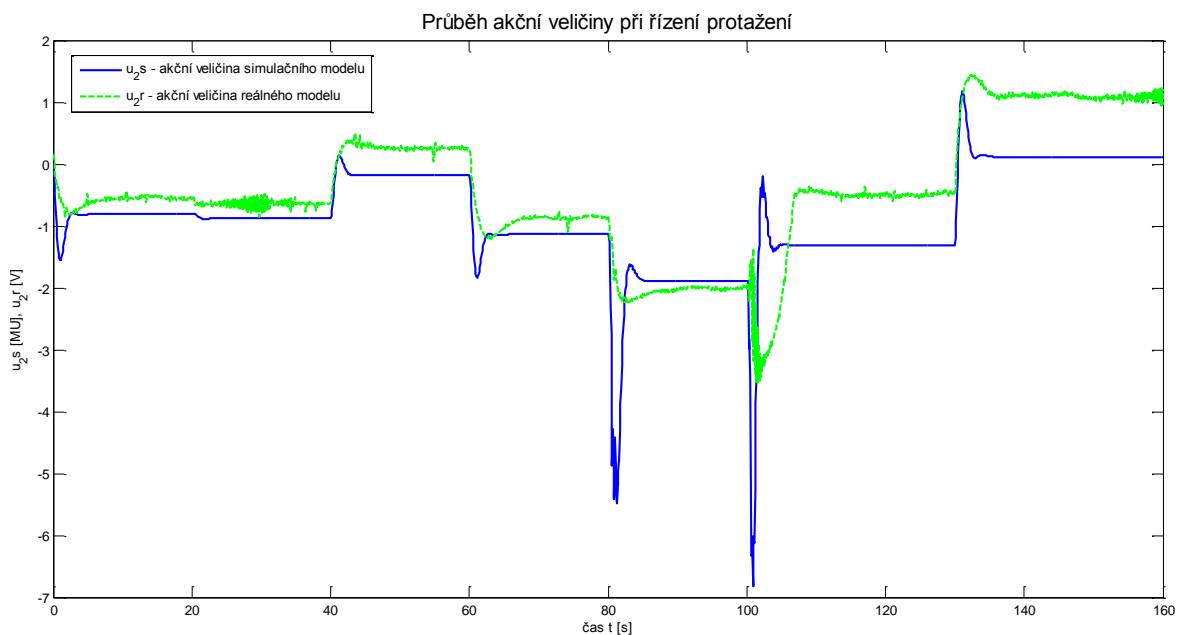
Graf 35 – Regulační pochod řízení rychlosti při současném řízení obou výstupů (polynomiální metoda)



Graf 36 – Regulační pochod řízení rychlosti při současném řízení obou výstupů (polynomiální metoda)



Graf 37 – Průběh akční veličiny u_1 při regulaci rychlosti (polynomiální metoda)



Graf 38 – Průběh akční veličiny při regulaci protažení (polynomiální metoda)

Výstupní veličiny se při této regulaci rychleji ustalují a lépe kopírují tvar žádané hodnoty. Díky uvažované skokové změně poruchové veličiny, regulátory lépe eliminují vzájemné působení protažení a rychlosti. Tento jev je nejlépe vidět v Grafu č. 36, kde se hodnota protažení ustálila mnohem rychleji, než při řízení pomocí PID. Simulační model se opět v některých případech chová jinak, než reálný systém. Při sledování chování

reálného modelu je vidět menší kmitavost oproti simulaci. Reálný model má při změně žádané hodnoty menší překmit. První část regulace do času 80 sekund je plynulejší. Po tomto čase byly do žádaných hodnot zahrnuty větší skokové změny, které způsobily větší odchylky od žádané hodnoty. Největší odchylky vznikají při regulaci protažení v čase 100 sekund, kdy dojde k velké změně žádané hodnoty rychlosti. Regulační obvod 2DOF se v tomto případě s těmito poruchami vypořádal lépe, než zpětnovazební řízení pomocí PID.

