

Západočeská univerzita v Plzni
Fakulta aplikovaných věd
Katedra kybernetiky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Automatické ladění regulátorů
pro elektrické servopohony

PLZEŇ, 2021

MICHAL ŠPIRK

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta aplikovaných věd
Akademický rok: 2020/2021

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

Jméno a příjmení: **Michal ŠPIRK**
Osobní číslo: **A18B0547P**
Studijní program: **B3918 Aplikované vědy a informatika**
Studijní obor: **Kybernetika a řídicí technika**
Téma práce: **Automatické ladění regulátorů pro elektrické servopohony**
Zadávající katedra: **Katedra kybernetiky**

Zásady pro vypracování

1. Seznamte se s technikami řízení elektrických pohonů a metodami automatického návrhu regulátorů na základě experimentu s řízenou soustavou, se zaměřením na mechanicky poddajné systémy.
2. Navrhněte vhodný algoritmus pro návrh regulátoru na základě modelu s využitím metod vyvíjených na KKY.
3. Provedte porovnání navržených metod s modulem PID tuner v prostředí Matlab na sadě typizovaných modelů mechanických soustav.
4. Ověřte navržené metody na reálné mechanické soustavě a porovnejte výsledky s funkcemi pro automatické ladění dostupné ve vybraných komerčních servozesilovačích.

Rozsah bakalářské práce: **30-40 stránek A4**
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam doporučené literatury:

Vukosavic, S., Digital Control of Electrical Drives
Goubey, M., Řízení pohybu pružných elektromechanických soustav
Brabec, M. Návrh PID regulátoru metodou H-nekonečno optimalizace

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

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2020**
Termín odevzdání bakalářské práce: **24. května 2021**

Radová

Doc. Dr. Ing. Vlasta Radová
děkanka



Prof. Ing. Josef Psutka

Prof. Ing. Josef Psutka, CSc.
vedoucí katedry

Prohlášení

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

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

V Plzni dne 21.5.2021

Epiak
.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Martinu Goubejovi Ph.D. za věnovaný čas, odborné rady, připomínky a trpělivost.

Anotace

Tématem této bakalářské práce je problematika řízení elektromechanických kmitavých systémů. Cílem je analyzovat dynamické chování kmitavých systémů a vytvořit skript pro automatický návrh PI regulátorů, který implementuje metodu H_∞ regionů. V úvodu práce jsou popsány základy zpětnovazební regulace, požadavky na řízení a je rozebráno chování elektromechanických soustav. Na úvod navazuje popis automatických metod návrhu PI regulátorů, na základě kterých je vytvořen skript pro automatický návrh kaskádního řídicího systému. Na závěr je v práci vyzkoušen skript na typizovaných mechanických soustavách a také na reálném systému. V příloze jsou příklady návrhů regulátorů pro dvou hmotové soustavy s náhodnými parametry.

Klíčová slova: PID kaskádní regulace, elektromechanické kmitavé systémy, H_∞ nekonečno metoda, automatický návrh regulátorů

Abstract

Abstract This bachelor thesis focuses on the control of low damped electromechanical systems. The aim is to analyse the dynamical behaviour of low damped systems and make an automatic PI controller design script implementing an H_∞ region method. The basics of feedback control, closed loop system demands and electromechanical system dynamics are presented at the beginning of the thesis. Further on it deals with the automatic PI controller design method description used to create a new script for an automatic design of cascade control systems. In the final part of the thesis the script is tested on several electromechanical systems as well as on a real one. The appendix of the thesis provides several design examples of systems with random parameters.

Keywords: PID cascade control, electromechanical low damped systems, H_∞ method, automatic design of control systems

Obsah

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Úvod | 13 |
| 1.1 | Motivace | 13 |
| 1.2 | Popis problému | 13 |
| 2 | Úvod do řízení | 15 |
| 2.1 | Regulační smyčka | 15 |
| 2.2 | Důležité zpětnovazební přenosy | 16 |
| 2.3 | Požadavky na uzavřenou smyčku | 16 |
| 2.4 | Hodnocení kvality navrženého řízení | 18 |
| 2.5 | PID regulace | 19 |
| 2.6 | Kaskádní regulace | 21 |
| 3 | Elektromechanická soustava | 22 |
| 3.1 | Elektrické části | 22 |
| 3.2 | Mechanické části | 23 |
| 3.3 | Požadavky na řízení elektromechanické soustavy se servopohonem | 24 |
| 3.4 | Model tuhé soustavy | 25 |
| 3.5 | Model pružné soustavy | 27 |
| 4 | Automatické metody návrhu PID | 29 |
| 4.1 | PID Tuner | 29 |
| 4.2 | Metoda H_∞ Regionu | 30 |
| 4.2.1 | Návrh PD regulátoru polohy | 33 |
| 5 | Návrh skriptu s využitím H_∞ metody | 35 |
| 5.1 | Funkce metody | 35 |
| 5.1.1 | Funkce dopocitejRegion() | 37 |
| 5.1.2 | Funkce interaktivniRegion() | 37 |
| 5.1.3 | Funkce graf3D() | 37 |
| 5.1.4 | Funkce vrstvnice() | 37 |
| 5.1.5 | Funkce vyber() | 38 |
| 5.1.6 | Funkce vytvorGrafy() | 38 |
| 5.1.7 | Funkce vytvorPrunik() | 38 |
| 5.1.8 | Funkce vytvorTabulkuUrceneBody() | 38 |
| 5.2 | Výpočet regionu | 38 |
| 5.3 | Tvorba tabulky | 41 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 5.4 | Výběr vhodných regulátorů | 43 |
| 5.5 | Doplňkové funkce | 43 |
| 6 | Typizované mechanické soustavy | 45 |
| 6.1 | Návrh regulátoru akčního členu | 45 |
| 6.2 | Srovnání modelů | 47 |
| 6.3 | Postup návrhu | 49 |
| 6.4 | Návrh pro $r = 1.1$ | 49 |
| 6.5 | Návrh pro $r = 2$ | 53 |
| 6.6 | Návrh pro $r = 6$ | 56 |
| 6.7 | Srovnání metod | 60 |
| 7 | Reálná soustava | 62 |
| 7.1 | Model a přenosové funkce soustavy | 62 |
| 7.2 | Návrh a simulace | 63 |
| 7.3 | Zkouška regulátorů | 65 |
| 7.3.1 | Zkouška PI regulátoru rychlosti | 65 |
| 7.3.2 | Polohové regulátory | 67 |
| 8 | Závěr | 70 |
| | Příklady návrhů pro náhodné soustavy | 73 |
| | Schéma zapojení reálného systému | 80 |

Seznam obrázků

| | | |
|------|--|----|
| 2.1 | Schéma otevřené smyčky | 15 |
| 2.2 | Schéma uzavřené smyčky | 15 |
| 2.3 | Bodeho charakteristika funkcí $S(j\omega)$ a $T(j\omega)$ | 18 |
| 2.4 | Trvalá regulační odchylka v ustáleném stavu pro různá zesílení k | 20 |
| 2.5 | Schéma kaskádní regulace | 21 |
| 3.1 | Ilustrace chování pružných částí | 23 |
| 3.2 | Rezonance a antirezonance v Bodeho charakteristice | 24 |
| 3.3 | Frekvenční průběh filtru typu dolní propust | 26 |
| 3.4 | Schéma tuhého systému | 27 |
| 3.5 | Schéma pružného systému | 27 |
| 3.6 | Schéma pružného systému | 28 |
| 4.1 | Aplikace PID Tuner | 30 |
| 4.2 | Hraniční křivky | 33 |
| 4.3 | Schéma zapojení PD regulátoru | 34 |
| 5.1 | Schéma tvorby hledání hranice a tvorby tabulky | 35 |
| 5.2 | Schéma funkce pro výběr regulátoru | 37 |
| 5.3 | Hrubě nalezený region | 40 |
| 5.4 | Hranice regionu | 40 |
| 5.5 | Namřížkovaný region | 41 |
| 5.6 | Vykreslení 3D grafu a vrstevnic | 44 |
| 6.1 | Ověření návrhu PI regulátoru | 47 |
| 6.2 | Přechodová charakteristika mechanických soustav | 48 |
| 6.3 | Frekvenční charakteristika mechanických soustav | 48 |
| 6.4 | Návrh PI regulátoru PID Tunerem pro $r = 1.1$ | 50 |
| 6.5 | Návrh regulátoru polohy PID Tunerem pro $r = 1.1$ | 51 |
| 6.6 | Návrh PI regulátoru H_∞ pro $r = 1.1$ | 52 |
| 6.7 | Návrh regulátoru polohy H_∞ pro $r = 1.1$ | 53 |
| 6.8 | Návrh PI regulátoru PID Tunerem pro $r = 2$ | 54 |
| 6.9 | Návrh regulátorů polohy PID Tunerem pro $r = 2$ | 54 |
| 6.10 | Návrh PI regulátoru H_∞ pro $r = 2$ | 55 |
| 6.11 | Návrh regulátorů polohy H_∞ pro $r = 2$ | 56 |
| 6.12 | Návrh PI regulátoru PID Tunerem pro $r = 6$ | 57 |
| 6.13 | Návrh regulátorů polohy PID Tunerem pro $r = 6$ | 58 |
| 6.14 | Návrh PI regulátoru H_∞ pro $r = 6$ | 59 |

| | | |
|------|---|----|
| 6.15 | Návrh polohových regulátorů H_∞ pro $r = 6$ | 60 |
| 7.1 | Reálná soustava | 62 |
| 7.2 | Schéma reálné soustavy | 62 |
| 7.3 | Bodeho charakteristika přenosů reálného systému | 63 |
| 7.4 | Návrh PI regulátoru pro reálnou soustavu | 64 |
| 7.5 | Návrh polohových regulátorů pro reálnou soustavu | 65 |
| 7.6 | Přechodová charakteristika reálného systému - rychlostní smyčka | 66 |
| 7.7 | Odezva na poruchu PI regulátor na reálném systému | 66 |
| 7.8 | Zkouška přechodu P regulátoru na reálném systému | 67 |
| 7.9 | Odezva na poruchu P regulátor na reálném systému | 68 |
| 7.10 | Zkouška přechodu PD regulátoru na reálném systému | 69 |
| 7.11 | Odezva na poruchu PD regulátor na reálném systému | 69 |
| 8.1 | Návrh PI regulátoru pro první soustavu | 73 |
| 8.2 | Návrh rychlostních regulátorů pro první soustavu | 74 |
| 8.3 | Návrh PI regulátoru pro druhou soustavu | 75 |
| 8.4 | Návrh rychlostních regulátorů pro druhou soustavu | 75 |
| 8.5 | Návrh PI regulátoru pro třetí soustavu | 76 |
| 8.6 | Návrh rychlostních regulátorů pro třetí soustavu | 76 |
| 8.7 | Návrh PI regulátoru pro čtvrtou soustavu | 77 |
| 8.8 | Návrh rychlostních regulátorů pro čtvrtou soustavu | 78 |
| 8.9 | Návrh PI regulátoru pro pátou soustavu | 78 |
| 8.10 | Návrh rychlostních regulátorů pro pátou soustavu | 79 |
| 8.11 | Schéma bloků v Rexygenu pro reálný systém | 80 |

Seznam tabulek

| | | |
|------|---|----|
| 5.1 | Ukázka tabulky | 42 |
| 6.1 | Parametry PI regulátoru navrženého PID Tunerem pro $r = 1.1$ | 50 |
| 6.2 | Parametry návrhu regulátorů polohy PID Tunerem pro $r = 1.1$ | 51 |
| 6.3 | Parametry PI regulátoru navrženého H_∞ pro $r = 1.1$ | 51 |
| 6.4 | Parametry návrhu regulátorů polohy H_∞ pro $r = 1.1$ | 52 |
| 6.5 | Parametry PI regulátoru navrženého PID Tunerem pro $r = 2$ | 53 |
| 6.6 | Parametry regulátorů polohy navržených PID Tunerem pro $r = 2$ | 54 |
| 6.7 | Parametry PI regulátoru navrženého H_∞ pro $r = 2$ | 55 |
| 6.8 | Parametry návrhu regulátorů polohy H_∞ metodou pro $r = 2$ | 56 |
| 6.9 | Parametry návrhu PI regulátoru PID Tuner pro $r = 6$ | 57 |
| 6.10 | Parametry návrhu regulátorů polohy PID Tunerem pro $r = 6$ | 57 |
| 6.11 | Parametry PI regulátoru H_∞ pro $r = 6$ | 58 |
| 6.12 | Parametry regulátorů polohy navržené H_∞ metodou pro $r = 6$ | 59 |
| 7.1 | Parametry PI regulátoru | 64 |
| 7.2 | Parametry regulátorů polohy pro reálnou soustavu | 64 |
| 8.1 | Parametry první náhodné soustavy a PI regulátoru | 73 |
| 8.2 | Parametry regulátorů polohy pro první náhodnou soustavu | 74 |
| 8.3 | Parametry druhé náhodné soustavy a PI regulátoru | 74 |
| 8.4 | Parametry regulátorů polohy pro druhou náhodnou soustavu | 75 |
| 8.5 | Parametry třetí náhodné soustavy a PI regulátoru | 76 |
| 8.6 | Parametry regulátorů polohy pro třetí náhodnou soustavu | 76 |
| 8.7 | Parametry čtvrté náhodné soustavy a PI regulátoru | 77 |
| 8.8 | Parametry regulátorů polohy pro čtvrtou náhodnou soustavu | 77 |
| 8.9 | Parametry páté náhodné soustavy a PI regulátoru | 78 |
| 8.10 | Parametry regulátorů polohy pro pátou náhodnou soustavu | 79 |

Použité symboly a zkratky

| | | |
|----------------------------------|---|---|
| P | - | Proporcionální regulátor |
| PD | - | Proporcionálně derivační regulátor |
| PI | - | Proporcionálně integrační regulátor |
| PID | - | Proporcionálně integračně derivační regulátor |
| IE | - | Integrální kritérium z odchylky od regulované veličiny |
| IAE | - | Integrální kritérium z absolutní odchylky od regulované veličiny |
| ISE | - | Integrální kritérium z čtvercové odchylky od regulované veličiny |
| ITAE | - | Integrální kritérium z absolutní odchylky od reg. vel. vážené časem |
| T(s) | - | Komplementární citlivostní funkce uzavřené smyčky systému |
| S(s) | - | Citlivostní funkce uzavřené smyčky systému |
| PS(s) | - | Vstupní citlivostní funkce |
| CS(s) | - | Citlivostní funkce řízení |
| P(s) | - | Přenosová funkce systému |
| C(s) | - | Přenosová funkce regulátoru |
| g_m | - | Index bezpečnosti v zesílení |
| P_m | - | Index bezpečnosti ve fázi |
| s_m | - | Index bezpečnosti ve stabilitě |
| M_s | - | Požadavek funkce S(s) |
| M_t | - | Požadavek funkce T(s) |
| M_{t₁} | - | Požadavek na přenos na straně zátěže |
| K₀ | - | Zesílení otevřené smyčky |
| e(t) | - | Regulační odchylka |
| u(t) | - | Generovaný výstup z regulátoru |
| k_p | - | Proporcionální zesílení regulátoru |
| k_i | - | Integrální zesílení regulátoru |
| k_d | - | Derivační zesílení regulátoru |
| T_f | - | Filtrační složka u PID regulátoru |
| CNC | - | Počítačově řízený (Computer Numerical Control) |
| ABS | - | Systém proti zablokování kol (Anti-lock Brake System) |
| MCU | - | Řídící jednotka (MicroController Unit) |
| Hz, rad/s | - | Jednotky frekvence |
| T_i | - | Časová konstanta motoru / přenos uzavřené smyčky aktuátoru |
| P_m | - | Přenos mechanické části motoru |
| T_m | - | Časová konstanta mechanické části motoru |
| P_f | - | Přenos filtru |
| T_f | - | Časová konstanta filtru |

| | |
|-------------------|---|
| \mathbf{P}_c | - Přenos tuhého systému |
| M_1, M_2 | - Hmoty v modelu kmitavé soustavy |
| \mathbf{k} | - Parametr tuhosti soustavy |
| \mathbf{b} | - Parametr tlumení soustavy |
| ξ | - Parametr tlumení přenosů |
| ω_z | - Frekvence antirezonance |
| \mathbf{r} | - Rezonanční poměr |
| \mathbf{P}_{rm} | - Kmitavý přenos na straně motoru |
| \mathbf{P}_{rl} | - Kmitavý přenos na straně zátěže |
| 2DoF | - Dva stupně volnosti(2 Degree of freedom) |
| ω_b | - šířka pásma |
| \mathbf{a}_z | - charakteristický polynom uzavřené smyčky |
| \mathbf{a}_z^* | - požadovaný charakteristický polynom uzavřené smyčky |
| \mathbf{P}_{m1} | - Přenos motoru reálné soustavy |
| \mathbf{P}_{m2} | - Přenos zátěže reálné soustavy |

1. Úvod

Tato bakalářská práce se zaměřuje na problematiku automatického návrhu PID kaskádní regulace pro poddajné mechanické soustavy. Nejprve proběhne seznámení se základy zpětnovazebního řízení, PID regulace, elektromechanickými soustavami a jejich chováním a také budou popsány automatické metody. Na základě této části bude vytvořen skript pro automatický návrh regulátoru a dále bude vyzkoušen a srovnán s PID Tunerem. V závěru práce je skript vyzkoušen na skutečném systému. V příloze jsou příklady návrhů pro soustavy s náhodnými parametry.

1.1 Motivace

Cíle dnešní společnosti by bylo možné vyjádřit několika slovy, která zní: rychleji, levněji, efektivněji a s menším dopadem na životní prostředí. To se také projevilo v průmyslu, kde se společnosti pokouší posouvat dosud možné limity a to tím, že se snaží vyrábět co nejrychleji, nejlevněji a co největší množství výrobků. Většina výrobních linek je zautomatizovaná díky elektromechanickým systémům, které se neustále zrychlují a odlehčují, aniž by se nějak výrazně zvětšovala jejich tuhost. Důsledkem toho může docházet k jejich nebezpečnému chování vůči sobě i svému okolí. Cílem tedy je vyvarovat se tomuto chování v podobě vibrací a vytvářet tak řídicí systémy, které budou velmi rychlé, ale zároveň dostatečně bezpečné a šetrné k řízeným soustavám.

V oblasti automatizace se také objevuje problém v podobě nedostatku řídicích inženýrů, kdy poptávka mnohonásobně převyšuje nabídku. Tento problém se řeší zjednodušováním návrhu regulátorů například automatickými metodami, kdy sami kontrolní inženýři tvoří metody, které alespoň z části nahradí jejich práci.

Shrne-li se daný popis trendů a problémů je potřebné vytvořit metodu, která bude schopna sama navrhnout vhodný regulátor pro elektromechanickou soustavu, tak aby řídicím inženýrům ušetřila čas a bylo možné provozňovat větší množství řídicích systémů.

1.2 Popis problému

Při návrhu regulátoru pro tuhé mechanické systémy je možné postupovat stejně jako pro kterýkoliv jiný systém a je možné použít širokou škálu návrhových metod. Problém nastává v momentě, kdy je systém poddajný a kmitavý. U těchto systémů nastává jev, kdy se jedna strana systému pohybuje jinak než strana druhá. U elektromechanických soustav obvykle jedna strana představuje motor a druhá strana představuje zátěž. Tyto části jsou spojené určitým flexibilním prvkem, který umožňuje rozdílné chování obou stran. Pro tento případ flexibilních systémů musí návrhář kontrolovat pohyb na obou stranách tak, aby bylo dosaženo požadovaného chování uzavřené smyčky.

Existuje několik metod a aplikací, které umožňují automatický návrh regulátorů, například [11], [4], [15]. Problémem těchto metod je, že nejsou připravené na poddajné systémy a při návrhu neberou v potaz chování zátěže, které nemusí být měřené.

Problém je možné nadefinovat tak, že je potřebné vytvořit automatickou metodu, která při návrhu bude brát v potaz chování soustavy na obou stranách. Tato metoda by měla být schopna nalézt parametry PI regulátoru rychlosti a P regulátoru polohy tak, aby bylo dosaženo stabilního a požadovaného chování.

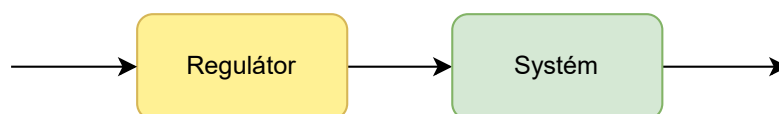
2. Úvod do řízení

Cílem řízení je ovládat kontrolovaný systém. V praxi se lze setkat s mnoha takovými systémy, které je potřeba řídit. Ty se podle knihy [2] vyskytují v oborech jako je autodoprava, letectví, chemický průmysl, potravinářství nebo také ve strojírenství, kam patří hlavně elektromechanické soustavy. Úkolem návrháře řízení je vytvoření takového regulátoru, který dokáže ovládat daný systém spolehlivě a přesně tak, aby nedocházelo k nechtěnému nebo případně nestabilnímu chování uzavřené smyčky.

2.1 Regulační smyčka

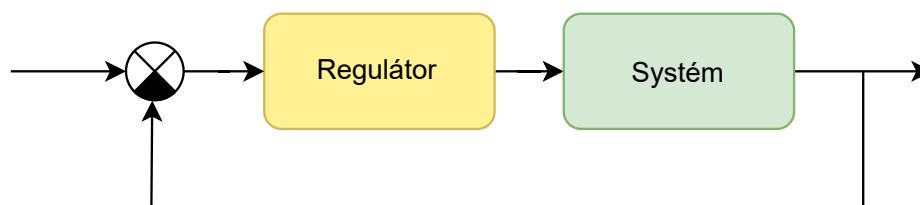
Základem řídicího systému je regulační smyčka, která je složena ze řízeného systému a regulátoru. Úlohou regulátoru je ovlivňovat řízený systém, tak aby bylo dosaženo očekávaného chování celé smyčky.

Jednodušší variantou je otevřená regulační smyčka bez uzavřené zpětné vazby na obrázku (2.1). V tomto případě regulátor ovlivňuje řízený systém a nemá žádnou informaci o tom, v jakém stavu se řízený systém aktuálně nachází. Takto realizovaná regulační smyčka nemůže dosáhnout takové kvality regulace jakou dosahuje uzavřená regulační smyčka znázorněna na obrázku (2.2), která se v praxi používá mnohonásobně více.