ZÁVĚR

V rámci této práce byl studován model soustavy spřažených servopohonů, který je vybavením laboratoře řízení reálných procesů na Fakultě aplikované informatiky ve Zlíně. V prvním kroku bylo studováno chování reálného modelu. Při měření statických charakteristik se ukázalo, že se model při některých kombinacích napětí chová zcela náhodně. Velkým zdrojem nelinearity byl starý vytaháný pás, který byl natrhnutý a potřeboval nutně vyměnit, pravděpodobně by všechna měření nevydržel. Nový pás značně změnil tvar statických charakteristik modelu. V rámci této práce bylo provedeno mnoho různých pokusů a změn při měření základních charakteristik, všechny naměřené výsledky nejsou, z důvodu velikosti, v této práci zveřejněny. Výsledky všech měření jsou k dispozici na příloženém CD a v elektronické příloze. Ze všech měření jsou pomocí nástroje Matlab vytvořeny grafy, ze kterých lze pozorovat různé změny v chování modelu.

V této práci bylo postupováno podle uvedených bodů zadání. Bylo dosaženo hlavního cíle této práce a to vytvoření simulačního modelu, který vystihuje chování reálné soustavy CE108. Základ simulačního modelu vznikl na základě matematicko-fyzikální analýzy převzaté z literatury [9]. Tento model musel být upraven do podoby roznásobených přenosů, aby mohl být použit v simulačním prostředí Simulink. Po vytvoření modelu a dosazení všech parametrů se ukázalo, že výstupní hodnoty překračují meze laboratorního modelu. Proto byl vytvořený matematický model dále upraven pomocí převodních konstant tak, aby se plochy statických charakteristik co nejvíce podobaly reálnému systému.

Vytvořený model platil pouze pro oblast kladného, nebo pouze pro oblast záporného vstupního napětí. Proto bylo nutné vytvořit matematický model z více submodelů, které budou platit pro vymezené oblasti. Celkový simulační model je vytvořen ze čtyř submodelů, které se spínají za určité kombinace vstupních napětí. Dvě oblasti rozsahu vstupního napětí popisuje model získaný matematicko-fyzikální analýzou a zbylé dva modely byly získány pomocí experimentální metody identifikace. Přepínání modelů je realizováno pomocí logické funkce a přepínače Switch (blok v Simulink). Přechody mezi modely mohly být realizováno jinak, například použitím filtru, nebo využitím speciálních bloků v Simulink zajišťující přepínání modelů spolu s předáváním stavových veličin.

Statické a dynamické vlastnosti vytvořeného simulačního modelu byly porovnány s reálným modelem. Při vykreslování charakteristik bylo zjištěno, že vytvořený model se

v některých oblastech liší více či méně v závislosti na vstupním napětí. Nepřesnosti mohou být způsobeny nepřesnými parametry, které byly převzaty z manuálu [16] a nemusí plně souhlasit se současnými parametry reálného modelu. Při modelování byla stanovena řada zjednodušujících předpokladů, například matematicko-fyzikální analýza považuje použitý pás za nehmotný, což může mít podstatný vliv na chování modelu. Odchytky mezi modely mohly také vzniknout změnou polohy stavěcího šroubu, který má velký vliv na hodnotu protažení. Šroub má tendenci během měření se povolovat a díky tomu tak ovlivňuje výstupní hodnoty reálného systému.

Jedním z dalších požadavků při vytváření této práce bylo použití simulačního modelu k návrhu regulátorů, které budou následně použity k řízení reálné soustavy. Pro návrh a testování regulátorů tak není třeba pracovat s reálnou soustavou, postačuje simulační model, který byl vytvořen v rámci této práce.