Obrázek 2.1: Schéma otevřené smyčky

Hlavním rozdílem uzavřené regulační smyčky oproti otevřené je záporná zpětná vazba. Ta ze systému vstupuje zpět do regulátoru a předává tak informaci o tom v jaké stavu se řízený systém nachází. Může podle toho zajistit přesnou regulaci. Tento typ regulační smyčky je možné pozorovat u většiny biologických systémů a jak je uvedeno v [2], jedná se o systémy od úrovně molekul až po celé ekosystémy. Velmi známým příkladem je model predátor-kořist.



Obrázek 2.2: Schéma uzavřené smyčky

2.2 Důležité zpětnovazební přenosy

Zpětnovazební řídicí smyčku je možné charakterizovat čtyřmi základními zpětnovazebními přenosy, podle [2] také přezdívanými jako gang 4. Tyto přenosy jsou popsány v rovnicích 2.1-2.4, kde $P(s)$ představuje přenos řízeného systému a $C(s)$ představuje regulátor. Nejčastěji využívanou funkcí je komplementární citlivostní funkce $T(s)$ popsána rovnicí 2.1, ta popisuje přechod ze vstupu na výstup a běžně se používá k vyšetření stability uzavřené smyčky, k výpočtu přechodové charakteristiky uzavřené smyčky nebo se na ni vytváří návrhové požadavky.

$$T(s) = \frac{C(s)P(s)}{1 + C(s)P(s)} \quad (2.1)$$

Druhou velmi častou funkcí je citlivostní funkce $S(s)$, která je popsána rovnicí 2.2. Tento přenos popisuje výstupní poruchu působící na regulační smyčku a z Bodeho charakteristiky této funkce je možné posoudit schopnost systému vypořádat se s poruchami. Na tento přenos se obdobně jako u funkce $T(s)$ vytváří návrhové požadavky.

$$S(s) = \frac{1}{1 + C(s)P(s)} \quad (2.2)$$

Méně obvykle užívanou funkcí je citlivostní funkce řízení $CS(s)$ (rovnice 2.3), která popisuje velikost akčních zásahů regulátoru na řízený systém.

$$CS(s) = \frac{C(s)}{1 + C(s)P(s)} \quad (2.3)$$

Posledním přenosem z gangu 4 je vstupní citlivostní funkce $PS(s)$ (rovnice 2.4). Tento přenos popisuje schopnost systému reagovat na vstupní poruchu. Z přenosu $PS(s)$ je tedy možné určit zesílení vstupní poruchy a dobu její kompenzace. Tento přenos je důležitý u elektromechanických systémů (kapitola 3), kde se vstupní porucha projeví při zatížení systému.

$$PS(s) = \frac{P(s)}{1 + C(s)P(s)} \quad (2.4)$$

2.3 Požadavky na uzavřenou smyčku

Elementárním požadavkem na uzavřenou smyčku je stabilita celého systému, pokud by nebyla splněna tato podmínka, nemá smysl takovou smyčku vůbec uzavírat. Způsobů, jak vyšetřit stabilitu systému je několik, avšak vždy platí, že žádný pól se nesmí nacházet v pravé komplexní polorovině, tedy nesmí mít kladnou reálnou část.

Požadavky na bezpečnost ve stabilitě a ve fázi

Při návrhu řídicích systémů je požadavkem dodržet dostatečnou bezpečnost v zesílení, ve fázi a ve stabilitě. Tyto požadavky zaručují, že uzavřená smyčka zůstane stabilní i přes nepřesný model nebo přítomnost šumu.

Bezpečnost v zesílení je podle [12] definované vztahem 2.5, kde K_0 je aktuální zesílení otevřené smyčky řízeného systému a regulátoru, v praxi se běžně požaduje $g_m > 2$. Index g_m tedy vyjadřuje, kolikrát je možné zesílit systém, než se dostane na mez stability.

$$g_m = 1/K_0 \quad (2.5)$$

Bezpečnost ve fázi p_m se podle [12] definuje jako fáze, o kterou je potřeba otevřenou smyčku zpozdít, aby se dostala na mez stability, v praxi se požaduje, aby byl tento index $p_m > 40^\circ$.

Posledním indexem je bezpečnost ve stabilitě s_m , která je kombinací bezpečnosti ve fázi a v zesílení. Tento index udává jak moc je potřeba zesílit systém a posunout fázi, aby se systém dostal na mez stability. Tento index je podle [12] definován jako nejmenší vzdálenost frekvenční charakteristiky od kritického bodu $[-1 \ j0]$ a požaduje se $s_m > 0.5$.

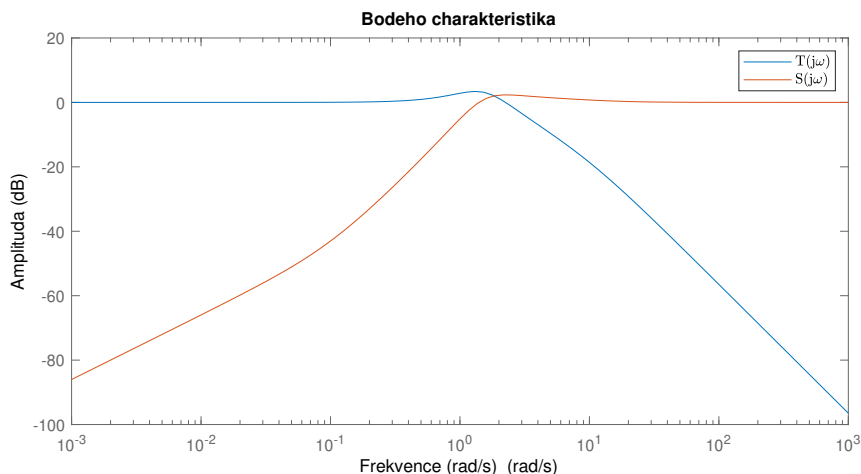
Požadavky na $T(s)$ a $S(s)$

Požadavky na bezpečnost v zesílení, ve fázi a ve stabilitě, popsané v předchozí části 2.3 je částečně možné nahradit požadavky na frekvenční odezvu citlivostních funkcí $T(s)$ a $S(s)$. Frekvenční charakteristika funkcí $S(s)$ a $T(s)$ a její charakteristický průběh je znázorněn na obrázku 2.3.

Pro frekvenční přenos citlivostní funkce $T(s)$ se formuluje požadavek M_t , který zaručí, že přechodová smyčka uzavřeného systému bude minimálně kmitat.

Frekvenční přenos Komplementární citlivostní funkce $S(s)$ se omezuje požadavkem M_s , který zajistí, že uzavřená smyčka nebude zesilovat poruchy a bude je vhodně kompenzovat. Je také možné říct, že čím menší hodnota M_s , tím méně bude systém kmitat při kompenzaci poruchy. Požadavek M_s se v návrhových úlohách omezuje na hodnotu 2. Tato hodnota je odvozena z indexu bezpečnosti ve stabilitě, který je definovaný $s_m > 0.5$. V publikaci [12] je ukázána platnost rovnice 2.6, díky které lze považovat požadavky s_m a M_s za ekvivalentní.

$$s_m = \frac{1}{\sup |(S(j\omega))|} \quad (2.6)$$

Obrázek 2.3: Bodeho charakteristika funkcí $S(j\omega)$ a $T(j\omega)$

2.4 Hodnocení kvality navrženého řízení

Různé regulátory vedou na různé uzavřené smyčky a je potřeba tyto regulátory srovnat mezi sebou. K tomu je v časové oblasti možné využít parametry jako je velikost překmitu, doba regulace nebo schopnost dosažení požadované hodnoty. Tyto parametry je možné sloučit a vytvořit tak kritéria, díky kterým je možné regulátory srovnat na základě jedné hodnoty. Všechna zde uvedená kritéria využívají přechodové charakteristiky a jejich rovnice pochází ze skript [13].

Nejjednodušším kritériem, které je možné použít je kritérium IE popsané rovnicí 2.7. Toto kritérium je vhodné pouze pro srovnání systémů bez překmitu, kdy funkce regulační odchylky od požadované hodnoty $e(t)$ nemění znaménko, jinak se stane, že hodnoty nad požadovanou hodnotou a pod požadovanou hodnotou se budou odečítat mezi sebou a kritérium bude mít mnohem nižší hodnotu, než by mělo mít.

$$IE = \int_0^{\infty} e(t) dt \quad (2.7)$$

Dalším běžně využívaným kritériem je ISE , rovnice 2.8. Oproti kritériu IE je možné použít i pro srovnání systémů s překmitem, protože v tomto případě se změna znaménka neprojeví.

$$ISE = \int_0^{\infty} (e(t))^2 dt \quad (2.8)$$

Obdobným kritériem jako je ISE je kritérium IAE , rovnice 2.9, kde absolutní hodnota z odchylky má obdobnou funkci jako druhá mocnina u kritéria ISE .

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (2.9)$$

Posledním kritériem je $ITAE$, rovnice 2.10, které se od ISE liší tím, že se váží časem. Toto kritérium zvýhodňuje systémy s rychlejší dobou odezvy a je tedy vhodné, pokud je cílem

navrhnout agresivní regulátor.

$$ITAE = \int_0^{\infty} t|e(t)| dt \quad (2.10)$$

2.5 PID regulace

V praxi automatického řízení je podle [1] stále nejčastěji používaný proporčně integračně derivační regulátor - zkratka PID. To potvrzuje možnost se s ním velmi běžně setkat při řízení teploty kotle nebo tepelného čerpadla v moderních domácnostech. PID regulátor má v teorii řízení obvykle tři parametry, které je potřeba naladit. V časové oblasti lze podle [2] popsat PID regulátor rovnicí 2.11.

$$u(t) = k_p \cdot e(t) + k_i \cdot \int_0^t e(t) dt + k_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (2.11)$$

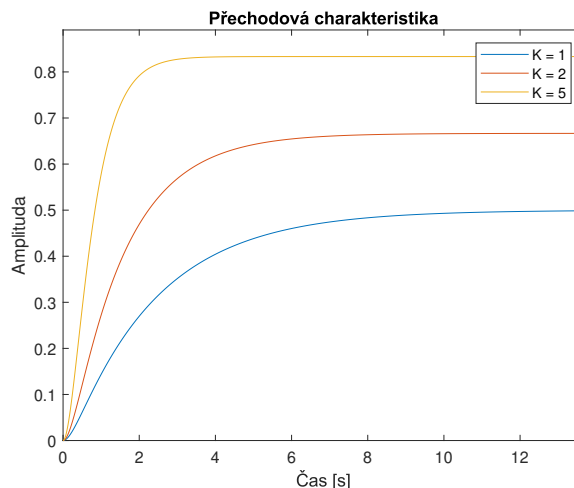
Z rovnice 2.11 lze přejít z časové oblasti do oblasti obrazů, to se provádí pomocí Laplaceovy transformace a přenos regulátoru je podle [2] možné popsat rovnicí 2.12.

$$PID(s) = k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s \quad (2.12)$$

P regulátor

V publikaci [1] je popsán historický vývoj PID regulátoru, kdy v minulosti tím jak vznikala potřeba řídit různé systémy, vzrůstala potřeba regulátoru, který by je byl schopen uřídit. Nejprve se používalo řízení reléové, neboli zapnuto/vypnuto, kdy bylo možné použít pouze minimální nebo maximální akční zásah. Toto řízení se podle [1] neukázalo jako úplně ideální, a proto vznikl P regulátor, který odpovídá proporcionální složce k_p u PID regulátoru. P regulátor se v praxi svým chováním blíží k reléovému regulátoru v případě, že je v systému velký rozdíl mezi požadovanou a regulovanou veličinou.

Pozorováním chování P regulátoru je možné zjistit, že s větším zesílením se zmenšuje trvalá regulační odchylka v ustáleném stavu, obrázek 2.4. U P regulátoru se tato odchylka vyskytuje téměř vždy, není těžké zjistit, že zesílení by muselo být nekonečné proto, aby byla tato chyba nulová. Ve skutečnosti však existuje případ, kdy se nevyskytuje trvalá regulační odchylka a to v situaci, kdy je řízený systém s astatismem alespoň 1. stupně. Další vlastností podle [13] je neschopnost kompenzovat konstantně působící poruchy a zesílení šumu s rostoucím zesílením regulátoru.



Obrázek 2.4: Trvalá regulační odchylka v ustáleném stavu pro různá zesílení k

PI regulátor

Vzhledem k tomu, že podle [1] bylo potřeba kompenzovat konstantní poruchy a trvalou regulační odchylku v ustáleném stavu, přidala se k P regulátoru integrační složka, což vedlo ke vzniku PI regulátoru. Jak už bylo naznačeno, hlavním úkolem integrační složky je podle [13] kompenzovat konstantní poruchy a trvalou regulační odchylku. Tato složka má také schopnost potlačovat šum na vysokých frekvencích.

Funkci této složky lze objasnit tak, že integruje a zvětšuje tak akční zásah, dokud není dosaženo nulové regulační odchylky.

PID regulátor

Posledním parametrem PID regulátoru je derivační složka k_d . Na tuto složku lze nahlížet dvěma způsoby a to tak, že zlepšuje bezpečnost ve stabilitě nebo zvětšuje šířku pásma regulace, čehož je dosaženo zavedením fázového předstihu. Derivační složka podle [13] také zvětšuje šum na vysokých frekvencích.

Ideální PID regulátor, tak jak je popsán v rovnici 2.12, je fyzikálně nerealizovatelný kvůli derivační složce. Z tohoto důvodu se přidává filtrační složka a vzniká tak regulátor s přenosem v rovnici 2.13. Díky přidání pólu v podobě filtrační složky je možné PID regulátor realizovat, tato složka podle [13] tlumí vysokofrekvenční šum a zlepšuje tak kvalitu regulace.

$$PID(s) = k_p + \frac{k_i}{s} + \frac{k_d s}{T_f s + 1} \quad (2.13)$$

Popis PID regulátoru, který je uveden v rovnici 2.12 není jediným, používá se vícero popisů. Je tedy důležité regulátor implementovat se správnými parametry, které je v případě potřeby nutné přepočítat podle formy PID regulátoru. Příklad jiného popisu je v rovnici 2.14

nebo popis, který je v komerčních regulátorech je popsán rovnicí 2.15.

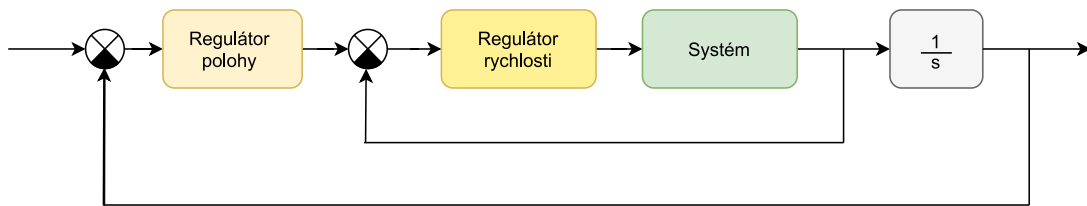
$$PID(s) = K \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (2.14)$$

$$PID(s) = K \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) (1 + T_d s) \quad (2.15)$$

2.6 Kaskádní regulace

Na uzavřenou smyčku jsou často kladené velmi přísné požadavky, které může být nemožné splnit za pomoci jednoduchého regulátoru. Cílem je tedy vytvořit takový řídicí systém, který je dostatečně jednoduchý, ale zároveň schopný splnit náročné požadavky. Toho je podle [1] možné splnit pomocí kaskádní PID regulace, která se svým chováním blíží stavovému regulátoru. Princip kaskády je popsán v [1], kdy existuje více měření na jednu regulovanou veličinu a každý z PID regulátorů reaguje na jednu z těchto veličin.

U mechatronických systémů se dle [6] využívá kaskádní regulace k řízení polohy a rychlosti, kdy je přímo měřena rychlost na straně zátěže a poloha je získána integrací rychlosti. Příklad zapojení kaskádní regulace je vykreslen na obrázku 2.5. V kaskádní regulaci se využívá více zpětných vazeb, kdy pro každý regulátor existuje jedna zpětná vazba.



Obrázek 2.5: Schéma kaskádní regulace

V obrázku 2.5 jsou uzavřené dvě zpětné vazby, ta vnitřní uzavírá rychlostní smyčku, která plní několik funkcí. Jako regulátor rychlosti se podle [18] obvykle používá PI regulátor nebo podle [6] je možné využít i PID regulátor. Úkolem tohoto regulátoru je podle [6] kompenzovat vnější poruchy, což u mechanických soustav může být tření, zatížení soustavy nebo působení gravitace.

Vnější smyčka z obrázku 2.5 je polohová, v tomto případě regulátor vidí vnitřní smyčku jako systém, který má řídit. Výstupem vnitřní smyčky je rychlost, proto se musí za tuto smyčku připojit integrátor, který převádí rychlost na polohu. Hlavním úkolem regulátoru polohy je přesně polohovat řízený systém.

Výhodou kaskádní regulace je postupné uzavírání smyček, které také umožňuje postupné hledání parametrů. Jakmile je odladěna jedna smyčka, je možné přistoupit k ladění smyčky druhé. To je snazší než kdyby se musely odladit všechny smyčky najednou.

3. Elektromechanická soustava

Elektromechanické systémy lze rozdělit na dvě části a to mechanickou a elektronickou. Typickým zástupcem takového systému je elektromotor, ve kterém lze nalézt čistě elektrické části, jako je vinutí, stejně tak jako mechanické, například hřídel, ložiska rotoru nebo převodovku. Zástupcem složitějšího elektromechanického systému může být podle [6] robotický manipulátor nebo CNC obráběcí stroj. Jiným příkladem je podle [7] systém ABS u automobilů, kde brzdy lze považovat jako mechanickou část a řízení celého systému jako elektronickou část.

3.1 Elektrické části

Jiné rozdělení elektromechanických soustav by mohlo být na pomalou část a rychlou část. Elektronická část systému je schopna pracovat v řádu milisekund a lze ji považovat za velmi rychlou. Součástí této části jsou obvykle senzory, řídicí jednotka označovaná jako MCU a lze sem také zařadit elektrickou část akčních členů.

Senzory

U elektromechanických soustav se využívá několik druhů senzorů. Nejčastěji se podle [8] využívají polohové a rychlostní senzory, to platí hlavně pro servopohony, které se bez zpětné vazby neřídí. U rychle otáčejících se strojů se dle [9] v průmyslu používají akcelerometry, které slouží k měření vibrací, což může sloužit k detekci chyb.

Akční členy

Cílem akčních členů je podle [8] převádět elektrický signál na akční zásah v podobě momentu, rychlosti atd. Akční členy elektromechanických soustav jsou dle [6] ve většině případů elektromotory, existuje několik druhů těchto motorů, na střídavé i stejnosměrné napětí, synchronní i asynchronní. Mezi tyto akční členy patří i servopohony, které se využívají v mechatronice.

Servopohony jsou navrženy pro aplikace, kdy je potřebné pohon přesně polohovat. Servopohon má od klasického elektromotoru motoru rozdílné využití. Rozdíl mezi těmito pohony je dobře patrný v modelářství, kde jsou servopohony i klasické elektromotory široce rozšířené. Servopohony se používají obvykle pro řízení modelu a klasické elektromotory se používají jako hnací dopředná síla, která uvádí model do pohybu.

Řídicí jednotka

MCU je zkratkou pro mikropočítač nebo řídicí jednotku. Úkolem této jednotky je přijímat signály ze senzorů a generovat na základě přijatých signálů potřebné řízení. V dnešní době

se dle [3] objevují ve velkém množství aplikací a trend jejich používání stále narůstá.

3.2 Mechanické části

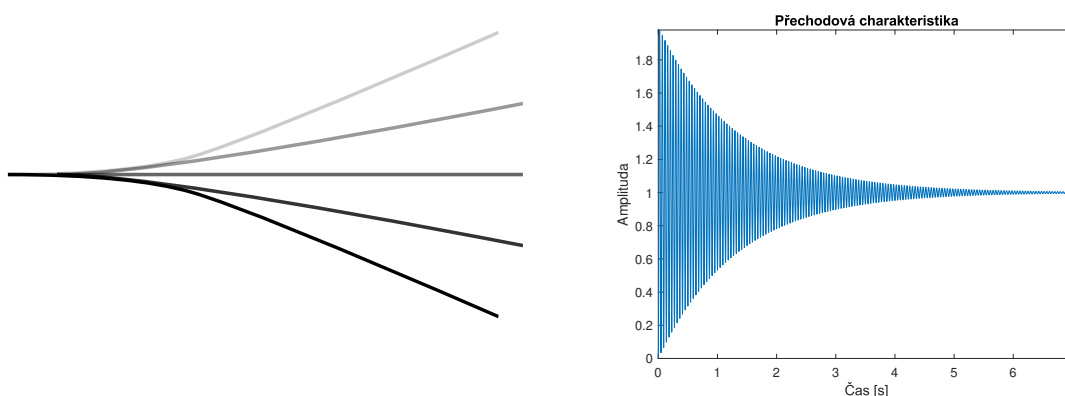
Do pomalé části elektromechanických systémů lze zařadit mechanickou část akčních členů a řízený systém, což je u robotických manipulátorů obvykle rameno, u systému ABS jsou to kotouče a třmeny brzd s destičkami. Odezva těchto mechanických částí může trvat i vteřiny a je tedy mnohem delší než u elektronických částí.

Pružnost mechanických částí

Přirozenou vlastností některých mechanických systémů je jejich pružnost, která způsobuje kmitání těchto systémů. Materiály je dle [14] možné rozdělit na pružné a křehké. Typickým zástupcem takového pružného materiálu je dle [14] ocel, která je velmi kmitavá, opakem je litina, která se nerozkmitá, ale velmi brzy praskne pokud je na ni působeno silou.

Chování pružných systémů je nastíněno v dvojici obrázků 3.1. Na prvním z této dvojice je vidět vlastnost, kdy vychýlení pružné části systému způsobí slabě tlumené kmitání dané komponenty na obě dvě strany. Pokud se na tuto mechanickou část bude pohlížet jako na systém, přechodová charakteristika by mohla vypadat tak jako je zobrazeno ve druhém obrázku z dvojice 3.1.

Vysoká kmitavost systémů omezuje a komplikuje návrh regulátoru. Zvětšuje se také riziko nestability celého systému a tedy poškození nebo zničení řízeného stroje.



Obrázek 3.1: Ilustrace chování pružných částí

Rezonance

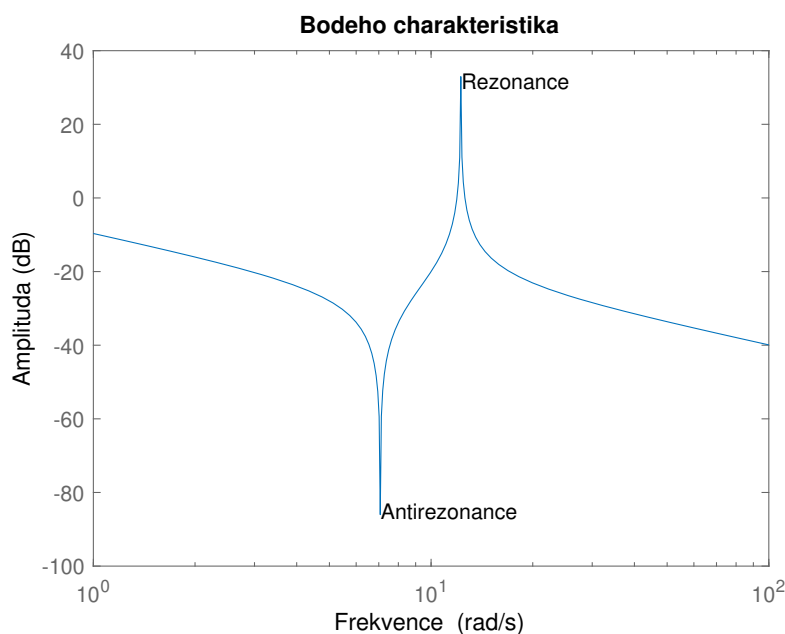
U kmitavých mechanických systémů je možné se setkat s rezonancí. Tento jev se dle [20] projevuje zesílenou amplitudou na vlastních frekvencích, kterým se říká rezonanční frekvence

nebo také vlastní frekvence. Podle [20] je velikost rezonance závislá na velikosti útlumu, kdy velký útlum znamená malé kmitání.

Rezonance je zobrazena v grafu 3.2. Při návrhu regulátoru by tento jev neměl být zanedbán, protože by to při řízení mohlo způsobit nechtěné chování uzavřené smyčky nebo vést k nestabilitě. Podle [17] může být flexibilita mechanických systémů způsobena převody mezi hřídelí motoru a stranou zátěže, kdy se kmitání objevuje již od 30Hz po 300Hz. Jiným příkladem zdroje flexe může být podle [19] extrémně těžká zátěž.

Antirezonance

Opačným jevem k rezonanci je antirezonance, což je utlumení amplitudy na určitých frekvencích. Tento jev je zobrazen v grafu 3.2, kdy je méně nebezpečný než je tomu v případě rezonance, ale může také způsobit nechtěné chování regulační smyčky.



Obrázek 3.2: Rezonance a antirezonance v Bodeho charakteristice

3.3 Požadavky na řízení elektromechanické soustavy se servopohonem

V části 2.3 je popsáno, jaké se obecně kladou požadavky na uzavřenou smyčku. Tyto požadavky musí splňovat i smyčka s elektromechanickou soustavou. Pro zajištění správného fungování elektromechanické soustavy se definují další požadavky:

- **Co nejrychlejší doba regulace.** Je to kvůli tomu, aby stroj pracoval co nejrychleji a v případě, že je zapojen v továrně v sériové lince nebrzdil výrobu a zvládl zpracovat

tak co největší množství úkolů. Podle [17] může být požadovaná šířka pásma regulátoru více než 100Hz.

- **Přechodová charakteristika u polohy dané soustavy nesmí obsahovat překmit.** Tento požadavek je velmi důležitý, pokud by existoval překmit, stroj by mohl narážet do věcí se kterými má pracovat a mohlo by tak dojít k poškození výrobku nebo stroje. Z toho vyplývá, že dodržet tento požadavek je zásadní.
- **Systém by měl dobře kompenzovat vstupní poruchy.** U systémů řízených servo pohony, což jsou obvykle robotické manipulátory nebo CNC stroje, pravidelně dochází k zatěžování soustavy tím, že stroj něco uchopí nebo tím, že něco opracovává (brousí, řeže, vrtá). Toto zatížení představuje v řízení vstupní poruchu, popsanou přenosem 2.4. Vzhledem k tomu, že stroj je neustále zatěžován, řízený systém je také neustále zatěžován vstupními poruchami. Podle [18] je úkolem rychlostní smyčky kompenzovat poruchy, které vznikají zatížením soustavy.
- **Regulátor by měl tlumit vibrace systému.** Problematika pružnosti systémů byla popsána v části 3.2. Vibrace je důležité tlumit z toho důvodu, aby nedocházelo k nechtěnému chování soustavy, což by mohlo vést k poškození stroje nebo věcí v okolí. Tato problematika byla popsána ve velkém množství publikací jako [17], [18], [6], [5],[21].

3.4 Model tuhé soustavy

Model tuhé elektromechanické soustavy se skládá z vícero částí a tedy i přenosů. Tyto přenosy lze vytvářet postupně. Je vhodné nejprve začít od úplně vnitřních částí modelu.

Model akčního členu

Úplně vnitřní smyčku představuje model aktuátoru. Ten se podle [6] skládá z uzavřené smyčky PI regulátoru a servopohonu, kdy dynamiku elektrické části servopohonu lze popsat přenosem prvního řádu v rovnici 3.1, kde T_i představuje časovou konstantu motoru. PI regulátor je popsán přenosem 3.2. Tento regulátor je podle [6] zodpovědný za řízení momentu motoru.

$$P(s) = \frac{1}{T_i s + 1} \quad (3.1)$$

$$PI(s) = k_p(s) + \frac{k_i(s)}{s} \quad (3.2)$$

Uzavřená smyčka PI regulátoru a modelu akčního členu může být označena přenosem $T_i(s)$ a je dále využita při tvorbě modelu soustavy.

Mechanická zátěž

Součástí tuhého systému je mechanická část motoru na obrázku 3.4 popsaná blokem Mechanická zátěž. Tuto část lze podle [6] popsat přenosem prvního řádu, rovnice 3.3. Časová konstanta T_m je o řád větší než tomu bylo u časové konstanty elektrické části motoru T_i . Mechanická část odpovídá pomalé části elektromechanických soustav.

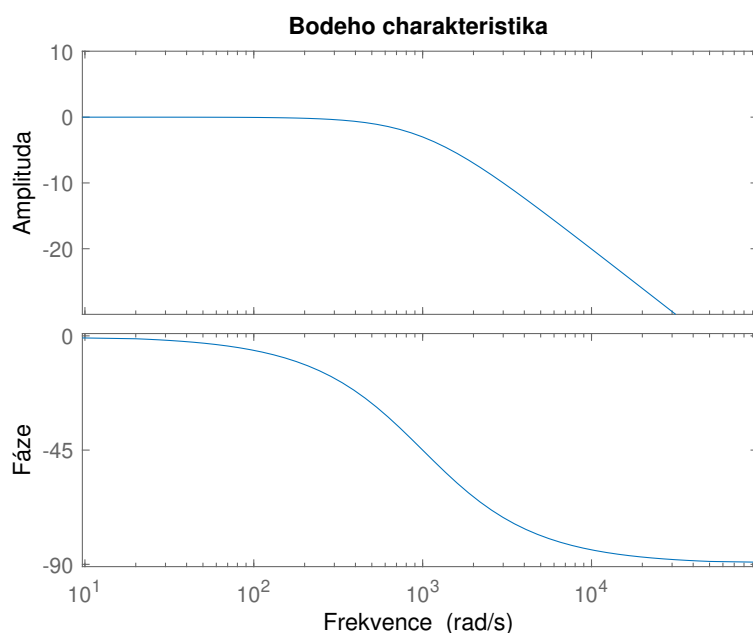
$$P_m(s) = \frac{1}{T_m s + 1} \quad (3.3)$$

Filtr

Poslední přenos z obrázku 3.4 reprezentuje frekvenční filtr prvního řádu typu dolní propust. Filtr je možné podle [6] popsat přenosem 3.4, kde T_f je časová konstanta. Tato konstanta určuje od jaké frekvence filtr začíná tlumit.

$$P_f(s) = \frac{1}{T_f s + 1} \quad (3.4)$$

Typický průběh filtru typu dolní propust s $T_f = 0.001$ je zobrazen na obrázku 3.3, kde je patrné, že útlum začíná od frekvence 10^3 rad/s . Tento filtr se obvykle používá k potlačení šumu, který obvykle působí na vysokých frekvencích.



Obrázek 3.3: Frekvenční průběh filtru typu dolní propust

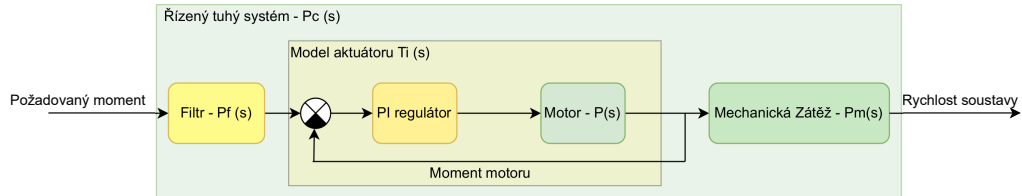
Celý tuhý systém

Schéma celého tuhého modelu je v obrázku 3.4. Jsou zde vyobrazené vazby mezi jednotlivými přenosy. Celkový přenos tuhého systému lze vypočítat s využitím algebry blokových

schémat, kdy výsledný přenos je popsán v rovnici 3.5

$$P_c(s) = P_f(s) \cdot T_i(s) \cdot P_m(s) = \frac{k_p s + k_i}{(T_m s + 1)(T_i s^2 + s(k_p + 1) + k_i)(T_f s + 1)} \quad (3.5)$$

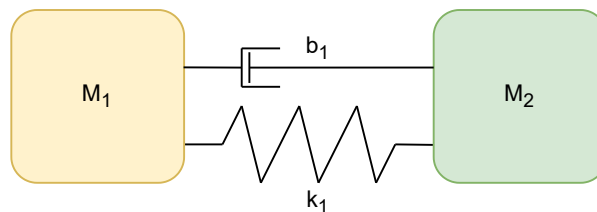
Výsledný přenos $P_c(s)$ lze zapojit do kaskádní regulace a navrhnout pro něj regulátory rychlosti a polohy.



Obrázek 3.4: Schéma tuhého systému

3.5 Model pružné soustavy

Obdobně jako tomu bylo u tuhého systému, tak i u pružného systému se nachází několik přenosových funkcí, které jsou zapojené za sebou. Součástí pružné soustavy je tuhý systém, který je doplněn o dva kmitavé přenosy. Tyto dva kmitavé přenosy vychází z obecného modelu dvou hmotové soustavy spojené pružinou a tlumičem, čímž se aproximuje jeden kmitavý mód soustavy. Pro větší zobecnění modelu lze využít více hmotová soustava, která bude propojena pružinami.



Obrázek 3.5: Schéma pružného systému

V této práci se nevyužívají parametry tuhost k , tlumení b a hmoty M_1 a M_2 , ale parametry tlumení ξ_z , antirezonance ω_z a rezonančního parametru r . Tyto parametry je možné získat podle [6] za použití vztahů 3.6-3.8. Využívat přepočítané parametry je výhodné v tom, že udávají informace o chování systému ve frekvenčním spektru.

$$\xi_z = \sqrt{\frac{b^2(M_1 + M_2)}{4kM_1M_2}} \quad (3.6)$$

$$\omega_z = \sqrt{\frac{k(M_1 + M_2)}{M_1M_2}} \quad (3.7)$$

$$r = \sqrt{1 + \frac{M_2}{M_1}} \quad (3.8)$$

Kmitavá část u motoru

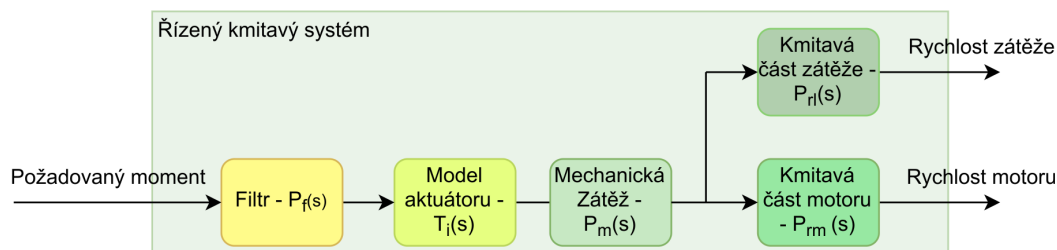
Prvním kmitavým přenosem je kmitavá část u motoru, tento přenos představuje chování soustavy na straně motoru. Jedná se také o přenos, jehož výstup je měřený senzory a je od něj zapojena zpětná vazba. Na základě tohoto měření většinou pracuje regulátor. Přenos je podle [6] popsán rovnicí 3.9, kde ξ_z představuje konstantu tlumení, ω_z frekvenci antirezonance a rezonanční parametr r , který představuje různé poměry mezi frekvencemi rezonance a antirezonance.

$$P_{rm}(s) = \frac{(s^2 + 2\xi_z\omega_z s + \omega_z^2)r^2}{s^2 + 2\xi_z\omega_z r^2 s + \omega_z^2 r^2} \quad (3.9)$$

Kmitavá část u zátěže

Druhý kmitavý přenos modeluje chování mechanické soustavy na straně zátěže, tedy na opačné straně než působí motor. Ačkoliv je tato část pevně spojena s motorem, flexibilita materiálu způsobí, že se jedna strana chová odlišně od strany druhé. Z tohoto přenosu je vyveden druhý výstup celé soustavy, nemusí být měřený a někdy ani není možné tuto stranu měřit, regulátor potom nemá žádnou informaci z této strany. Přenos na straně zátěže je podobný přenosu u motoru 3.9. Rozdílem je absence jedné nuly, rovnice tohoto přenosu je podle [6] popsána 3.10, parametry ξ_z, ω_z a r jsou stejné jako v rovnici 3.9.

$$P_{rl}(s) = \frac{(2\xi_z\omega_z s + \omega_z^2)r^2}{s^2 + 2\xi_z\omega_z r^2 s + \omega_z^2 r^2} \quad (3.10)$$



Obrázek 3.6: Schéma pružného systému

Vliv parametrů na chování systému

Jak již bylo popsáno oba dva kmitavé přenosy popisující systém jsou charakterizovány třemi parametry. Prvním parametrem je konstanta tlumení ξ . Pozorováním je možné zjistit, že čím menší hodnota ξ je, tím méně je systém tlumený a více kmitá. Podle [18] se kmitavý systém přibližuje tuhému systému za podmínky, že $\xi > 1$.

Druhý parametr ω určuje frekvenci, kde se nachází antirezonance. Na tuto frekvenci je poté navázaná frekvence rezonance přes parametr r . V publikaci [21] odkazují na to, že chování systému silně závisí na parametru r .

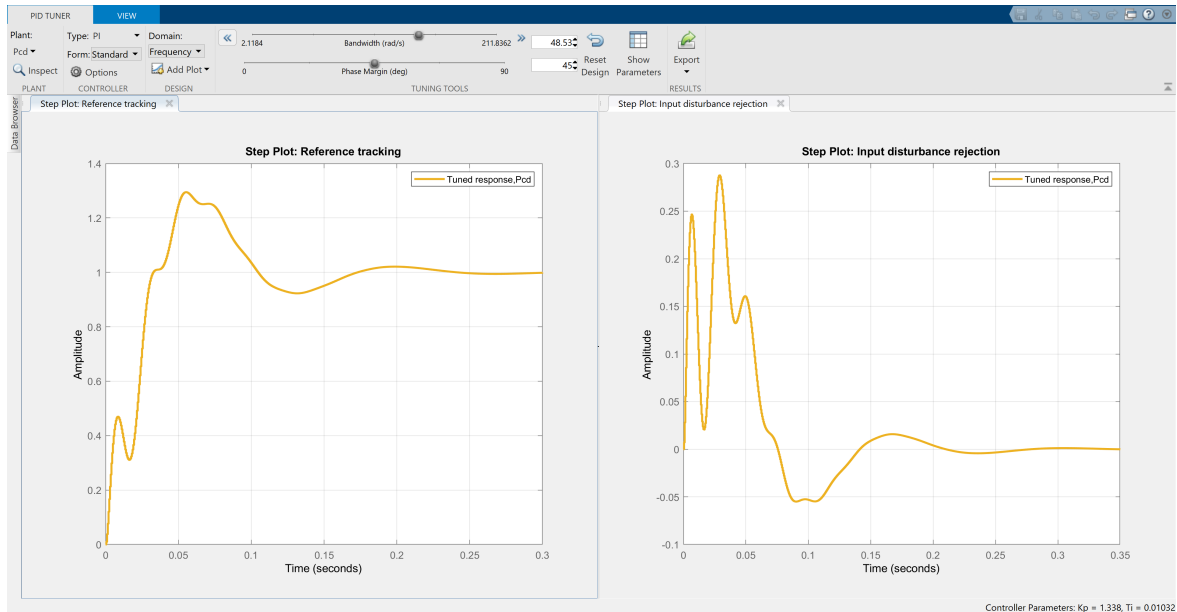
4. Automatické metody návrhu PID

Cílem automatických metod návrhu regulátorů, je usnadnit práci návrháři řízených systémů. Toto zjednodušení spočívá v tom, že automatické metody se snaží sami najít ideální parametry regulátoru, kdy kladou důraz na robustnost uzavřené smyčky. Díky těmto metodám nejsou kladeny takové požadavky na znalosti návrháře. Ačkoliv jde často o metody, které jsou spíše poloautomatické, návrháři ušetří spoustu času. Velmi často stačí najít pouze jeden parametr. Tato práce se zaměří na dvě automatické metody a tou první je aplikace PID Tuner.

4.1 PID Tuner

PID Tuner je aplikace, která se snaží automaticky nalézt vhodné parametry PID regulátoru pro přenosovou funkci systému, kterou zadal uživatel. Aplikace by tedy měla zrychlit návrh regulátoru, nalézt vhodné parametry a tím snížit nároky na návrháře. Tato aplikace je běžnou součástí softwaru Matlab, který byl vyvinutý společností The MathWorks, Inc. Dle společnosti [11] se PID Tuner snaží při hledání parametrů najít kompromis mezi robustností a výkoností. Hodnotou podle které se vyhodnocuje robustnost je bezpečnost ve fázi, popsána v kapitole 2.3. Tento parametr bezpečnosti se snaží držet na hodnotě 60° podle [10].

PID Tuner se spouští ve vytvořeném uživatelsky přívětivém prostředí, které celý návrh regulátoru zpřehledňuje, po spuštění aplikace je potřeba zadat typ regulátoru a model systému, pro který má být navržen regulátor. Zde je možné vybírat z různých variant PID regulátorů, včetně 2DoF PID regulátorů. Po zadání přenosové funkce systému a struktury regulátoru aplikace navrhne parametry, kdy se snaží nalézt stabilní systém s minimální bezpečností ve fázi 60° . Pro navržený regulátor aplikace vykreslí grafy, kdy je možné vybírat z přechodových a bodeho charakteristik. Pokud regulátor nevyhovuje lze návrh upravit v časové nebo frekvenční oblasti. Ve frekvenční oblasti je možné změnit bezpečnost ve fázi a šířku pásma, v časové oblasti se mění doba odezvy a agresivita. Časová a frekvenční oblast jsou spolu propojené, proto změna parametrů v jedné oblasti změní parametry v oblasti druhé. Důležité je upozornit, že těmito změnami návrhu je možné dovést systém k nestabilitě.



Obrázek 4.1: Aplikace PID Tuner

4.2 Metoda H_∞ Regionu

Automatická metoda návrhu regulátorů metodou H_∞ se zaměřuje na nalezení regionu, který obsahuje množinu regulátorů, která splňuje podmínky H_∞ regulátoru. Metoda je navržena hlavně pro návrh PI regulátorů, které se uvažují ve tvaru

$$PI(s) = k_p + \frac{k_i}{s}. \quad (4.1)$$

H_∞ norma

Základní návrhový požadavek na nalezení regionu se klade na H_∞ normu, která je dle [6] definována vztahem 4.2, kde $H(s,k)$ představuje jednu z funkcí gangu 4, popsanych v kapitole 2.2.

$$\|H(s, k)\|_\infty \approx \sup \|H(j\omega)\| \quad (4.2)$$

Návrhový požadavek je možné vyjádřit rovnicí 4.3, kdy se tímto požadavkem definuje maximum frekvenční funkce z gangu 4. Tento požadavek odpovídá omezením na funkce $S(s)$ a $T(s)$ popsané v části 2.3, kdy pro funkci $T(j\omega)$ lze konstantu M_T nahradit za γ a pro funkci $S(j\omega)$ se γ rovná konstantě M_S

$$\|H(s, k)\|_\infty < \gamma \quad (4.3)$$

H_∞ regulátor

Regulátor je H_∞ pokud podle [16] splňuje tyto tři podmínky:

- Uzavřená smyčka je stabilní.
- Přenosová funkce $H(s,k)$ je stabilní
- Je splněna podmínka 4.3 pro $\gamma > 0$

Po bližším pohledu lze usoudit, že tyto tři požadavky odpovídají běžným požadavkům na uzavřenou smyčku, kdy je vyžadována stabilita a požadavek M_S nebo M_T .

Řešení hranice regionu

Region je definován je dle [16] jeho hraničními křivkami, které je možné nalézt řešením následujících rovnic 4.4-4.6, kde $H_n(j\omega, k)$ představuje čítel přenosu $H(j\omega, k)$ a $H_d(j\omega, k)$ je jeho jmenovatel.

$$H_n(j\omega, k) = 0 \tag{4.4}$$

$$H_d(j\omega, k) = 0, \quad \omega \in [0, \infty]$$

$$\begin{aligned} |H(j\omega, k)|^2 &= \gamma^2 \\ \frac{\partial |H(j\omega, k)|^2}{\partial \omega} &= 0, \quad \omega \in [0, \infty] \end{aligned} \tag{4.5}$$

$$|H(j\omega, k)| = \gamma \quad \omega \in [0, \infty] \tag{4.6}$$

Pokud se dle [16] za funkci $H(s, k)$ bere funkce $S(s, k)$ lze dojít k řešení pro rovnice 4.4-4.6. Pro 4.4 je řešením

$$k_p = \mathbb{R} \quad k_i = 0, \tag{4.7}$$

pro 4.6 řešení pro $\gamma > 1$ neexistuje.

Pro poslední soustavu rovnic 4.5 existuje řešení, které definuje většinu hranic regionu dle [16].