Poslední kapitola se zabývá návrhem regulátorů a následným řízením. Úkolem bylo navrhnout řídicí algoritmy na simulačním modelu a ty následně použít na laboratorním modelu. V prvním případě se simulační model ovládal pomocí PID regulátoru, který byl získán pomocí nástroje PID Tune. V druhém případě byl odvozen regulátor pomocí polynomiální syntézy umístění pólů ve 2DOF konfiguraci. Regulátory byly navrženy na základě identifikovaných přenosů v určitém pracovním bodě na vytvořeném simulačním modelu. Při použití regulátorů na reálné soustavě byly průběhy výstupních veličin podobné se simulačním modelem. Splnil se tak další důležitý požadavek této práce a to uřízení reálné soustavy regulátorem navrženým na základě simulačního modelu.

Tento model je možné dále zpřesňovat a zlepšovat. Parametry simulačního modelu by mohly být dále zpřesněny spolu s využitím některých metod optimalizace, popřípadě metod umělé inteligence. Při měření byl použit pás o kruhovém průřezu, soustava spřažených servomotorů by vykazovala lineárnější chování při použití pásu stejného profilu (lichoběžníkového) jako mají kladky. Pás by v tomto případě méně prokluzoval a měl by větší přilnavost.

Část této práce byla publikována v rámci studentské soutěže STOČ 2016 v Ostravě, kde se s velkým překvapením autora umístila na prvním místě v sekci: Teorie a aplikace systémů řízení.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Modelování a identifikace řízeného systému [online]. DOSTÁL, Petr. s. 19 [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: http://vyuka.fai.utb.cz/pluginfile.php?file=%2F50823%2Fmod_resource%2Fcontent%2F4%2Fmodely.pdf
- [2] MIKLEŠ, Ján a Miroslav FIKAR. MODELOVANIE, IDENTIFIKÁCIA A RIADENIE PROCESOV I: Modely a dynamické charakteristiky spojitých procesov. Bratislava: STU, Bratislava, Vazovova 5, 1999. ISBN 80-227-1289-2.
- [3] NOSKIEVIČ, Petr. MODELOVÁNÍ A IDENTIFIKACE SYSTÉMŮ. Ostrava: MONATEX a.s, 1990. ISBN 80-7225-030-2.
- [4] LOVERA, Marco. Control-oriented modelling and identification: theory and practice. London, United Kingdom: Institution of Engineering and Technology, 2015, 1 online zdroj. ISBN 9781849196154. Dostupné také z: http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpCOMITP02/controloriented_modelling_and_identification_theory_and_practice
- [5] KOLOMAZNÍK, Karel. Modelování zpracovatelských procesů. Brno: Rektorát Vysokého učení technického v Brně, 1990. ISBN 80-214-0114-1.
- [6] BOBÁL, Vladimír. Identifikace systémů. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2009. ISBN 978-80-7318-888-7.
- [7] HŘEBÍČEK, Jiří a Michal ŠKRDLA. Úvod do matematického modelování [online]. In: . s. 83 [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: <https://is.muni.cz/el/1431/podzim2007/Bi3101/um/skripta.pdf>
- [8] JANÍČKOVÁ, Zora. Teorie systémů. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2010. ISBN 978-80-248-2561-8.
- [9] TecEquipment Ltd 2016. CE108 Coupled Drives Apparatus User Guide. 2016. Nottingham, England, 1997: TecEquipment Limited, 1997.
- [10] COUPLED DRIVES 1: Basic. Control Systems Principles [online]. United Kingdom [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: <http://www.control-systems-principles.co.uk/whitepapers/coupled-drives1.pdf>