Algoritmus pro řešení rovnice 4.5

V článku [16] je uvedený následující algoritmus, pro výpočet hranic regionu. Před samotným výpočtem hranic se určí přenosová funkce systému a požadavek na $M_s = \omega$. Pokračuje se výpočtem frekvenční charakteristiky systému a její derivace. Určí se funkce $A(\omega)$ $A_1(\omega)$ $B(\omega)$ a $B_1(\omega)$, kdy

$$\begin{aligned} A &= \operatorname{Re}(P(j\omega)) & B &= \operatorname{Im}(P(j\omega)) \\ A_1 &= \frac{dA}{d\omega} & B_1 &= \frac{dB}{d\omega}, \end{aligned} \tag{4.8}$$

kde $P(j\omega)$ je frekvenční charakteristika systému.

Z těchto hodnot frekvenční charakteristiky je možné vypočítat jednotlivé hranice regionů

v rovině určené parametry regulátoru K_i a K_p . Tyto parametry je možné vypočítat za pomoci vzorců 4.9 z článku [16].

$$\begin{aligned}
 k_i &= \frac{x_i \omega}{M_s} \\
 k_p &= \frac{1}{\omega M_s^2 (2ABB_1 + A^2 A_1 - A_1 B^2)} \\
 &\quad (x_i^2 (A^2 + B^2)^2 + x_i M_s (\omega (-B_1 A^2 + 2BA_1 A \\
 &\quad + B^2 B_1) + B(A^2 + B^2)) + \omega (M_s^2 - 1)(BB_1 + AA_1)),
 \end{aligned} \tag{4.9}$$

kde ω je konkrétní frekvence a x_i jsou pouze reálné kořeny kvartické rovnice

$$ax^4 + bx^3 + cx^2 + dx + e = 0 \tag{4.10}$$

Jednotlivé koeficienty kvartické rovnice je možné vypočítat za pomoci následujících vzorců 4.11-4.15, které jsou taktéž uvedené v článku [16].

$$a = (A^2 + B^2)^4 \tag{4.11}$$

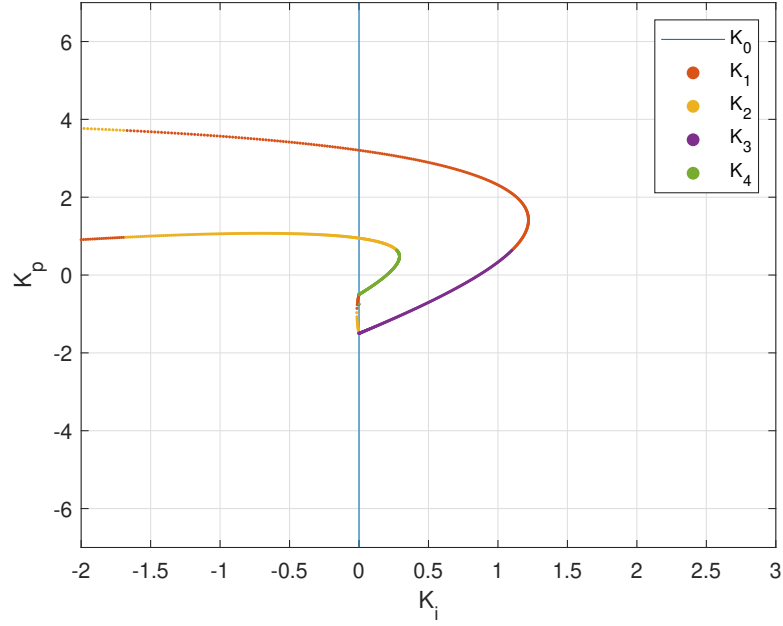
$$b = 2M_s(A^2 + B^2)^2(-\omega B_1 A^2 + 2\omega BAA_1 + \omega B^2 B_1 + BA^2 + B^3) \tag{4.12}$$

$$\begin{aligned}
 c &= -(A^2 + B^2)(2\omega A_1 A^3 + 4A^2 M_s^2 \omega BB_1 + 2A^2 \omega BB_1 - A^2 \omega^2 B_1^2 M_s^2 - \omega^2 \\
 &\quad M_s^2 A^2 A_1^2 - M_s^2 B^2 A^2 - 8A\omega M_s^2 B^2 A_1 + 2A\omega A_1 B^2 - \omega^2 A_1^2 M_s^2 B^2 \\
 &\quad - B^4 M_s^2 + 2\omega B_1 B^3 - \omega^2 M_s^2 B^2 B_1^2 - 4B^3 M_s^2 \omega B_1)
 \end{aligned} \tag{4.13}$$

$$\begin{aligned}
 d &= -2\omega M_s(-M_s^2 \omega A_1^2 B^3 - M_s^2 \omega B A^2 A_1^2 - 2M_s^2 B^3 AA_1 - M_s^2 \omega B_1^2 A^2 B + M_s^2 \\
 &\quad B^2 A^2 B_1 - M_s^2 B^4 B_1 - M_s^2 \omega B_1^2 B^3 + 3\omega B_1 B^2 AA_1 - \omega B_1^2 A^2 B + B^3 AA_1 + 2\omega \\
 &\quad BA^2 A_1^2 + \omega B_1^2 B^3 - \omega B_1 A^3 A_1 + B^2 A^2 B_1 + BA^3 A_1 + B^4 B_1)
 \end{aligned} \tag{4.14}$$

$$e = -\omega^2 (M_s - 1)(M_s + 1)(-A_1^2 M_s^2 B^2 - M_s^2 B^2 B_1^2 + 2BB_1 AA_1 + B^2 B_1^2 + A^2 A_1^2) \tag{4.15}$$

Po vypočtení reálných kořenů kvartické rovnice pro všechny frekvence se získají čtyři hraniční křivky $K_1 - K_4$, ke kterým se přidává křivka pátá K_0 , kdy $k_i = 0$ a $k_p = (-\infty, \infty)$. Takto vypočtené křivky jsou zobrazené na obrázku 4.2



Obrázek 4.2: Hraniční křivky

4.2.1 Návrh PD regulátoru polohy

Metoda H_∞ je optimalizována pro návrh PI regulátorů, ale lze s ní velmi dobře navrhnout i PD regulátor polohy pro kaskádní regulační smyčku. Polohový regulátor je v kaskádě navrhován pro systém, který lze popsat přenosem 4.16, kde T_v je uzavřená smyčka rychlosti.

$$P_p(s) = T_v \cdot \frac{1}{s} \quad (4.16)$$

PD regulátor lze popsat přenosem v rovnici 4.17 a otevřenou polohovou smyčku jako sériové zapojení PD regulátoru a přenosu $P_p(s)$, což je popsáno v rovnici 4.18.

$$PD(s) = k_{pd} + k_d s \quad (4.17)$$

$$F_{op}(s) = (k_{pd} + k_d s) \cdot T_v \cdot \frac{1}{s} \quad (4.18)$$

V rovnici 4.18 je možné přenos regulátoru roznásobit integrátorem, čímž je možné získat rovnici 4.19 a tedy přenos, který odpovídá sériovému zapojení PI regulátoru a uzavřené rychlostní smyčky.

$$F_{oPI}(s) = \left(\frac{k_{pd}}{s} + k_d \right) \cdot T_v \quad (4.19)$$

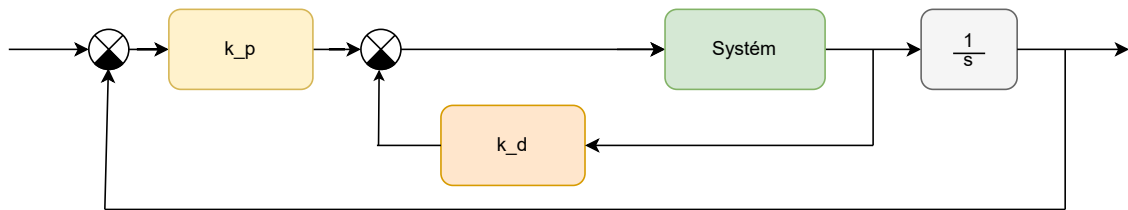
Z tohoto odvození tedy vyplývá ekvivalence mezi rovnicemi 4.19 a 4.18 a návrh je tedy možné provést metodou H_∞ pro přenos T_v , kdy parametr k_d se rovná k_{pi} a parametr $k_{pd} = k_i$, po substituci vznikne rovnice 4.20.

$$F_{oPI}(s) = \left(\frac{k_i}{s} + k_{pi} \right) \cdot T_v \quad (4.20)$$

Zapojení PD regulátoru do soustavy

Při implementaci PD regulátoru polohy je důležité nezapomenout na jeho správné zapojení. Pro tuto soustavu je výhodné, že je rychlost přímo měřena a derivační složka nemusí derivovat polohu. Výsledné zapojení PD regulátoru je v obrázku 4.3, kde je možné si všimnout, že jde v podstatě o uzavření dvou zpětných vazeb, kde je použité pouze zesílení a ve druhém případě je za systém zapojen navíc integrátor pro převod rychlosti na polohu.

U derivační složky nesmí být zapomenuto, že tato složka musí pracovat s informací pouze ze zpětné vazby, nikoliv od požadované hodnoty. Je to kvůli omezení prudkých změn výstupu regulátoru při změnách požadované hodnoty.



Obrázek 4.3: Schéma zapojení PD regulátoru

Návrh P regulátoru polohy

Obdobně jako je možné navrhout PD regulátor polohy, lze navrhout i P regulátor. Celý návrh vychází ze stejné substituce jako v případě PD regulátoru, rozdíl je v tom, že se nechá v parametrické rovině složka k_p nulová a hledá se pouze složka k_i .

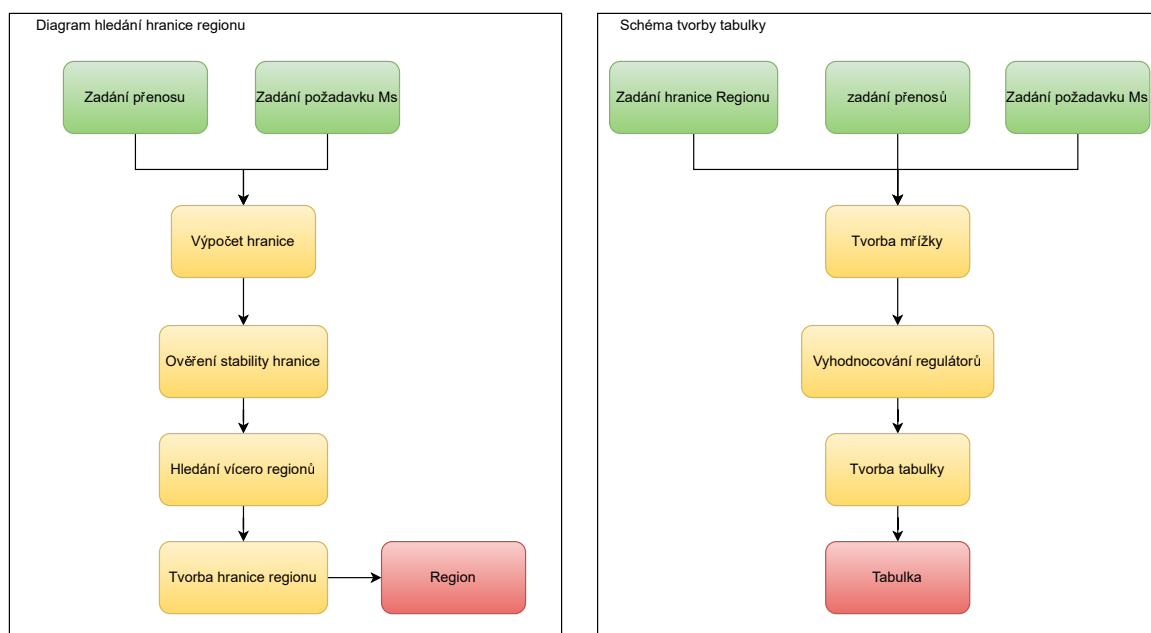
Druhý možný způsob je zapojit za rychlostní smyčku integrátor a poté se hledá pouze složka k_p a složka k_i se nechá nulová. Obě dvě varianty návrhu jsou možné, častěji se ovšem využije první varianta se substitucí, protože je možné navrhout jak P tak i PD regulátor najednou.

5. Návrh skriptu s využitím H_∞ metody

Jedním z cílů práce je vytvořit skript pro automatický návrh regulátorů s implementací metody H_∞ , optimalizovanou pro návrh mechanicky poddajných systémů, kde se vyskytují dva výstupy a strany se chovají odlišně. Ukazuje se, že automatické metody jako je PID Tuner[11], nebo PID Lab[15] nepočítají s druhým neměřeným výstupem a zůstává úkolem návrháře, aby chování na straně neměřeného výstupu, zátěže ověřil sám. Cílem tohoto skriptu je analyzovat nejen přenos měřeného výstupu, ale také neměřeného výstupu, a ukázat tak průběh a kvalitu řízení na obou stranách elektromechanické soustavy.

5.1 Funkce metody

Vzhledem ke složitosti skriptu zde jsou pro větší přehlednost přidána schémata běhu programu. První dvě funkce jsou znázorněné v obrázku 5.1, kde zelené bloky jsou vstupy, které musí návrhář zadat, žlutě jsou označené procesy, které vykonává skript a červeně je označený výstup. Následuje popis všech funkcí, které byly vytvořené a dále je uvedený stručný popis fungování celé metody.



Obrázek 5.1: Schéma tvorby hledání hranice a tvorby tabulky

`vypocetRegionu()`

Funkce `vypocetRegionu()` slouží pro hledání hranice regionu. Průběh běhu funkce je zobrazený v obrázku 5.1. Vstupem této funkce je přenos systému, požadavek M_s , paralelní výpočty a také je zde možné zadat nalezení vícero regionů pokud existují. Tato funkce nejprve podle algoritmu v článku [16] vypočítá hranice a ověří jejich stabilitu. Pokud existuje

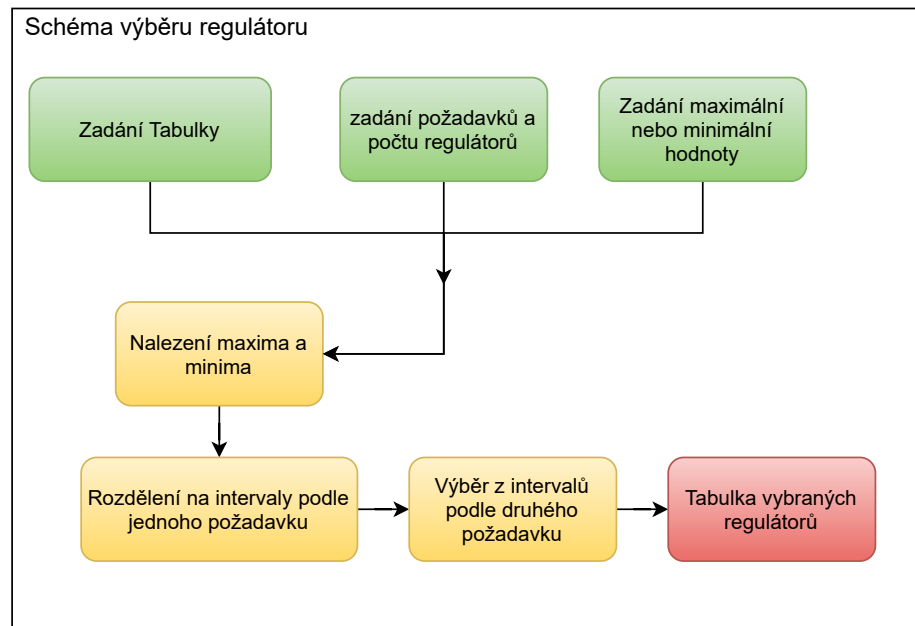
více regionů a skript má za úkol je najít, tak dojde k rozdělení hranic ke svým regionům a poté začne dotváření jednotlivých regionů. Výstupem této funkce jsou jak hranice regionu, tak také hrubě mřížkovaný region. Jak funguje tato funkce detailněji je popsáno v další části, která je přímo zaměřena na to jak vše funguje.

vytvorTabulku()

Úkolem funkce `vytvorTabulku()` je vytvořit mřížku bodů přes celý region, tak aby vhodně celý region popisovala. Průběh funkce je znázorněn v obrázku 5.1. Úkolem návrháře je zadat vypočítaný region, omezení na M_s , přenosy, indexy, které mají být vypočítané a počet bodů v mřížce. Funkce po zadání parametrů začne mřížkováním regionu, kdy se pokryje celý region body. Poté se začnou vyhodnocovat jednotlivé regulátory, které jsou představovány body. Vyhodnocení je na celé funkci nejdělsí krok. Po vypočtení všech zadaných indexů se vytvoří tabulka s parametry všech regulátorů, které jsou popsány mřížkou. Tato tabulka je také výstupem této funkce.

Funkce vyberRegulatoru()

Tato funkce slouží pro výběr několika regulátorů z tabulky, kdy je cílem návrháři poskytnout průřez množinou regulátorů. Do funkce se zadává tabulka s regulátory, požadavky z tabulky, jako je bezpečnost ve fázi, kritérium ITAE, jakýkoliv index vyhodnocený v tabulce, včetně parametrů k_p a k_i . Předposledním parametrem je počet regulátorů, který má být vybrán. Poslední parametr je, zda se má vybírat maximální nebo minimální hodnota podle druhého požadavku, může být vybráno maximum, například pro parametr k_i nebo minimum pro integrální kritéria. Funkce funguje tak, že nejprve nalezne maximum a minimum v tabulce podle prvního požadavku a rozdělí tabulku na intervaly podle tohoto prvního požadavku. Poté se z každého intervalu vybere jeden regulátor, který splňuje maximální nebo minimální hodnotu na druhý požadavek.



Obrázek 5.2: Schéma funkce pro výběr regulátoru

5.1.1 Funkce `dopocitejRegion()`

Tato funkce slouží jako podpůrná k numerickému dopočítání regionu a je používána funkcí `vypocetRegionu()` a uživatel by ji při běžném užívání neměl volat.

5.1.2 Funkce `interaktivniRegion()`

Tato funkce slouží k vykreslení regionu a možnosti kliknout na kterýkoliv regulátor, kdy se zobrazí graf přechodů a důležité indexy z tabulky. Do této funkce se zadává tabulka, přenosové funkce a požadavek, podle kterého se vykreslí barevně region, kdy jsou barevně odlišené body podle hodnoty tohoto kritéria.

5.1.3 Funkce `graf3D()`

Grafická funkce, která dokáže vykreslit region v trojrozměrném prostoru, kdy třetí rozměr je tvořen zadaným požadavkem, což může být jeden z indexů, které jsou vyhodnocené v tabulce. Do této funkce je potřebné zadat tabulku a požadavek. Funkce se poté sama postará o vykreslení.

5.1.4 Funkce `vrstvnice()`

Druhá grafická funkce, která funguje stejně jako v případě funkce `graf3D`, rozdíl je v tom, že zůstává pouze ve dvou dimenzích a je možné říct, že vykreslí vrstevnice funkce `graf3D`.

5.1.5 Funkce `vyber()`

Tato funkce má široké využití, kdy vybírá řádky z tabulky na základě nějakého požadavku. Do této funkce se zadá tabulka, požadavek a rozmezí hodnot, které mají být vybrány, velmi rychlá a jednoduchá funkce a také často využívaná i ostatními funkcemi.

5.1.6 Funkce `vytvorGrafy()`

Tato funkce vytvoří přechodové charakteristiky všech regulátorů, které jsou v tabulce. Do této funkce se zadává tabulka a přenosy systému, tuto funkci využívá také funkce `interaktivnihoRegion()`, kdy po kliknutí myši pošle této funkci tabulku s jedním regulátorem.

5.1.7 Funkce `vytvorPrunik()`

Tato funkce slouží k nalezení průniku vícero regionů. Do této funkce se zadávají hranice regionů a počet bodů mřížky, která bude aplikována na výsledný region. Tato funkce vrátí mřížkovaný region.

5.1.8 Funkce `vytvorTabulkuUrceneBody()`

Tato funkce je velmi podobná funkci `vytvorTabulku()`, rozdíl mezi těmito funkcemi je, že funkce `vytvorTabulkuUrceneBody()` nemřížkuje region a vyhodnocuje pouze body z regionu, který byl do této funkce zadán. Do budoucna by bylo vhodné obě funkce pro tvorbu tabulek sloučit do jedné. Do funkce se zadávají body regionu, přenosy, indexy k vyhodnocení a také zda mají být použité paralelní výpočty.

5.2 Výpočet regionu

Celý skript lze rozdělit do čtyř základních částí podle jejich funkce a postupu běhu skriptu. Nejprve se počítá region v parametrické rovině $k_i - k_p$, který obsahuje všechny regulátory splňující podmínky na H_∞ regulátor popsany v kapitole 4.2.

Výpočet hranice

Před hledáním regionu je potřebné zadat návrhový požadavek $M_s \in (1, 2)$ a přenos systému, pro který má být navržen regulátor. Nalezení regionu probíhá výpočtem jeho hranic, což je možné řešením soustavy rovnic 4.5. Výsledkem jsou hranice, které jsou zobrazené v grafu 4.2. Rozdílem oproti teoretickému popisu algoritmu je, že skript nevytváří množiny bodů $K_1 - K_4$, ale vystačí si pouze s K , které je tvořené množinami $K_1 - K_4$. Daná množina K obsahuje parametry PI regulátoru k_p a k_i .

Ověření stability

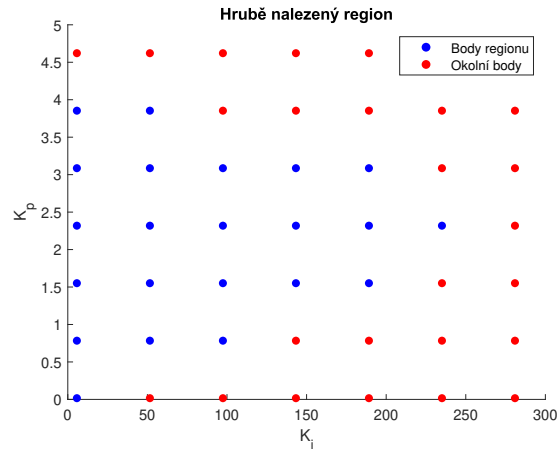
Jednoduchým ověřením lze zjistit, že hranice obsahují nejen regulátory které vedou na stabilní, ale i na nestabilní uzavřenou smyčku a ty je potřeba z množiny K vyřadit. Toto ověření probíhá tak, že se postupně projdou všechny možné hraniční regulátory a vyzkouší se zda je uzavřená smyčka stabilní.

Nalezení regionu

Finální částí hledání regionu je propojení hranic tvořících region, kdy ne všechny hranice tvoří výsledný region. Tento problém mohl být řešen vícero metodami.

Jednou z metod je prohledávání křivek, kdy se algoritmus snaží najít body, které jsou si velmi blízko, tyto křivky vzájemně propojovat dokud nevznikne region, tato metoda byla využita v práci [4]. Pro tuto metodu nastává v této situaci několik problémů, protože hranice regionu jsou definované pouze jako body a nikoliv jako křivky. To znamená, že nejsou přesně definované průsečky křivek, musí se tedy procházet jednotlivé body křivek a hledat ty, které jsou si dostatečně blízko. Další problém nastává hned vzápětí a to definováním toho, co znamená dostatečně blízko. Eukleidovská vzdálenost mezi body které se měly spojit mohla být 0.1 nebo také 1000 a může nastat i situace, kdy je potřeba vytvořit novou křivku, která dovytvoří region. Poslední problém je, že se křivky mohou překrývat a není tak jasné, které tvoří region a které ne. Řešení těchto problémů se ukázalo jako velice komplexní, což vedlo k vysoké složitosti samotného skriptu a častým selháním tvorby regionu.

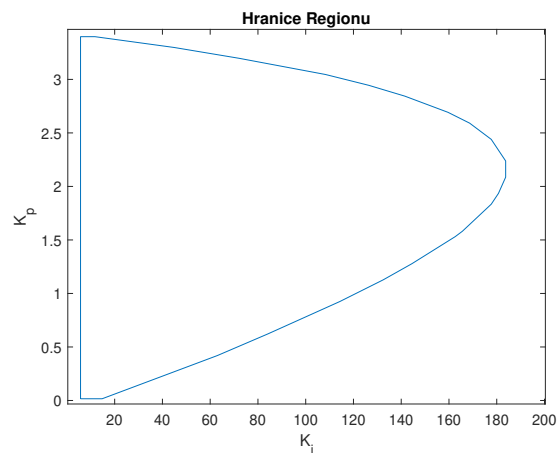
Jako vhodnější způsob tvorby regionu se ukázala druhá iterativní metoda, která nalezne největší a nejmenší hodnoty k_i a k_p , které pro ni jsou úvodním vodítkem k nalezení hranice. Tato metoda funguje tak, že mezi maximálními a minimálními hodnotami vytvoří mřížku o 49 bodech, které vyhodnotí. Pokud bod do regionu patří, to znamená, že je stabilní a splňuje maximální M_s , tak se uloží do množiny regionu K . S ostatními body, které nepatří do regionu, se již nepracuje. Tento krok s mřížkou se opakuje desetkrát a to z důvodu, kdy se nepodaří najít správnou maximální hodnotu a je potřeba k ní postupným vyhodnocováním dojít. Během cyklu s mřížkou se vždy mění maximální a minimální hodnoty a to tak, že se vezmou poslední maximální hodnoty, ty se zvětší přibližně o 10% a poslední minimální hodnoty, které se zmenší přibližně o 10%, ale nepřekročí do záporných hodnot. Tyto úpravy extrémních hodnot umožňují správné dohledání regionu, pokud mu byly předány nepřesné hranice regionu. Hrubé hledání regionu je ilustrováno na obrázku 5.3, kde modré body patří do regionu a červené nikoliv.



Obrázek 5.3: Hrubě nalezený region

Posledním krokem je úplně stejné vyhodnocení mřížky pro 600 bodů, které dokáže hranice zjemnit a vytvořit tak přesnější region, se kterým je možné dále pracovat. Ukázka nalezené hranice regionu je na obrázku 5.4, kde tuto hranici tvoří krajní body regionu, které byly nalezené při mřížkování. U obrázku 5.3 je možné si všimnout, že region je zde větší než u obrázku 5.4, to je z důvodu nastavené tolerance, kdy v prvotním hrubém hledání regionu je hranice M_s nastavená o 10% větší než je požadováno. U obrázku 5.4 je tolerance pouze 1% a tedy hranice jsou již velmi přesné.

Výhodou této numerické metody je vysoká robustnost proti chybám. Pokud region existuje ve velkém množství případů ho dokáže najít. Další výhodou je, že je potřeba velmi malé množství hraničních bodů. Nevýhodou této metody je, že pokud se objeví dva vyhovující regiony, metoda najde pouze region, který má v rovině větší plochu a je tedy dominantnější. Pro nalezení vícero regionů, je potřeba hraniční křivky rozdělit podle toho k jakému regionu patří, před tím než začne numerické mřížkování.



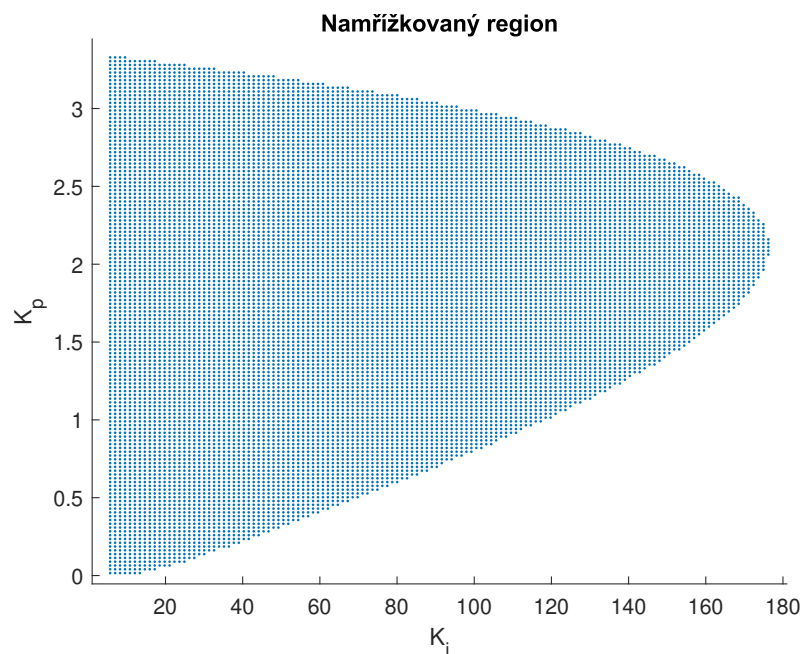
Obrázek 5.4: Hranice regionu

5.3 Tvorba tabulky

Velmi důležitou funkcí skriptu je tvoření tabulky, kde jsou zastoupené regulátory regionu. V regionu je nekonečný počet regulátorů a tedy není možné ohodnotit všechny regulátory z daného regionu. Cílem je tedy vybrat množinu regulátorů, které budou dostatečně dobře popisovat celý region. Metoda by měla poté mít k dispozici určitý vzorek všech regulátorů v regionu.

Mřížkování regionu

Proces výběru regulátorů začíná mřížkováním regionu. Toto probíhá obdobně jako při výpočtu regionu v kapitole 5.2 s tím rozdílem, že velikost mřížky je v tomto případě zvolena na velikost 4000, ale návrhář má možnost tuto hodnotu změnit. Výsledný region je v obrázku 5.5, kde každý bod představuje jeden regulátor, který by mohl být vhodný k řízení systému. V tomto místě je možné se všimnout, že mřížkování jednoho regionu probíhá dvanáctkrát. Z důvodu budoucí kompatibility je ve skriptu nechané jedno mřížkování navíc. Do budoucna může být vytvořena nová funkce pro tvorbu regionu nebo tvorbu tabulky a toto mřížkování navíc zvyšuje šanci, že nebude potřeba velkých zásahů do celého skriptu. V tomto případě při tvorbě tabulky opět stačí mít region popsáný malým počtem bodů, není potřeba celá hranice.



Obrázek 5.5: Namřížkovaný region

Vyhodnocení regulátorů

Jednotlivé body z mřížky je potřeba vyhodnotit a zařadit do tabulky, která následně popisuje region. Návrhář má zde na výběr, které ukazatele se budou vyhodnocovat, metoda obsahuje široké spektrum možností. Ukazatele je možné zadat jednotlivě nebo využít jednu ze čtyř množin, kdy je možné vyhodnotit všechny ukazatele najednou. Pouze kritéria pro přechodovou charakteristiku, kritéria pro vstupní poruchu nebo vyhodnocení kritérií pro vstupní poruchu i přechodovou charakteristiku.

Při vyhodnocování všech indexů se začíná otevřenou smyčkou a indexy ve stabilitě, konkrétně bezpečností ve fázi p_m a v zesílení g_m . Tyto dva indexy vzápětí doplní bezpečnost ve stabilitě s_m . Dalšími parametry, které se vyhodnotí jsou požadavky na citlivostní funkce M_t a M_s a také parametr M_{t_l} , což je vyhodnocení parametru M_t pro druhý přenos na straně zátěže. Posledním parametrem je šířka pásma ω_b , což je frekvence na které frekvenční charakteristika funkce $T(s)$ poprvé klesne pod hodnotu -3 dB.

Další sloupce v tabulce tvoří numericky vyhodnocená integrální kritéria, popsaná v kapitole 2.4. Doba simulace přechodové charakteristiky je nastavená pro všechny regulátory stejně a je to desetinásobek doby regulace pro regulátor s největším parametrem k_i . Podle [16] tento regulátor vede na nejmenší kritérium IE a jeho odezva je jedna z nejrychlejších. Desetinásobek doby regulace byl zvolen kvůli pomalejším systémům, které se nemusí stačit ustálit stejně rychle jako systém, který je řízen regulátorem s největším k_i . Vyhodnocují se zde kritéria $ITAE$, IAE , ISE pro přenos na straně motoru a pro přenos na straně zátěže to jsou $ITAE_l$, IAE_l , ISE_l . Současně je skript ještě schopen vyhodnotit tuto trojici kritérií pro vstupní poruchu jak na straně zátěže, tak na straně motoru.

Posledními parametry, které skript umí vyhodnotit jsou maximální hodnoty přechodových charakteristik. Tyto hodnoty byly upravené pro polohovou smyčku, kde je cílem navrhnout regulátor bez překmitu.

Alternativně je možné skript upravit tak, aby poskytoval nejnížší hodnotu derivace přechodové charakteristiky, to je opět pro případ, kdy má být systém bez překmitu a tedy nejnížší hodnota derivace nesmí být nižší než nula.

Všechny vyhodnocené parametry včetně hodnot regulátorů k_i a k_p jsou uloženy do tabulky, ze které je možné podle těchto parametrů vybrat vhodný regulátor. Ukázka takové tabulky je v 5.1.

| K_p | K_i | g_m | p_m | s_m | ITAE | IAE | ISE |
|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0.016 | 5.66 | 290.18 | 75.17 | 0.86 | 0.02 | 0.18 | 0.11 |
| 2.16 | 28.74 | 6.19 | 53.94 | 0.71 | 0.002 | 0.03 | 0.014 |
| 1.77 | 72.34 | 7.32 | 51.04 | 0.72 | 0.001 | 0.026 | 0.012 |

Tabulka 5.1: Ukázka tabulky

5.4 Výběr vhodných regulátorů

Jakmile je region popsán tabulkou, je potřeba vybrat regulátor, který bude splňovat všechny podmínky a bude dobře řídit systém. K tomuto účelu byla vytvořena funkce pro výběr regulátorů, která vybírá z tabulky na základě dvou zadaných kritérií.

Pro první zadaný požadavek funkce najde v tabulce jeho nejmenší a největší hodnotu a podle těchto hodnot vytvoří intervaly. Počet intervalů odpovídá počtu požadovaných regulátorů. Z těchto intervalů se poté vybírají regulátory podle druhého požadavku. Pokud se například zadá jako první požadavek kritérium IAE a druhotné maximální K_i , tak vznikne výběr několika regulátorů, kdy každý regulátor bude z jiného intervalu s maximální možnou hodnotou K_i z daného intervalu. To znamená, že tento výběr bude obsahovat různé regulátory s kritériem IAE .

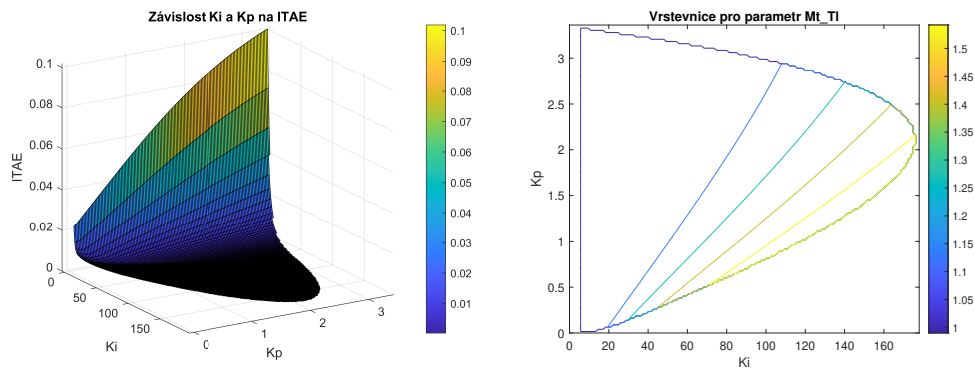
Metoda pro výběr intervalů slouží k tomu, aby si návrhář udělal obrázek o různých možnostech návrhu a následně sám vybral vhodný regulátor. Skript se snaží pomoci návrhářovi tím, že mu poskytuje další sadu funkcí a nástrojů, které může použít a ty jsou popsány v kapitole 5.5

5.5 Doplnkové funkce

Po snazší výběr vhodného regulátoru je ve skriptu implementováno několik funkcí, které by návrhářovi měly usnadnit práci. Tyto funkce mohou pomoci s grafickou vizualizací regionu nebo jsou schopné redukovat množství regulátorů, ze kterých má být vybráno.

Funkce pro výběr slouží k omezení množství regulátorů. Do této funkce se zadá požadavek a jeho rozmezí. Funkce pak sama vybere pouze ty řádky tabulky, které splňují tento požadavek. Tato funkce pomáhá při výběru vhodných regulátorů a návrhář ji může použít ke zpřesnění návrhu, kdy si například vybere pouze regulátory, které splňují určitou šířku pásma ω_b nebo požadavek M_{t_i} .

Grafické funkce skriptu mají za úkol zjednodušit vizualizaci regionu, ukázat závislost k_p a k_i na některém kritériu. Pro tyto situace jsou vytvořené dvě funkce, jedna slouží pro tvorbu 3D grafu a druhá vykresluje vrstevnice. Výsledek těchto funkcí ilustruje obrázek 5.6.



Obrázek 5.6: Vykreslení 3D grafu a vrstevnic

Ve skriptu je implementovaná funkce pro tvorbu grafů, kdy po zadání tabulky a systému, automaticky zobrazí pro všechny regulátory přechodové charakteristiky a odezvy na vstupní poruchu. Součástí těchto grafů je výpis indexů bezpečností a hodnot kritérií. Funkce slouží k rychlému ověření návrhu.

Poslední funkcí ze seznamu je interaktivní region, tato funkce vykreslí region a dává návrháři možnost vybrat některý z regulátorů, kdy po výběru je zavolána funkce pro tvorbu grafů a návrhář tak hned vidí, jak se daný regulátor se systémem chová. Tato funkce je vhodná pro doladění parametrů regulátoru nebo také pro určitý přehled toho, jak systém reaguje na různé parametry regulátorů.

Nalezení průniku regionů

Součástí skriptu jsou také funkce pro nalezení průniku regionů pro různé systémy. Nejprve se najde pro každý systém region, poté se najde průnik všech regionů a nakonec se pro tento průnik vyhodnotí tabulky. Pro každý systém je vyhodnocena jedna tabulka, kdy množství indexů v tabulce je volitelné.

Paralelismus

Součástí skriptu je možné využít paralelních výpočtů, které dokáží zrychlit celý běh programu. Tyto výpočty jsou implementované ve všech metodách, kde se pracuje s vyhodnocováním regulátorů, které je na celém běhu programu nejdelsí. Tato funkce dokáže snížit časovou náročnost programu na méně než polovinu. Obecně lze říct, že čím větší množství regulátorů se bude vyhodnocovat, tím vhodnější je využít této možnosti, kdy probíhá vyhodnocení několika regulátorů najednou.

6. Typizované mechanické soustavy

Tato část práce je zaměřena na návrh regulátorů pomocí vytvořeného skriptu s automatickou metodou H_∞ a aplikací PID Tuner na sadě typizovaných dvou hmotových modelů s měnícím se rezonančním parametrem r .

Parametry ξ_z a ω_z zůstávají konstantní pro všechny tři modely, jejich hodnoty jsou $\xi_z = 0.005$ a $\omega_z = 40\pi \cong 125.66$. Dále časová hodnota filtru $T_f = 0.001$, konstanta mechanické zátěže $T_m = 0.05$ a konstanta aktuátoru $T_i = \frac{1}{3}$. Přenosovou funkci pro návrh je možné získat sériovým zapojením řízeného tuhého systému a kmitavou částí, což jsou rovnice 3.5, 3.9 a 3.10 v kapitolách 3.4 a 3.5. Parametr r je popsán rovnicí 3.8 a v této části typizuje soustavy hodnotami 1.1, 2 a 6. Parametr r závisí na poměru mezi hmotou zátěže a motoru a je popsán rovnicí 3.8.

6.1 Návrh regulátoru akčního členu

Před samotným návrhem pomocí automatické metody je potřebné sestavit celý model mechanizované soustavy. Stále chybí přenos uzavřené smyčky aktuátoru s PI regulátorem. Přenos aktuátoru je popsán v rovnici 6.1 s hodnotou časové konstanty $T_i = \frac{1}{3}$.

$$P(s) = \frac{1}{T_i s + 1} \quad (6.1)$$

PI regulátor proudu je možné popsat přenosem v rovnici 6.2, kde konstanty k_p a k_i představují parametry regulátoru, které lze nastavit.

$$C(s) = k_p + \frac{k_i}{s} \quad (6.2)$$

Úkolem bylo vypočítat parametry PI regulátoru metodou přiřazení pólů, kdy dva volitelné póly měly být přiřazeny do hodnot $\xi = 0.9$ a $\omega = 6283.185 \text{ rad/s}$.

S těmito přenosy 6.1 a 6.2 je možné vypočítat přenos uzavřené smyčky, komplementární citlivostní funkci T , která je teoreticky popsána v 2.1. Tento výpočet je ukázán v rovnici 6.3. S takto vypočítaným přenosem se dále počítá jako s modelem aktuátoru. Než bude možné pokročit k dalším částem modelu, je potřeba navrhnout PI regulátor.

$$T_i(s) = \frac{\frac{1}{T_i s + 1} \cdot \left(k_p + \frac{k_i}{s}\right)}{1 + P(s)C(s)} = \frac{k_p s + k_i}{T_i s^2 + s(k_p + 1) + k_i} = \frac{\frac{k_p s + k_i}{T_i}}{s^2 + \frac{s(k_p + 1)}{T_i} + \frac{k_i}{T_i}} \quad (6.3)$$

Návrh regulátoru

Regulátor je možné navrhnout metodou přiřazení pólů. Pro tuto metodu je potřeba určit charakteristický polynom přenosové funkce T , který je reprezentován jmenovatelem přenosové funkce a je popsán v rovnici 6.4

$$a_z = s^2 + \frac{s(k_p + 1)}{T_i} + \frac{k_i}{T_i} \quad (6.4)$$

Tento charakteristický polynom je možný měnit parametry regulátoru. Metoda přiřazení pólů funguje tak, že se zvolí charakteristický polynom uzavřené smyčky, ke kterému by se chtělo dojít. Tento polynom lze popsat rovnicí 6.5.

$$a_z^* = s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2 \quad (6.5)$$

Součástí charakteristického polynomu 6.5 jsou dva volitelné parametry a to tlumení ξ a vlastní frekvence ω_n . Po zvolení těchto parametrů je možné přejít k výpočtu parametrů k_i a k_p , kdy:

$$\xi = 0.9 \quad \omega_n = 1000 \text{ Hz} = 6283.185 \text{ rad/s}$$

V tomto případě vzorce pro parametry regulátoru jsou popsány rovnicí 6.6

$$k_i = \omega_n^2 \cdot T_i \quad k_p = 2\xi \cdot \omega_n \cdot T_i \quad (6.6)$$

Po vypočtení parametrů výsledný přenos spojitého PI regulátoru je popsán rovnicí 6.7

$$C(s) = \frac{3769.9s + 1.31 \cdot 10^7}{s} \quad (6.7)$$

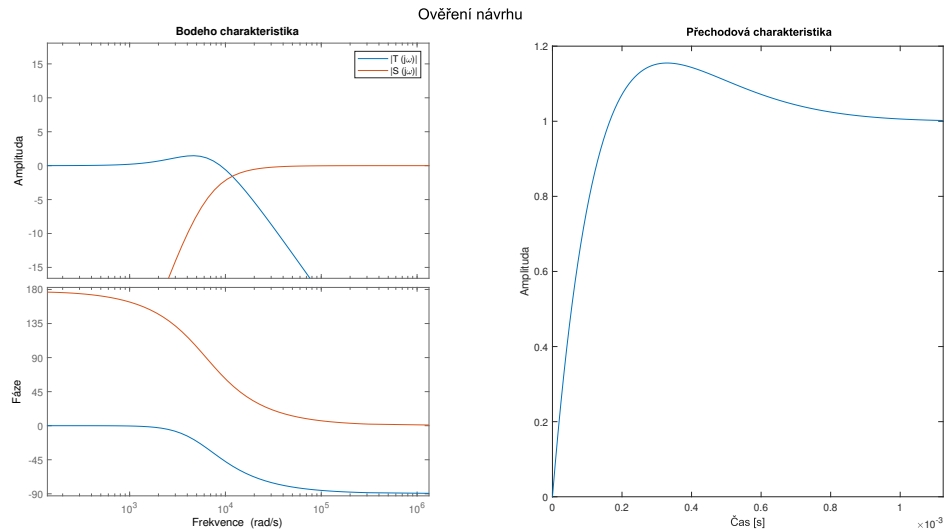
Ověření návrhu

Funkci navrženého regulátoru je potřeba ověřit. Vypočítat indexy stability 2.3 a ověřit vyhovující přechodový děj uzavřené smyčky. V obrázku 6.1 lze pozorovat, že požadavky M_s a M_t jsou splněné. Indexy ve stabilitě mají tyto hodnoty:

$$g_m = \infty, \quad p_m = 73.5^\circ, \quad s_m = 1,$$

což znamená, že požadavky na stabilitu jsou taktéž splněné.