- [11] CE108 Coupled Drives Apparatus. TecQuipment: Technical teaching equipment for engineering [online]. [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: http://www.tecquipment.com/Datasheets/CE108_0516.pdf
- [12] MF624 - PCI multifunction I/O card. In: HUMUSOFT [online]. [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: <http://www.humusoft.cz/datacq/mf624/>
- [13] PAVEL, Karban. Výpočty a simulace v programech Matlab a Simulink. BRNO: Computer Press, 2006. ISBN 978-80-251-1448-3.
- [14] Simulink. In: HUMUSOFT [online]. [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: <http://www.humusoft.cz/produkty/matlab/simulink/>
- [15] MathWorks [online]. [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/>
- [16] Coupled Drives 2: Control and analysis. Control Systems Principles [online]. [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: <http://www.control-systems-principles.co.uk/whitepapers/coupled-drives2.pdf>
- [17] Real-Time Workshop: For Use with SIMULINK [online]. [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: http://serdis.dis.ulpgc.es/~ii-its/MatDocen/laboratorio/manuales/RTW_UG.PDF
- [18] HUMUSOFT [online]. [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: <http://www.humusoft.cz/>
- [19] Simulink Desktop Real-Time [online]. [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/products/simulink-desktop-real-time/>
- [20] WELLSTEAD, Peter E. Introduction to Physical System Modelling [online]. [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: <http://www.control-systems-principles.co.uk/ebooks/Introduction-to-Physical-System-Modelling.pdf>
- [21] Nové možnosti při návrhu PID regulátorů v prostředí Matlab. *AUTOMA* [online]. 2015(3), 2 [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: <http://automa.cz/res/pdf/53523.pdf>
- [22] DOSTÁL, Petr a Radek MATUŠŮ. Stavová a algebraická teorie řízení. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010. ISBN 978-80-7318-991-4.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

y	Výstupní veličina, výstupy objektu
y_p	Pomocná měřená veličina
y_r	Řízená výstupní veličina
v	Externí porucha
n	Náhodná neměřitelná porucha
u_m	Vstupní signál
<i>SISO</i>	Single-Input-Single-Output
<i>MIMO</i>	Multiple-Input-Multiple-Output
e	Regulační odchylka
y_m	Výstup modelu
u_m	Vstupní signál modelu
Γ_1, Γ_2	Krouticí moment motorů 1 a 2
u_1, u_2	Vstupní napětí motoru 1 a 2
ω_1, ω_2	Úhlová rychlost kladky poháněné motorem 1 a 2
x_k	Posun pohyblivého ramene
α	Odklon pásu od vertikály
k_c, k_d, k_e	Tuhost jednotlivých částí pásu
I_1, I_2	Momenty setrvačnosti motorů 1 a 2
b_1, b_2	Koeficienty rotační frikce (tření) motorů 1 a 2
y_1	Výstupní veličina rychlost
y_2	Výstupní veličina protažení
θ	Úhel natočení pohyblivého ramene
F	Síla napínání pásu
F_k	Síla napínání pružiny

L	Vzdálenost mezi osou pohyblivé ramene a osou třetí kladky
k_t	Koeficient pružiny na které je zavěšené pohyblivé rameno
p	Momentum hybnosti m_t
m_t	Hmotnost pohyblivého ramene s kladkou
r_1, r_2	Poloměry kladek 1 a 2
h_1, h_2	Úhlová momenta kladek 1 a 2
x_c, x_d, x_e	Velikosti odpovídajících částí pásu
s	Komplexní proměnná
k^l	Efektivní torzní tuhost pásu
g_a	Vstupní převodní konstanta motoru 1
g_b	Vstupní převodní konstanta motoru 2
g_1	Výstupní převodní konstanta motoru 1
g_2	Výstupní převodní konstanta motoru 2
gb_1	Pomocná převodní konstanta vstupního napětí u_1 pro protažení
gb_2	Pomocná převodní konstanta vstupního napětí u_1 pro protažení
g_{2z}	Výstupní převodní konstanta motoru 2 při záporném napětí
gb_{1z}	Pomocná převodní konstanta vstupního napětí u_1 pro protažení při záporném napětí
gb_{2z}	Pomocná převodní konstanta vstupního napětí u_1 pro protažení při záporném napětí
IIR	Infinite Impulse Response, filtr s nekonečnou impulsní odezvou
w	Žádaná hodnota
u	Akční veličina
PID	Proportional–Integral–Derivative, Proporcionalní – Integrační - Derivační
DOF	Degrees of Freedom, stupně volnosti
MU	Matlab Unit