Z přechodové charakteristiky v obrázku 6.1 je patrné, že doba regulace je 0.001 sekundy a vyskytuje se zde 16% překmit. V tomto případě překmit nepředstavuje problém, návrh lze považovat za úspěšný.



Obrázek 6.1: Ověření návrhu PI regulátoru

6.2 Srovnání modelů

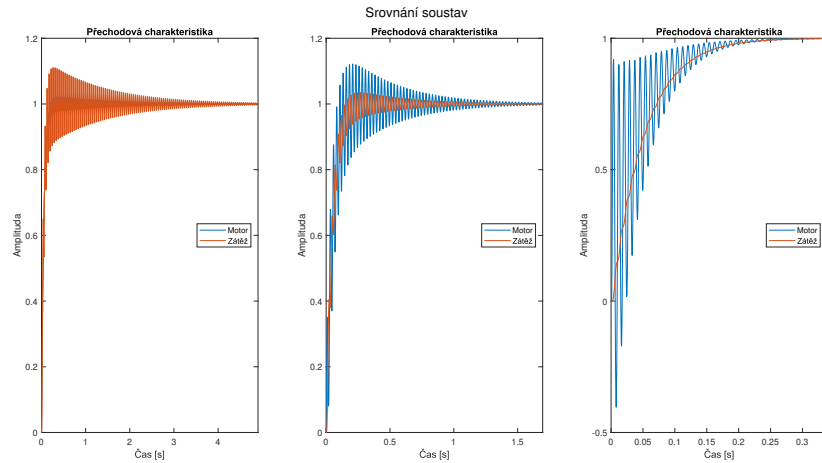
Před samotným návrhem regulátorů je vhodné seznámit se s chováním jednotlivých modelů, získat přehled a zjistit odlišnosti mezi jednotlivými modely.

Prvním modelem je soustava s parametrem $r = 1.1$, z tohoto parametru je možné zjistit jaký je přibližně poměr mezi hmotami na straně zátěže a motoru, tedy $\frac{M_2}{M_1}$. Výpočtem je možné zjistit, že pro parametr $r = 1.1$ se poměr mezi hmotami rovná 0.21, z toho je možné usoudit, že M_1 je přibližně pětikrát větší než M_2 , což povede na větší amplitudu kmitání na straně zátěže.

Druhým model obsahuje parametr $r = 2$, opět po výpočtu je možné zjistit, že poměr mezi hmotami je 3, z čehož je možné usoudit, že hmota zátěže M_2 je v tomto případě třikrát větší než hmota motoru M_1 . Tento poměr způsobí větší amplitudu kmitání na straně motoru.

Poslední model je s hodnotou parametru $r = 6$, po vypočtení je možné zjistit, že zátěž má 35x větší hmotu než motor. To znamená extrémně vyšší amplitudu kmitů na straně motoru.

Pro ověření úvahy o chování modelů byly vykreslené přechodové a frekvenční charakteristiky, které ilustrují chování daných soustav. V obrázku 6.2 je možné pozorovat rozdílné přechody, které odpovídají úvaze, kde u prvního modelu se vyskytuje větší amplituda kmitání na straně zátěže. Ve druhém případě je tomu naopak a větší amplituda kmitů je na straně motoru. V posledním grafu v obrázku 6.2 je vidět, že strana zátěže téměř nekmitá, zatímco strana motoru obsahuje kmitů s velkou amplitudou.

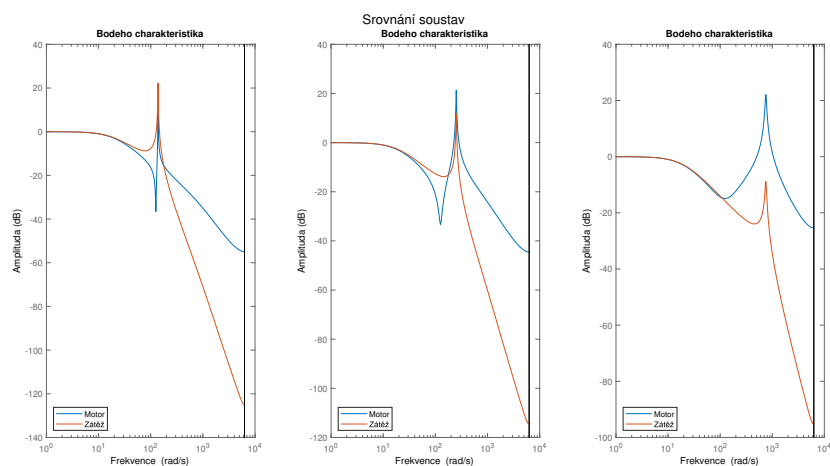


Obrázek 6.2: Přechodová charakteristika mechanických soustav

Ve frekvenčních charakteristikách v obrázku 6.3 je možné ověřit několik věcí, frekvence antirezonance je ve všech třech případech stejná a odpovídá parametru ω_z . Jiná situace nastává v případě rezonance, která se nachází pokaždé na jiné frekvenci, po bližším prozkoumání lze zjistit, že frekvence rezonance ω_{rez} lze popsat rovnicí 6.8, což ve třetím případě vede na rezonanci na vyšších frekvencích.

$$\omega_{rez} = r \cdot \omega_z \quad (6.8)$$

Další velmi dobře pozorovatelným jevem je velikost rezonance, která udává velikost kmitů. Velmi dobře zde jde porovnat, která strana soustavy bude mít větší amplitudu kmitů. Frekvenční charakteristiky tak potvrzují úvodní úvahu a také simulaci přechodových charakteristik.



Obrázek 6.3: Frekvenční charakteristika mechanických soustav

Po úvodním seznámení s řízenou soustavou, je možné přistoupit k návrhu regulátorů,

nejprve je návrh proveden automatickou metodou PID Tuner a poté metodou H_∞ . Cílem je navrhnout jak rychlostní tak polohovou smyčku s důrazem na dosažení dobrého chování polohové smyčky, která nesmí mít překmit. U polohové smyčky budou navrženy dva regulátory a to P i PD.

6.3 Postup návrhu

Při návrhu regulátorů bude nejdřív proveden návrh rychlostní smyčky metodou PID Tuner, tento návrh se dále využije k návrhu P a PD regulátoru polohy. Poté bude následovat návrh PI regulátoru rychlosti automatickou metodou H_∞ a následně návrh P nebo PD regulátoru. Na závěr je vhodné tyto metody porovnat mezi sebou a vyhodnotit, která si vedla lépe.

Nastavení H_∞ metody

Cílem automatické metody vytvořené v této práci je dokázat navrhnout spolehlivý regulátor bez nutnosti zásahu návrháře. Cílem je tedy metodu nastavit takovým způsobem, aby po zadání přenosu sama navrhla regulátor, který bude splňovat minimální požadavky na stabilitu a bude mít co nejkratší dobu regulace.

Metoda pro návrh regulátoru rychlosti byla nastavena s parametrem $M_s = 2$. Po výpočtení regionu dojde k selekci všech regulátorů, co nesplňují požadavky na stabilitu a poté je vybrán jeden regulátor na základě součtů kritérií ITAE. Při tvorbě tabulky se vyhodnocuje kritérium ITAE čtyřikrát, pro přechodové charakteristiky zátěže a motoru a pro jejich vstupní poruchy. Tato čtyři kritéria se sečtou pro všechny regulátory a vybere se ten, který má nejmenší součet těchto kritérií.

Nastavení regulátoru polohy bude muset být odlišné, protože v tomto případě nesmí být u přechodové charakteristiky překmit, Součástí tabulky tedy budou maximální hodnoty přechodových charakteristik pro motor a zátěž, ze kterých se pak vyberou regulátory, které regulují bez překmitu. Vzhledem k tomu, že větší část regionu obsahuje překmit, po selekci se stane, že je na výběr malé množství regulátorů. Tento problém lze řešit hustší mřížkou při výpočtu tabulky, nebo opětovným výpočtem tabulky, kdy se jako body regionu zadají všechny regulátory bez překmitu. To způsobí nový výpočet tabulky, kde bude většina regulátorů bez překmitu a vhodná pro řízení polohové smyčky. V této práci bylo zvoleno znovu vypočítání tabulky.

6.4 Návrh pro $r = 1.1$

Tento systém se ukázal jako jediný, který má větší amplitudu kmitů na straně zátěže než na straně motoru. To se ukazuje jako nebezpečná překážka, protože regulátor dostává

zpětnou vazbu pouze od motoru, není tedy schopen reagovat na velké kmity na straně zátěže. Návrhář by v tomto případě měl dávat obzvlášť pozor na chování na straně zátěže.

PID Tuner

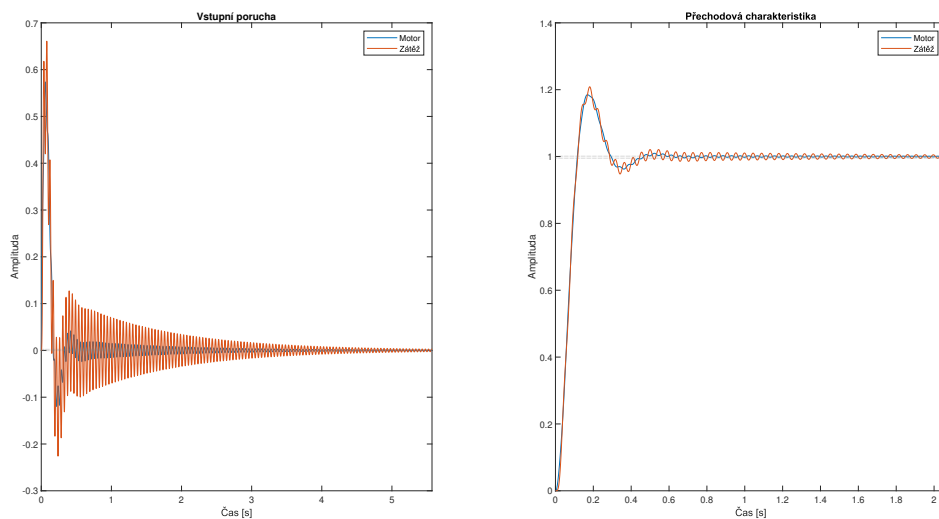
Návrh PI regulátoru rychlosti

Pro soustavu byl navržen regulátor aplikací PID Tuner, kdy byly získány parametry PI regulátoru a výsledky jsou pro přehlednost prezentovány v tabulce 6.1. Z této tabulky je patrné, že indexy ve stabilitě jsou splněné. Přechodová charakteristika návrhu a schopnost

| k_p | k_i | g_m | p_m | s_m |
|--------|-------|-------|-------|-------|
| 0.0052 | 20.9 | 11.5 | 49.5 | 0.65 |

Tabulka 6.1: Parametry PI regulátoru navrženého PID Tunerem pro $r = 1.1$

kompensování vstupní poruchy je znázorněna v obrázku 6.4. Regulátor není v tomto případě schopen utlumit kmitání systému, hlavně zátěže a celková doba regulace je velmi dlouhá. V tomto případě PID Tuner neumožnil návrh provést lépe.



Obrázek 6.4: Návrh PI regulátoru PID Tunerem pro $r = 1.1$

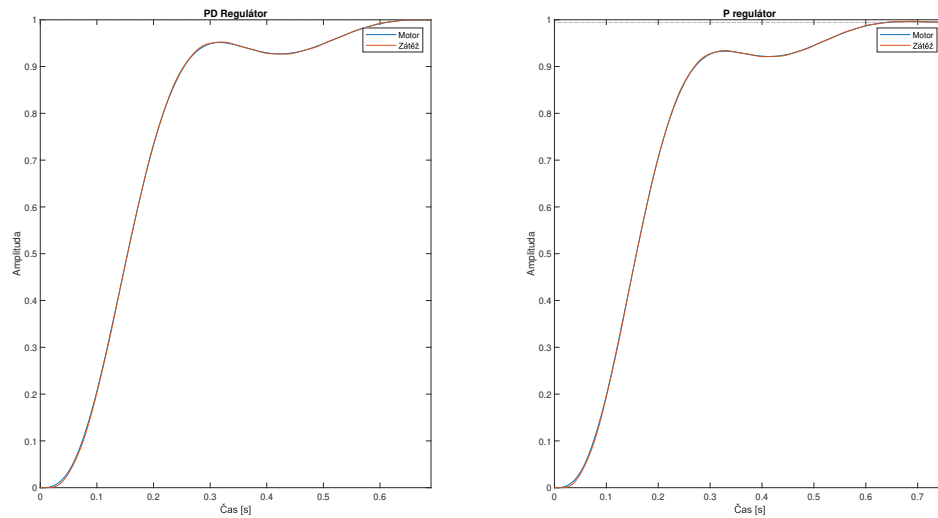
Návrh regulátoru polohy

Aplikací PID Tuner byly navrženy P a PD regulátory rychlosti. Při návrhu byl kladen důraz na přechodovou charakteristiku bez překmitu. Parametry obou uzavřených smyček jsou zaznamenány v tabulce 6.2. Je možné si povšimnout, že parametry i indexy stability jsou velmi podobné a oba návrhy splňují požadavky na bezpečnost ve stabilitě.

| k_p | g_m | p_m | s_m | k_p | k_d | g_m | p_m | s_m |
|-------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|
| 5.44 | 3.42 | 73.53 | 0.65 | 5.6918 | 0.0014 | 3.43 | 73.59 | 0.66 |

Tabulka 6.2: Parametry návrhu regulátorů polohy PID Tunerem pro $r = 1.1$

Přechodové děje obou regulátorů jsou znázorněné v obrázku 6.5. Obě charakteristiky jsou bez překmitu a větších kmitů, rozdíl je v době regulace, kdy PD regulátor je o trochu rychlejší, ale rozdíly jsou patrné minimálně.

Obrázek 6.5: Návrh regulátoru polohy PID Tunerem pro $r = 1.1$

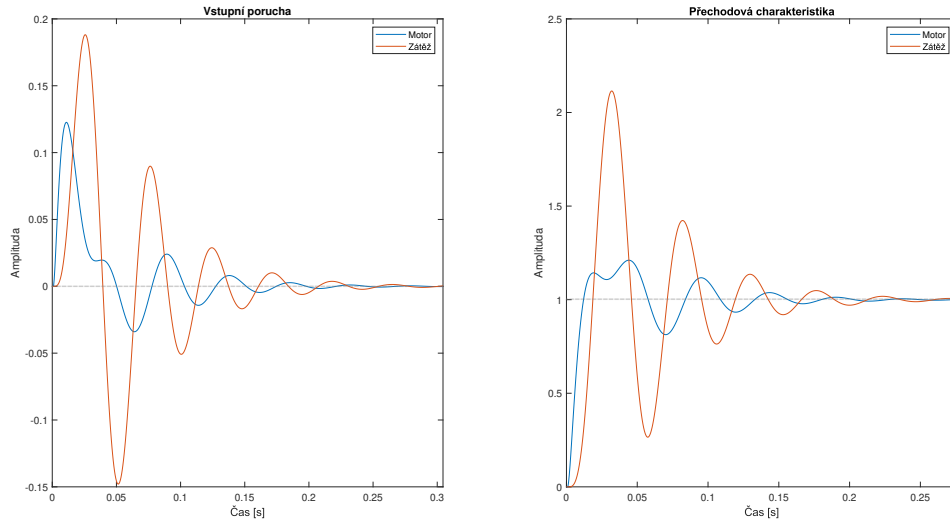
Metoda H_∞

Návrh PI regulátoru rychlosti

Metodě H_∞ byla spuštěna a došla k návrhu regulátoru, který se svými parametry velmi liší od PID Tuneru. Parametry návrhu a indexy stability jsou popsány tabulkou 6.3. Návrh splňuje indexy ve stabilitě, ale problémem mohou být kmity, které se vyskytují v charakteristikách v obrázku 6.6. Vzhledem k tomu, že systém je hodně kmitavý, ukazuje se, že ideální návrh rychlostní smyčky nelze provést PI regulátorem.

| k_p | k_i | g_m | p_m | s_m |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| 4.66 | 480.7 | 8.97 | 45.32 | 0.72 |

Tabulka 6.3: Parametry PI regulátoru navrženého H_∞ pro $r = 1.1$

Obrázek 6.6: Návrh PI regulátoru H_∞ pro $r = 1.1$

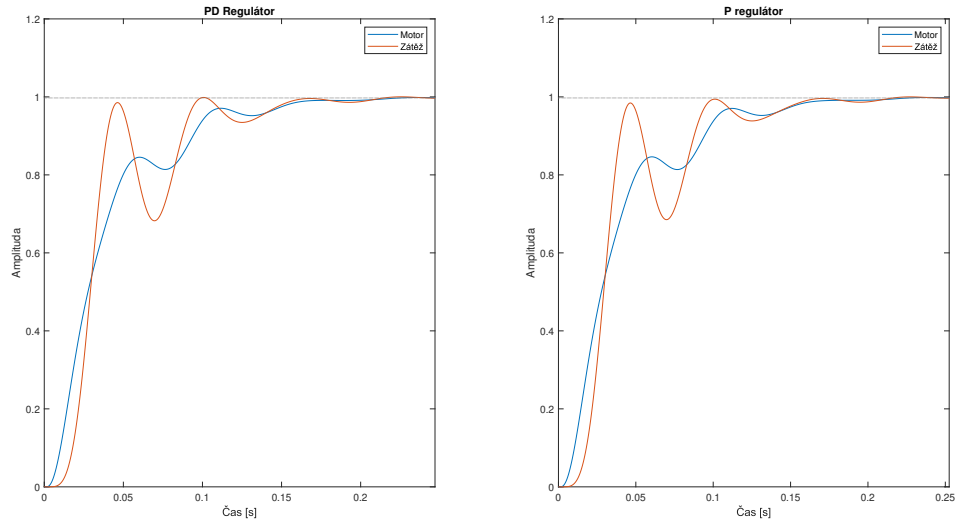
Návrh regulátoru polohy

V této části je provedený návrh regulátorů polohy automatickou metodou, kdy dynamika rychlosti byla navržena kmitavá a tyto kmity je potřebné utlumit. Parametry regulátorů, které navrhla metoda jsou zapsané v tabulce 6.4. Indexy ve stabilitě jsou splněné více než dostatečně.

| k_p | g_m | p_m | s_m | k_p | k_d | g_m | p_m | s_m |
|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|
| 24.79 | 4.69 | 85.61 | 0.71 | 25.29 | 0.0165 | 4.80 | 85.79 | 0.71 |

Tabulka 6.4: Parametry návrhu regulátorů polohy H_∞ pro $r = 1.1$

Přechodový děj je pozorovatelný v obrázku 6.7. Systém při přechodu několikrát kmitne, ale nestane se, že by překmitl přes požadovanou hodnotu. Z hlediska návrhu je tento systém velmi rychlý, problém mohou tvořit již zmíněné kmity.

Obrázek 6.7: Návrh regulátoru polohy H_∞ pro $r = 1.1$

6.5 Návrh pro $r = 2$

U soustavy s parametrem $r = 2$ se při analýze ukázalo, že poměr mezi setrvačnostmi je nejmenší, úkolem je tedy ztlumit obě rezonance přibližně stejně, což se může ukázat jako výhodné oproti ostatním systémům.

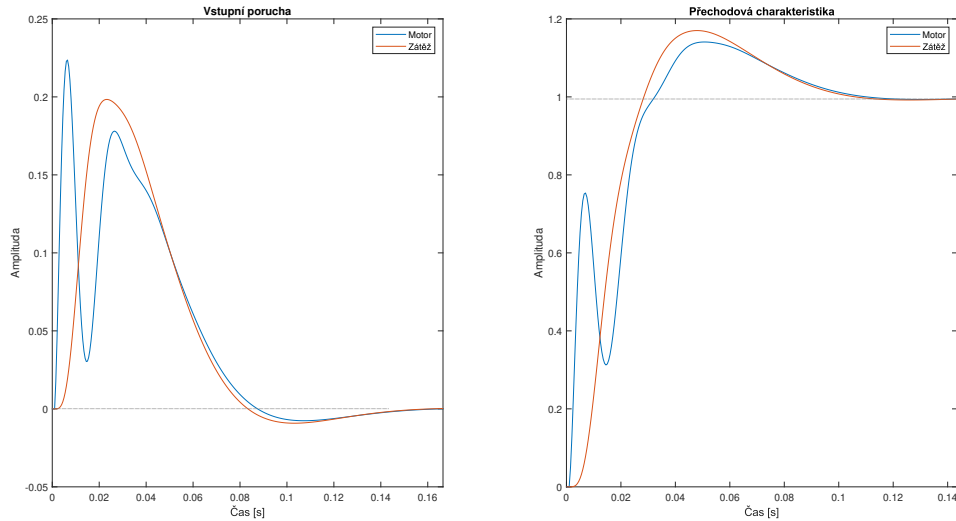
PID Tuner

Návrh PI regulátoru rychlosti

Obdobně jako u první soustavy byl nejprve navržen regulátor aplikací PID Tuner, kdy byl nalezen regulátor, jehož parametry jsou popsány v tabulce 6.5. Indexy ve stabilitě lze považovat za splněné, ačkoliv bezpečnost ve fázi je na hraně. Chování uzavřené smyčky je zobrazené v obrázku 6.8, kde je možné pozorovat velmi rychlou odezvu s velmi dobře ztlumenými kmity a překmitem, který je menší než 20%. Tento návrh lze považovat za velmi uspokojivý.

| k_p | k_i | g_m | p_m | s_m |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| 2.92 | 132 | 4.42 | 44.89 | 0.62 |

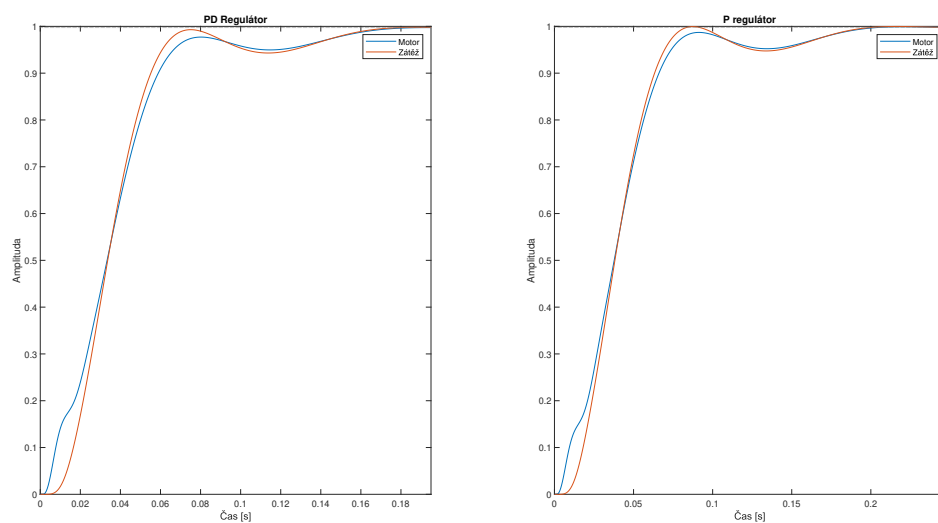
Tabulka 6.5: Parametry PI regulátoru navrženého PID Tunerem pro $r = 2$

Obrázek 6.8: Návrh PI regulátoru PID Tunerem pro $r = 2$

Návrh regulátoru polohy

Obdobně jako u první soustavy proběhl návrh metodou PID Tuner, kdy parametry regulátoru jsou zaznamenány v tabulce 6.6. Oba dva návrhy jsou dostatečně robustní ve stabilitě, některé indexy jsou dodrženy více než několikanásobně.

| k_p | g_m | p_m | s_m | k_p | k_d | g_m | p_m | s_m |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 23.71 | 13.81 | 73.19 | 0.72 | 34.38 | 0.29 | 17.13 | 81.48 | 0.8 |

Tabulka 6.6: Parametry regulátorů polohy navržených PID Tunerem pro $r = 2$ Obrázek 6.9: Návrh regulátorů polohy PID Tunerem pro $r = 2$

Přechodové charakteristiky jsou opět bez překmitu, ačkoliv se zde nachází určitý zákmit u požadované hodnoty není zde nic, co by kazilo řízení, doba regulace je velmi krátká, tento návrh lze považovat jako úspěšný.