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 – Schématické znázornění objektu experimentální identifikace [6].....	21
Obr. 2 – Chyba výstupu [6]	22
Obr. 3 – Chyba vstupu [6]	23
Obr. 4 – Chyba rovnice [6]	23
Obr. 5 – Rozdělení dynamických systémů [1].....	24
Obr. 6 – Princip činnosti reálného procesu, na kterém je založen model CE108 [9]	26
Obr. 7 – Schéma principu činnosti modelu [9].....	27
Obr. 8 – Popis předního panelu CE108 [11].....	28
Obr. 9 – Pohled na hnací motor ze zadní části modelu.....	29
Obr. 10 – Tachogenerátor měřící otáčky třetí kladky.....	30
Obr. 11 – Servopotenciometr měřící vychýlení ramene	30
Obr. 12 – Blokové schéma funkce CE108 [9]	31
Obr. 13 – Univerzální svorkovnice TB 620.....	32
Obr. 14 – Multifunkční měřící karta MF 624 [12]	32
Obr. 15 – Vnitřní struktura reálného modelu v Simulink	33
Obr. 16 – Ukázka prostředí Matlab	35
Obr. 17 – Ukázka prostředí Simulink	35
Obr. 18 – Schéma systému pro účely modelování [9].....	37
Obr. 19 – Schéma pohyblivého ramene [9]	38
Obr. 20 – Vztahy přenosových funkcí pro úhlové rychlosti [9]	39
Obr. 21 – Přenosová funkce pro vychýlení ramene [9]	42
Obr. 22 – Celkový model soustavy spřažených pohonů [9].....	43
Obr. 23 – Vztah mezi u_1 , u_2 a měřitelnými výstupy [9].....	44
Obr. 24 – Simulinkové schéma pro měření charakteristik modelu.....	46
Obr. 25 – Detail natrhnutého pásu	48
Obr. 26 – Naznačení potřebného roznásobení přenosů [9].....	58
Obr. 27 – Upravené schéma modelu pro použití v Simulink.....	59
Obr. 28 – Schéma matematického modelu vytvořené v Simulink	61
Obr. 29 – Vytvořené logické schéma v Simulink pro přepínání modelů	65
Obr. 30 – Schéma vytvořeného modelu pro II. oblast	68
Obr. 31 – Schéma vytvořeného modelu pro IV. oblast	68
Obr. 32 – Schéma vnitřní struktury bloku Dead_zone	69

Obr. 33 – Schéma zapojení celkového modelu.....	69
Obr. 34 – Schéma systému s předkompenzátorem	74
Obr. 35 – Schéma zpětnovazebního zapojení PID regulátoru	75
Obr. 36 – Ukázka nástroje PID Tuner	76
Obr. 37 – Simulinkové schéma pro identifikaci přenosu rychlosti.....	77
Obr. 38 – Simulinkové schéma pro současné řízení rychlosti a protažení simulačního modelu pomocí PID regulátoru	79
Obr. 39 – 2DOF konfigurace systému řízení	82
Obr. 40 – Simulinkové schéma pro současné řízení rychlosti a protažení simulačního modelu pomocí polynomiální metody přiřazení pólů	87