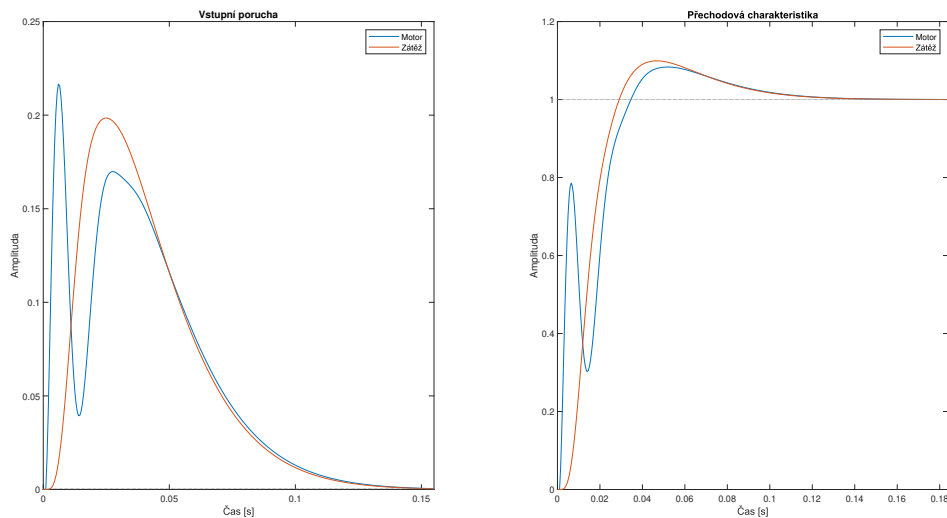
Metoda H_∞

Návrh PI regulátoru rychlosti

Ve druhém případě si automatická metoda s návrhem poradila mnohem lépe a navrhla regulátor s parametry, které jsou v tabulce 6.7. Indexy bezpečnosti ve stabilitě jsou v pořádku. A obdobně jako pro PID Tuner charakteristiky v obrázku 6.10 se chovají velmi dobře, v tomto případě se dokonce podařilo zajistit 10% překmit. Doba regulace je nízká, což odpovídá chtěným požadavkům.

| k_p | k_i | g_m | p_m | s_m |
|-------|--------|-------|-------|-------|
| 3.25 | 106.96 | 4.08 | 45.1 | 0.61 |

Tabulka 6.7: Parametry PI regulátoru navrženého H_∞ pro $r = 2$



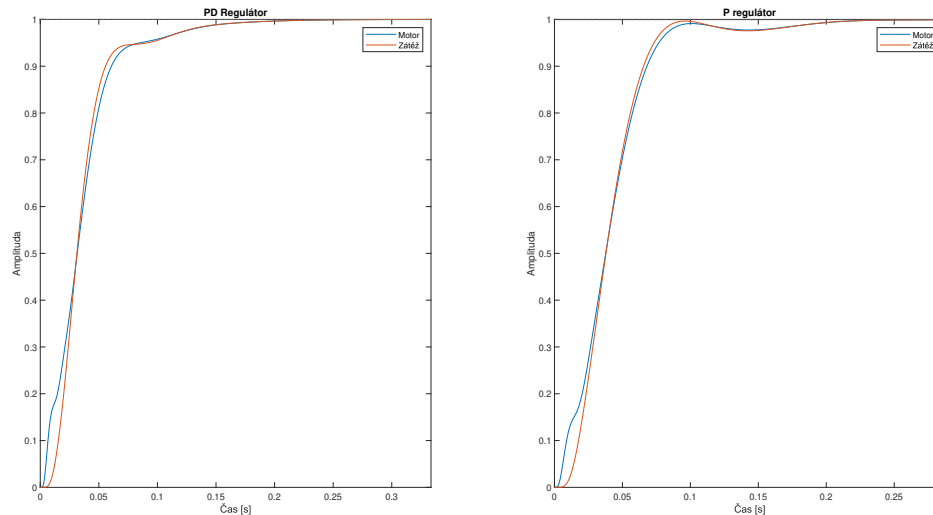
Obrázek 6.10: Návrh PI regulátoru H_∞ pro $r = 2$

Návrh regulátoru polohy

Navržená rychlostní smyčka se chová velmi dobře a dá se předpokládat, že tomu tak bude i pro polohovou smyčku. Automatická metoda navrhla parametry popsané v tabulce 6.8, kdy opět indexy ve stabilitě jsou splněné.

Přechodový děj, zobrazený v obrázku 6.11, se podařilo dodržet bez překmitu s velmi krátkou dobou regulace. Návrh lze považovat jako úspěšný pro oba dva regulátory.

| k_p | g_m | p_m | s_m | k_p | k_d | g_m | p_m | s_m |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 24.31 | 13.98 | 71.53 | 0.76 | 45.37 | 0.64 | 20.21 | 84.15 | 0.88 |

Tabulka 6.8: Parametry návrhu regulátorů polohy H_∞ metodou pro $r = 2$ Obrázek 6.11: Návrh regulátorů polohy H_∞ pro $r = 2$

6.6 Návrh pro $r = 6$

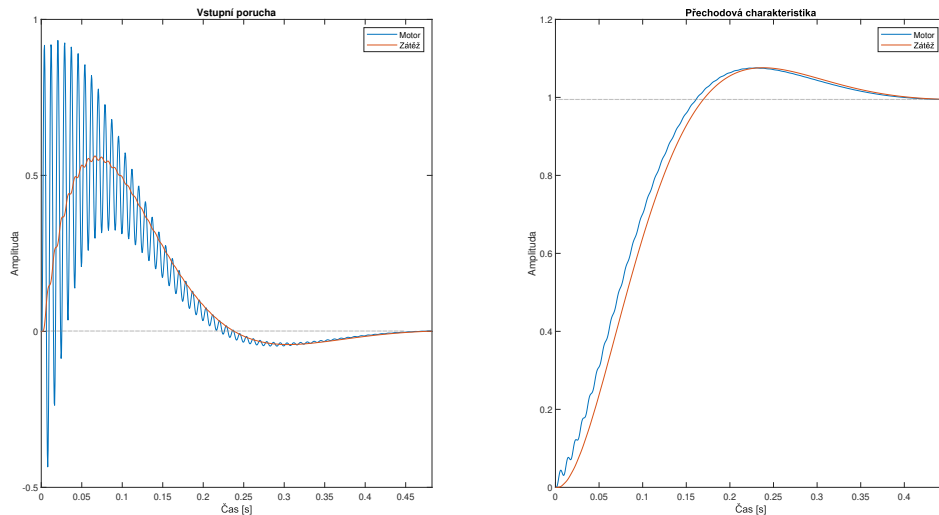
Poslední z typizovaných mechanických soustav je soustava, ve které mnohonásobně převyšuje setrvačnost zátěže nad setrvačností motoru. To způsobuje, že strana motoru kmitá a strana zátěže působí jako tuhý systém.

PID Tuner

Návrh PI regulátoru rychlosti

Jako u předchozích soustav začíná návrh regulátoru metodou PID Tuner. Parametry tohoto návrhu jsou zdokumentované v tabulce 6.9, kde je vidět, že jsou splněné indexy ve stabilitě a návrh je z tohoto hlediska v pořádku. Dále je potřeba ověřit schopnost kompenzování vstupní poruchy a chování přechodové charakteristiky. Přechodová charakteristika na druhém grafu v obrázku 6.12 je v pořádku, návrh vypadá jako povedený. Problém nastává v případě poruchy, kde se objevují velké kmity na straně motoru. Tyto kmity se postupně utlumí, ale i přes to by mohly kazit řízení.

| k_p | k_i | g_m | p_m | s_m |
|---------|-------|-------|-------|-------|
| 0.00374 | 15 | 4.02 | 62.72 | 0.75 |

Tabulka 6.9: Parametry návrhu PI regulátoru PID Tuner pro $r = 6$ Obrázek 6.12: Návrh PI regulátoru PID Tunerem pro $r = 6$

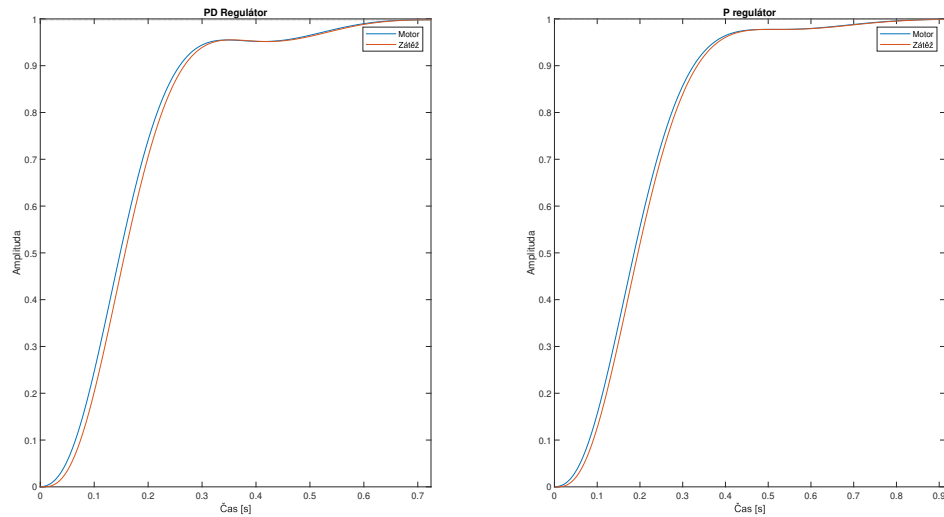
Návrh regulátoru polohy

Metodou PID Tuner se podařilo získat regulátor s parametry v tabulce 6.10, kdy jsou splněné indexy ve stabilitě.

| k_p | g_m | p_m | s_m | k_p | k_d | g_m | p_m | s_m |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 4.92 | 5.32 | 70.09 | 0.71 | 8.52 | 0.425 | 7.96 | 80.41 | 0.81 |

Tabulka 6.10: Parametry návrhu regulátorů polohy PID Tunerem pro $r = 6$

Přechodové děje jsou zobrazené v obrázku 6.13, kdy byl dodržen požadavek, že systém má být bez překmitu. U tohoto návrhu se mohl objevit problém s kmitavostí motoru, ale návrh byl proveden tak, že systém má delší dobu regulace a menší zesílení k_p . To znamená, že působí málo agresivně a soustavu nerozkmitává.

Obrázek 6.13: Návrh regulátorů polohy PID Tunerem pro $r = 6$

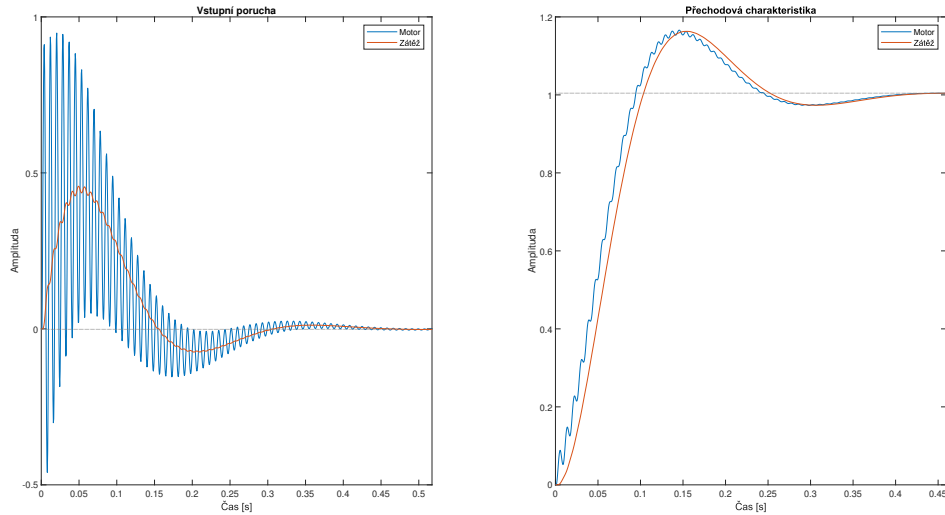
Metoda H_∞

Návrh PI regulátoru rychlosti

Návrh automatickou metodou dopadl velmi podobně jako v případě PID Tuneru. Indexy ve stabilitě a parametry regulátoru jsou znázorněny v tabulce 6.11. Indexy ve stabilitě jsou splněné, ale je patrné, že všechny indexy jsou poměrně na hraně povolených hodnot. Chování návrhu je znázorněno v grafu 6.14. V tomto případě přechodová charakteristika motoru obsahuje kmity s malou amplitudou. To by nemusel být u rychlostní smyčky problém. Mnohem horší chování je možné pozorovat při kompenzaci poruchy, kde jsou kmity na straně motoru velké a trvá dlouho než úplně ustanou. Na první pohled je vidět, že tento návrh dopadl hůř než v případě PID Tuneru. Lepší návrh by bylo možné získat změnou kritéria, například na IAE , které není vážené časem, z čehož vyplývá, že návrh by byl s delší dobou regulace, což by mělo vést k menším kmitům.

| k_p | k_i | g_m | p_m | s_m |
|-------|-------|--------|--------|-------|
| 0.024 | 29 | 2.1458 | 53.693 | 0.5 |

Tabulka 6.11: Parametry PI regulátoru H_∞ pro $r = 6$

Obrázek 6.14: Návrh PI regulátoru H_∞ pro $r = 6$

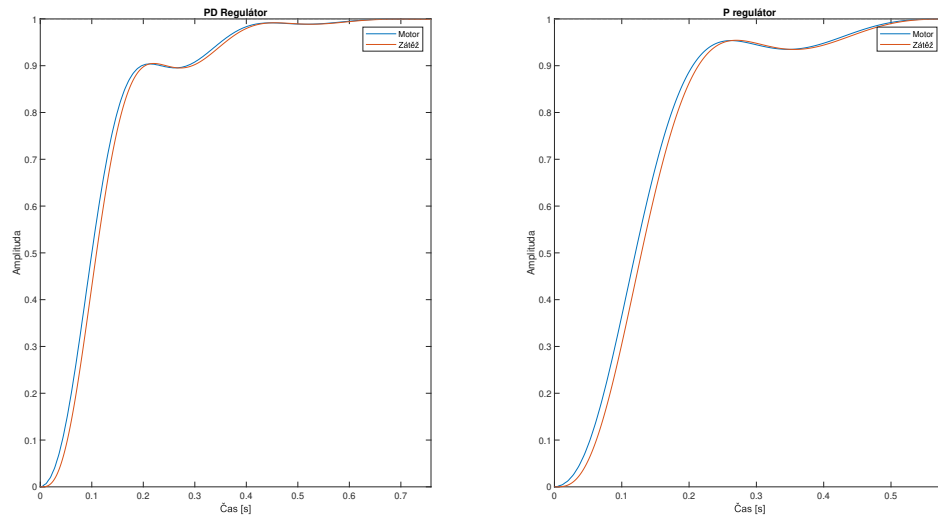
Návrh regulátoru polohy

Posledními regulátory navrženými pro typizované mechanické soustavy jsou regulátory polohy pro systém s parametrem $r = 6$. Hodnoty regulátorů a indexy stability uzavřené smyčky jsou zapsané v tabulce 6.12, kdy opět nebyl problém se stabilitou při návrhu. Přechodový

| k_p | g_m | p_m | s_m | k_p | k_d | g_m | p_m | s_m |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
| 7.27 | 4.14 | 73.53 | 0.67 | 12.14 | 0.497 | 6.96 | 83.219 | 0.8 |

Tabulka 6.12: Parametry regulátorů polohy navržené H_∞ metodou pro $r = 6$

chodový děj návrhů je znázorněn v obrázku 6.15, kde je možné si všimnout, že doba regulace u D je delší než u P regulátoru. V tomto případě D složka zajistila větší bezpečnost ve stabilitě, ale nikoliv rychlejší přechodovou odezvu. Chování polohové smyčky je vhodné pro implementaci.

Obrázek 6.15: Návrh polohových regulátorů H_∞ pro $r = 6$

6.7 Srovnání metod

V této části je provedené srovnání automatických metod H_∞ a PID Tuner na základě předchozích návrhů pro typizované mechanické soustavy. Obě metody úplně neselhaly ani v jednom z případů, vždy se povedlo najít řešení, které bylo stabilní, což je velmi důležité zjištění. Jednotlivé návrhy je vhodné zanalyzovat postupně podle jednotlivých soustav.

První soustava

Největší rozdíl návrhů nastal u rychlostní smyčky pro typizovanou soustavu $r = 1.1$. PID Tuner volil velmi malé zesílení, takže byl schopen ztlumit kmity na straně motoru, ale stále zde zůstaly jen velmi málo zatlumené kmity na straně zátěže. Tuner ani neumožnil dostat se k návrhu agresivního regulátoru, protože velmi rychle přecházel k nestabilním návrhům. Naopak metoda H_∞ navrhla mnohem agresivnější regulátor s mnohem nižší dobou regulace. Problém tohoto regulátoru je, že zde zůstane několik kmitů s poměrně velkou amplitudou. U polohové smyčky bylo možné pozorovat, že přechodový děj je lepší u návrhu PID Tunerem, ale doba regulace je dvakrát delší, než je tomu u H_∞ metody. V tomto případě byly získány dva návrhy, kdy je těžké jednoznačně určit, který je lepší.

Metodou H_∞ lze dosáhnout lepšího návrhu polohy tím, že se do všeho vloží návrhář. U tohoto systému je problém s kmitavostí zátěže. Při bližším prozkoumání tabulky je možné si všimnout, že většina regulátorů vede na uzavřenou smyčku, kde parametr M_{tl} je větší než hodnota 9. Doporučená hodnota je v tomto případě 2, při omezení tohoto parametru lze dojít k parametrům regulátoru velmi podobným jako v případě PID Tuneru.

Druhá soustava

U soustavy s $r = 2$ dopadl návrh PI regulátoru rychlosti velmi podobně u metody H_∞ se vyskytuje menší překmit než u návrhu PID Tunerem, ale doba regulace je delší. U polohové smyčky se ukazuje, že návrh PID Tuneru je rychlejší. To je pravděpodobně způsobeno rychlejší polohovou smyčkou. Ukazuje se tak, že je výhodnější použít PI regulátor rychlosti s větším překmitem a menší dobou regulace než naopak.

Třetí soustava

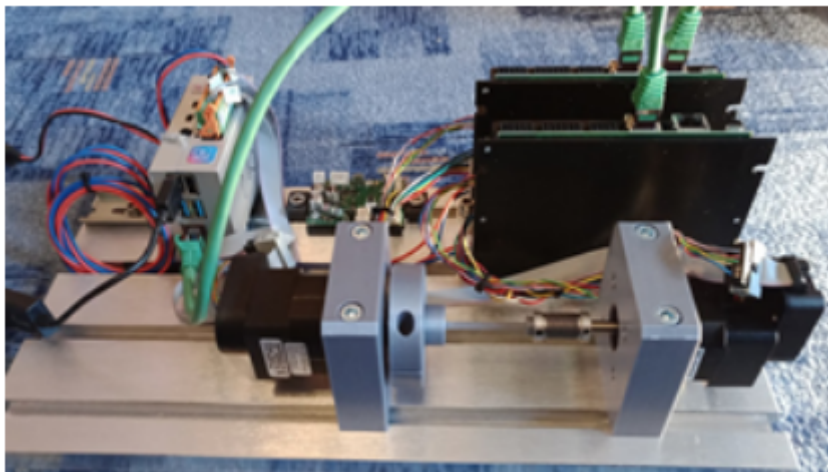
Poslední návrhy u mechanické soustavy s $r = 6$ dopadly opět velmi podobně. Rozdíl byl v tom, že metoda H_∞ navrhla agresivnější regulátor, což by normálně nebylo považováno jako vhodnější. V tomto případě se ale u polohové smyčky ukázalo, že přechodové děje jsou velmi podobné pro oba dva návrhy, ale metoda H_∞ má menší dobu regulace. Opět pokud by se do návrhu metodou H_∞ vložil návrhář bylo by možné parametry optimalizovat, tak aby vedly na lepší chování uzavřené smyčky.