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 – Statická charakteristika rychlosti starého pásu (vlevo) a nového pásu (vpravo)	47
Graf 2 – Statická charakteristika protažení starého pásu (vlevo) a nového pásu (vpravo)	47
Graf 3 – Statická charakteristika rychlosti (vlevo) a protažení (vpravo) pro kladná vstupní napětí	48
Graf 4 – Vstupní hodnoty napětí u_1 a u_2 v závislosti na čase	49
Graf 5 – Statická charakteristika rychlosti (vlevo) a protažení (vpravo) při postupné změně vstupního napětí	50
Graf 6 – Odchylka při měření statických charakteristik rychlosti (vlevo) a protažení (vpravo)	50
Graf 7 – Závislost rychlosti pásu na napětí $u_1 + u_2$	51
Graf 8 – Závislost protažení pásu na napětí $u_1 - u_2$	51
Graf 9 – Referenční statická charakteristika rychlosti	52
Graf 10 – Referenční statická charakteristika protažení	53
Graf 11 – Ukázka filtrace signálu pomocí použitého filtru	54
Graf 12 – Přejíždové charakteristiky při kladném napětí	55
Graf 13 – Přejíždové charakteristiky při záporném napětí	55
Graf 14 – Přejíždové charakteristiky při rozdílném směru otáčení motorů	56
Graf 15 – Přejíždové charakteristiky při rozdílném směru otáčení motorů	56
Graf 16 – Ukázka nelineárního chování reálného modelu	57
Graf 17 – Zobrazení chování rychlosti spolu s rychlostmi obou motorů	57
Graf 18 – Porovnání statických charakteristik simulačního a reálného modelu při kladném vstupním napětí	62
Graf 19 – Porovnání statických charakteristik simulačního a reálného modelu při záporném vstupním napětí	63
Graf 20 – Rozdělení jednotlivých oblastí modelu	64
Graf 21 – Výstup logické funkce rozdělení plochy na jednotlivé oblasti	66
Graf 22 – Ukázka identifikace rychlosti pro model ve II. oblasti	67
Graf 23 – Ukázka identifikace protažení pro model ve II. oblasti	67
Graf 24 – Ukázka simulačního modelu a reálného systému při přechodu mezi oblastmi	70

Graf 25 – Porovnání statických charakteristik rychlosti reálného (vlevo) a simulačního modelu (vpravo).....	71
Graf 26 – Porovnání statických charakteristik protažení reálného (vlevo) a simulačního modelu (vpravo).....	71
Graf 27 – Srovnání přechodových charakteristik simulačního a reálného modelu při kladném napětí	72
Graf 28 – Srovnání přechodových charakteristik simulačního a reálného modelu při záporném napětí	72
Graf 29 – Porovnání přechodových charakteristik rychlosti simulačního modelu a identifikovaného modelu pro návrh regulátoru	77
Graf 30 – Porovnání přechodových charakteristik protažení simulačního modelu a identifikovaného modelu pro návrh regulátoru	78
Graf 31 – Regulační pochod řízení rychlosti při současném řízení obou výstupů (PID).....	80
Graf 32 – Regulační pochod řízení protažení při současném řízení obou výstupů (PID).....	80
Graf 33 – Průběh akční veličiny při regulaci rychlosti (PID).....	81
Graf 34 – Průběh akční veličiny při regulaci protažení (PID).....	81
Graf 35 – Regulační pochod řízení rychlosti při současném řízení obou výstupů (polynomiální metoda)	88
Graf 36 – Regulační pochod řízení rychlosti při současném řízení obou výstupů (polynomiální metoda)	88
Graf 37 – Průběh akční veličiny u_1 při regulaci rychlosti (polynomiální metoda).....	89
Graf 38 – Průběh akční veličiny při regulaci protažení (polynomiální metoda)	89

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 – Vybrané parametry modelu CE108	28
---	----

SEZNAM PŘÍLOH

Celkový vytvořený simulační model, všechny skripty a schémata, vytvořené v rámci této práce pomocí Matlab a Simulink, jsou dostupné na příloženém CD. Elektronická verze dále obsahuje velké počty naměřených vyhodnocených dat v podobě grafů a spoustu skriptů, které byly použity při tvorbě této práce.