Shrnutí

U automatických metod nelze jednoznačně rozhodnout, která poskytuje lepší návrhy. Metoda H_∞ někdy poskytovala agresivnější návrhy, než by bylo vhodné. To lze jednoduše ovlivnit tím, že se místo kritéria ITAE zvolí kritérium IAE, případně se vyřadí regulátory s moc velkým překmitem v přechodové charakteristice. Velkou výhodou metody H_∞ bylo to, že dokázala poskytovat velmi dobré návrhy naprosto automaticky pro všechny tři systémy, aniž by bylo potřeba jakéhokoliv zásahu návrháře. U PID Tuneru bylo potřeba zásahů návrháře k tomu, aby bylo dosaženo požadované chování uzavřené smyčky. Výhodou PID Tuneru je dobrá optimalizace a vlídné uživatelské prostředí. Významný rozdíl je také v množství poskytovaných informací o systému danými metodami. Skript s metodou H_∞ je velmi dobře připravený na kmitavé systémy a je schopen okamžitě poskytnout velké množství informací o obou stranách soustavy. Velkou výhodou metody H_∞ je, že najde všechny regulátory, které splňují návrhové požadavky. PID Tuner nalezne pouze jeden, který může být nestabilní. U metody H_∞ je zaručeno, že systém bude stabilní a bude splňovat index na bezpečnost ve stabilitě s_m . Pokud se metoda H_∞ vezme jako poloautomatická metoda nikoliv plně automatická, je jisté, že metoda nalezla správné parametry regulátoru pokud existují. Úkolem je poté jen pouze tyto parametry z celé množiny regulátorů vybrat.

7. Reálná soustava

Následující kapitola je zaměřena na zkoušku návrhové metody na skutečném elektromechanickém systému, který se skládá ze dvou motorů. Ty jsou spolu spojené hřídelí (obrázek 7.1). Jeden motor je řízený a druhý je neřízený, představující zátěž. Model je takto vymyšlený z toho důvodu, že je možné měřit obě dvě strany a zároveň je možné uměle vytvářet vstupní poruchu na straně zátěže.



Obrázek 7.1: Reálná soustava

7.1 Model a přenosové funkce soustavy

Experimentální identifikací soustavy byly získány přenosové funkce rychlosti pro stranu motoru 7.1 a stranu zátěže 7.2. Schéma náhodné soustavy je ilustrováno v obrázku 7.2, kde je znázorněné spojení obou motorů za pomoci hřídele.



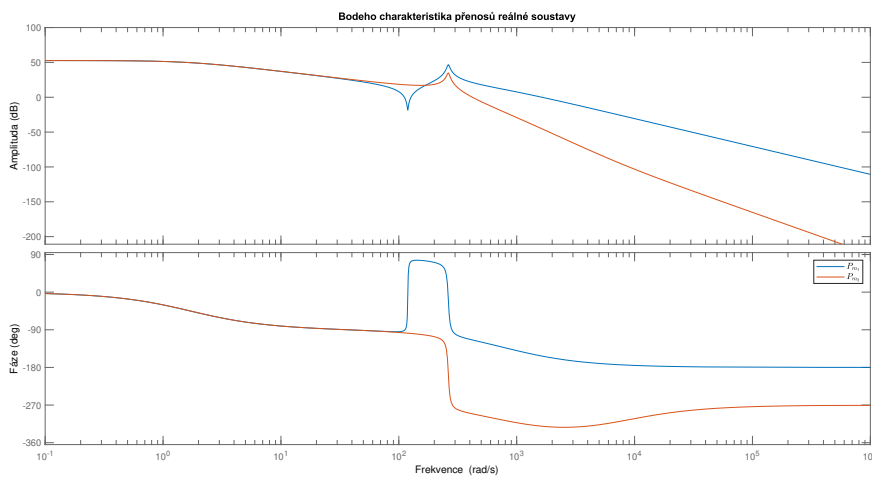
Obrázek 7.2: Schéma reálné soustavy

V přenosech chybí dynamika uzavřené proudové smyčky T_i , kterou je nutné před návrhem do přenosových funkcí zahrnout. Ostatní přenosy z teoretických modelů z kapitoly 3.4, jako je filtr nebo pomalá mechanická část motoru jsou již součástí přenosů. Důležité je poznamenat, že řídicí jednotka je digitální a pracuje s frekvencí vzorkování 4000Hz. Vzhledem k vysoké frekvenci vzorkování se systém považuje jako spojitý a neprovádí se diskretizace.

$$P_{m_1} = \frac{2.938 \cdot 10^6 s^2 + 5.491 \cdot 10^6 s + 4.168 \cdot 10^{10}}{s^4 + 837.6s^3 + 8.088e04s^2 + 5.71 \cdot 10^7 s + 9.719 \cdot 10^7} \quad (7.1)$$

$$P_{m_2} = \frac{5.4917 \cdot 10^6 (s + 7592)}{(s + 823.4)(s + 1.706)(s^2 + 12.45s + 6.92 \cdot 10^4)} \quad (7.2)$$

Pro oba dva přenosy P_{m_1} a P_{m_2} jsou v obrázku 7.3 vykreslené bodeho frekvenční charakteristiky, kde je velmi dobře pozorovatelný typický průběh pro dvou hmotové systémy, které byly odvozené teoreticky. Přenos P_{m_1} obsahuje rezonanci a antirezonanci, naopak přenos P_{m_2} obsahuje pouze rezonanci. Antirezonance se vyskytuje v oblasti 120 radiánů za sekundu. Naopak rezonance se objevuje okolo 260 radiánů za sekundu, velikost rezonancí je velmi podobná u obou dvou systémů, ale o trochu převyšuje rezonance přenosu P_{m_1} .



Obrázek 7.3: Bodeho charakteristika přenosů reálného systému

7.2 Návrh a simulace

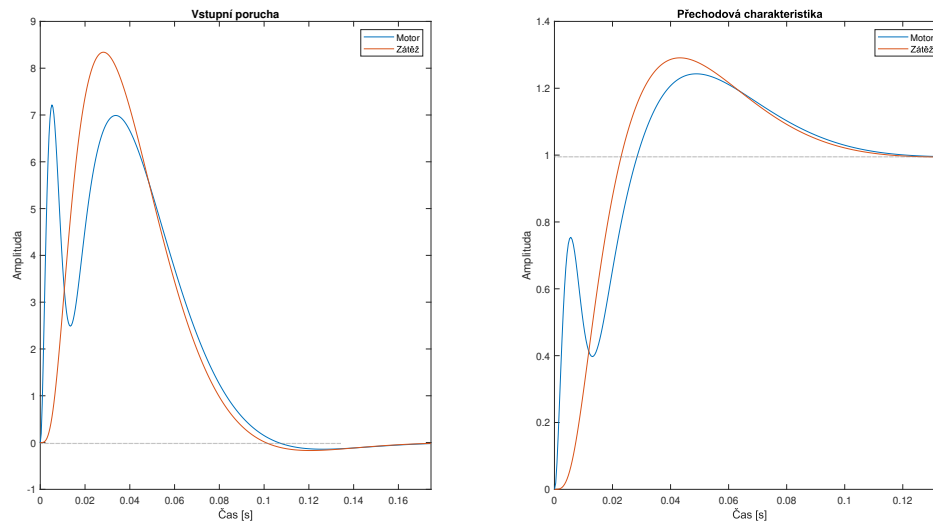
K návrhu je využita automatická metoda, jejíž nastavení se změnilo oproti typizovaným mechanickým soustavám. Ukázalo se, že současné nastavení není úplně optimální a je vhodné zvětšit indexy ve stabilitě tak, aby navržené regulátory byly méně agresivní a vedly tak na méně kmitavou odezvu.

Metoda tedy byla nastavena s těmito parametry: $M_s = 2$, $p_m = 60$, $s_m = 0.5$ a $g_m = 2$ pro rychlostní PI regulátor. Pro polohovou smyčku zůstalo nastavení stejné jako v předchozích případech bez překmitu u přechodové charakteristiky.

Výsledné parametry PI regulátoru jsou znázorněné v tabulce 7.1 a simulace chování uzavřené smyčky jsou v obrázku 7.4. Doba regulace je velmi rychlá, systém se dokáže ustálit do 0.12 sekundy. Nevýhodou tohoto regulátoru je překmit více než 20%, ale v případě rychlostního regulátoru to netvoří takový problém.

| k_p | k_i | g_m | p_m | s_m |
|---------|-------|-------|-------|-------|
| 0.09595 | 2.71 | 43.63 | 60.71 | 0.78 |

Tabulka 7.1: Parametry PI regulátoru

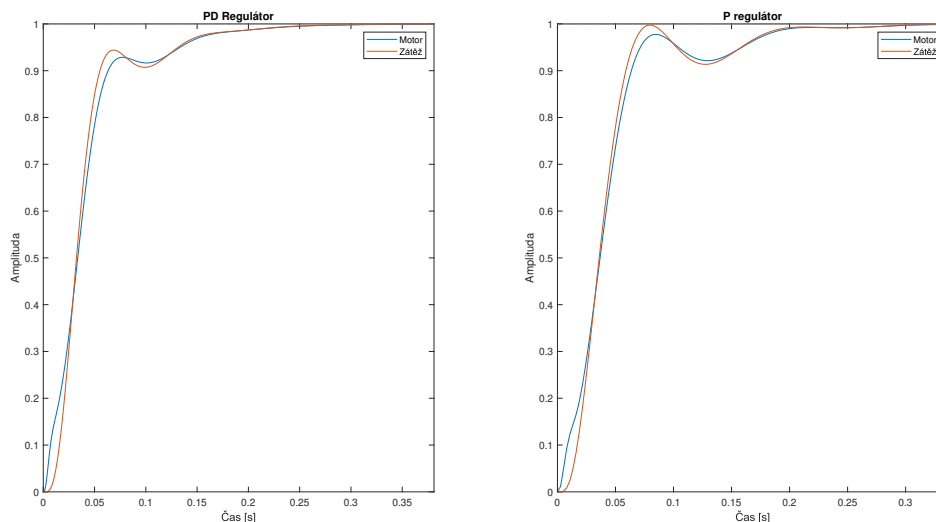


Obrázek 7.4: Návrh PI regulátoru pro reálnou soustavu

Následoval návrh polohové smyčky a to jak pro P tak i PD regulátor. Parametry obou návrhů jsou zobrazené v tabulce 7.2 a přechodové charakteristiky jsou vykreslené v obrázku 7.5. V tomto případě by se systém měl ustálit do 0.3 sekund a neměl by se u něj projevit překmit.

| k_p | g_m | p_m | s_m | k_p | k_d | g_m | p_m | s_m |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 22.98 | 9.96 | 75.20 | 0.71 | 34.66 | 0.43 | 16.97 | 86.65 | 0.83 |

Tabulka 7.2: Parametry regulátorů polohy pro reálnou soustavu



Obrázek 7.5: Návrh polohových regulátorů pro reálnou soustavu

7.3 Zkouška regulátorů

Návrh řídicího systému má několik fází, které je důležité postupně projít. Po získání parametrů regulátoru se provádí ověření správnosti simulací. Pokud vše dopadne dle očekávání, přistupuje se k testům na reálném systému. Ty teprve ukážou, zda vše funguje jak má a nebylo při návrhu něco podstatného zanedbáno.

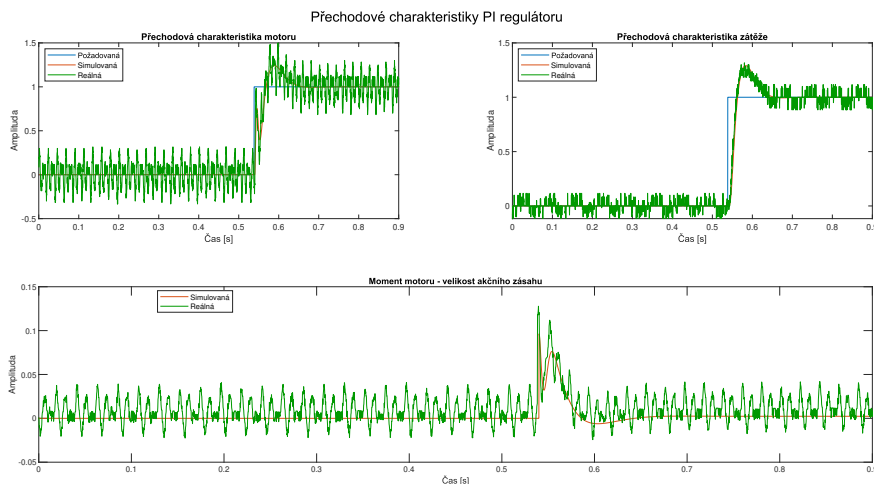
Postup testování kaskádního systému je možné provést stejně jako samotný návrh, nejprve pouze otestovat regulátor rychlosti a až poté testovat polohové regulátory. Postupné testování má obdobné výhody jako postupný návrh. Snáze se zjistí špatně fungující regulátor, než kdyby tomu bylo v případě testování celé smyčky najednou.

7.3.1 Zkouška PI regulátoru rychlosti

Začíná se testem PI regulátoru rychlosti. Cílem tohoto testu bylo ověřit reakci uzavřené smyčky na změnu požadované hodnoty a také zjistit odezvu na vstupní poruchu. Největší důraz se klade na stabilitu celého systému. To bylo v práci zmíněno již několikrát, a to z toho důvodu, že případná nestabilita by mohla způsobit poškození stroje nebo jeho okolí.

Nejprve bylo ověřeno chování na změnu požadované hodnoty. Změna proběhla z hodnoty 0 na hodnotu 1, průběh tohoto přechodu je zaznamenán v obrázku 7.6. Tam je srovnání z průběhu simulace a experimentu, na první pohled je vidět, že signál experimentu působí velmi zašuměně až kmitavě. Nad tímto problémem je vhodné se zamyslet vzhledem k tomu, že to může být místo náchylné na nějaký problém.

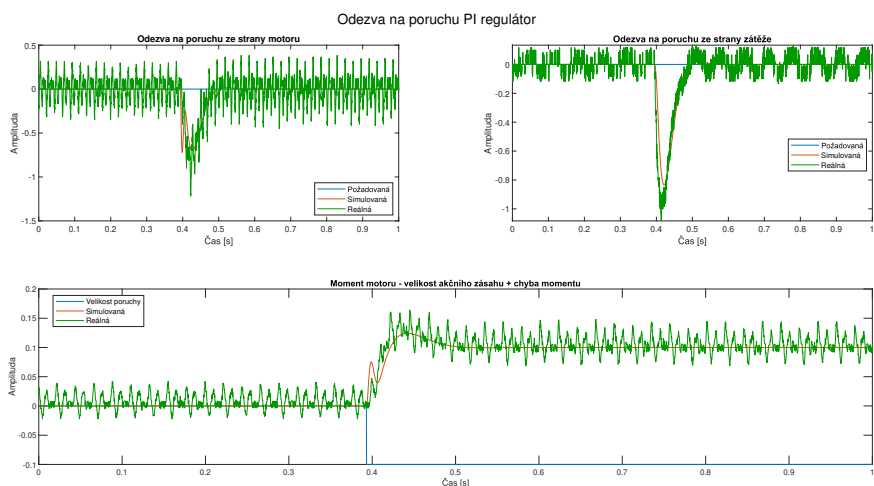
Důležité zjištění experimentu je, že uzavřená smyčka je stabilní a kopíruje signál, který byl získán simulací. Toto zjištění dokazuje, že parametry regulátoru byly získány správně.



Obrázek 7.6: Přechodová charakteristika reálného systému - rychlostní smyčka

Dále bylo důležité ověřit chování systému při působení poruchy, průběh tohoto experimentu ukazuje obrázek 7.7, kde je vidět, že systém poruchu dokáže kompenzovat opět velmi podobně jako v případě simulace. V obrázku na spodním grafu je vidět, jak musí motor zvýšit moment, aby dokázal udržet požadovanou rychlost a je tam také znázorněno působení poruchy v podobě momentu.

Experiment s rychlostní uzavřenou smyčkou probíhal přibližně 40 sekund a celou dobu nedošlo k selhání regulátoru. Testování uzavřené smyčky lze považovat za úspěšné, regulátor dokázal spolehlivě řídit rychlost motoru. Otázkou pouze zůstává vliv šumu, který má v tomto případě vysokou amplitudu.



Obrázek 7.7: Odezva na poruchu PI regulátor na reálném systému

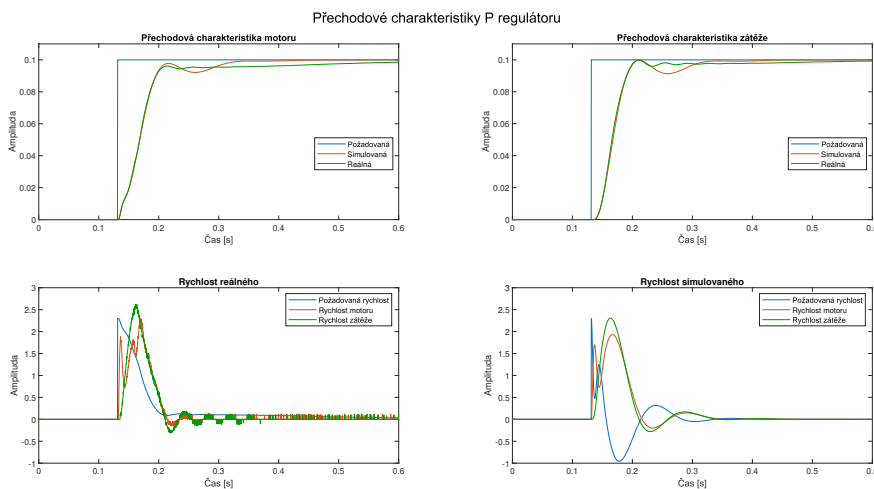
7.3.2 Polohové regulátory

Po otestování rychlostního regulátoru je možné posunout se o úroveň výše k polohovým regulátorům. Požadavky jsou velmi podobné jako v případě rychlostní smyčky, důležitá je stabilita a schopnost kompenzování konstantní poruchy. Požadavkem navíc byla rychlostní smyčka bez překmitu.

P regulátor

Zkouška probíhala obdobně jako u rychlostní smyčky, nejprve bylo cílem ověřit chování na změnu požadované hodnoty. To je znázorněno v obrázku 7.8, kde jsou zaznamenané polohy i rychlosti. Přechodové charakteristiky se v tomto případě liší více než tomu bylo u rychlostní smyčky. Je opět důležité, že systém se jeví stabilní a také se podařilo zachovat přechodovou charakteristiku bez překmitu.

Otázkou zůstává z jakého důvodu se chování liší více než tomu bylo v případě rychlostní smyčky. Je možné se domnívat, že rozdíly v chování mohou být způsobené neurčitostí modelu, dynamikou, která nebyla modelovaná. Důvod vyšší odchylky u polohové než u rychlostní smyčky je také způsobeno tím, že rychlostní smyčka sama o sobě způsobuje odchylku a tím kazí přesnost polohové smyčky.

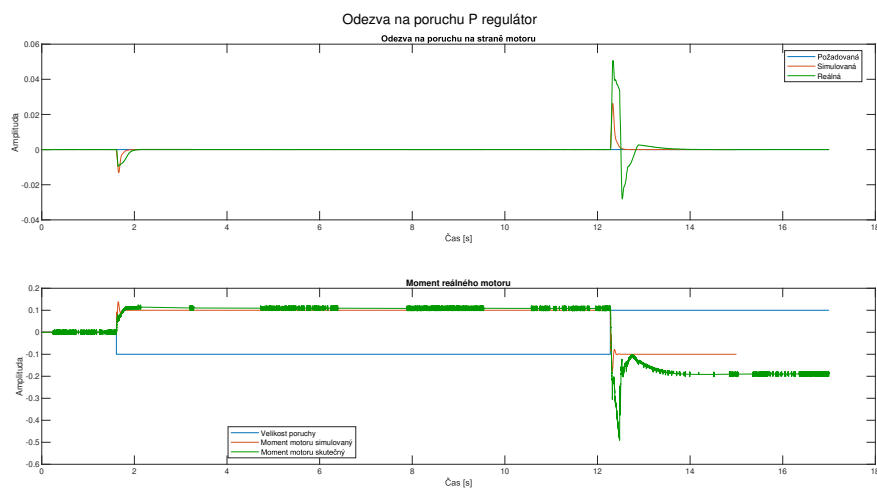


Obrázek 7.8: Zkouška přechodu P regulátoru na reálném systému

Součástí testování bylo také ověření schopnosti systému kompenzovat vstupní poruchu. Při experimentu byly aplikovány dvě poruchy různé velikosti v různých časech. V horním grafu v obrázku 7.9 je patrné že poruchu se podařilo vykompenzovat. Zajímavý jev se ukázal ve druhém grafu v obrázku 7.9, protože v tomto případě motor musí působit větším momentem pro kompenzování poruchy než tomu bylo v simulaci. Ukazuje se nelinearita soustavy, která byla při linearizaci zanedbána.

Testování ukázalo, že P regulátor je schopen stabilizovat uzavřenou smyčku. Kompenzace

poruchy dopadla také přijatelně. Velmi dobré je, že regulátor je schopen řídit soustavu i přes její nelinearitu.

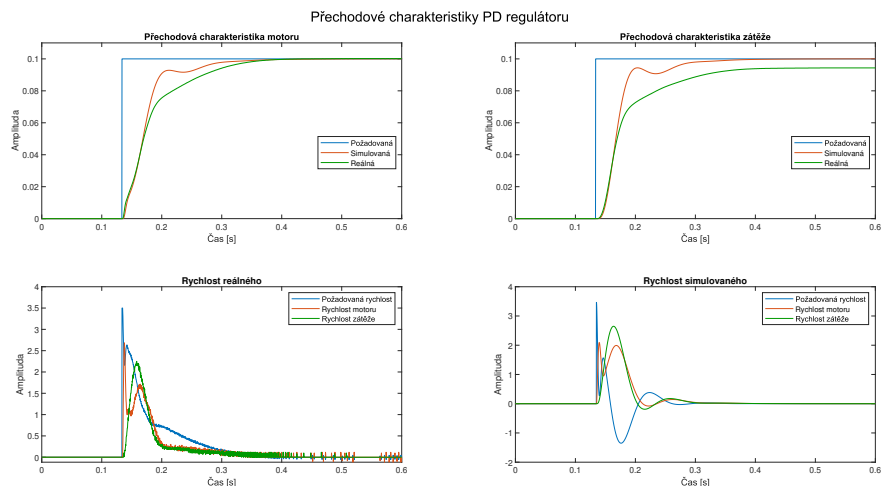


Obrázek 7.9: Odezva na poruchu P regulátor na reálném systému

PD regulátor

V druhé části testování polohových regulátorů je rozebráno a vyzkoušeno chování PD regulátoru. Tento regulátor by měl přinést lepší chování než P regulátor. Zkouška proběhla se zaměřením na změnu a vysledování požadované hodnoty a také na schopnost kompenzace poruchy.

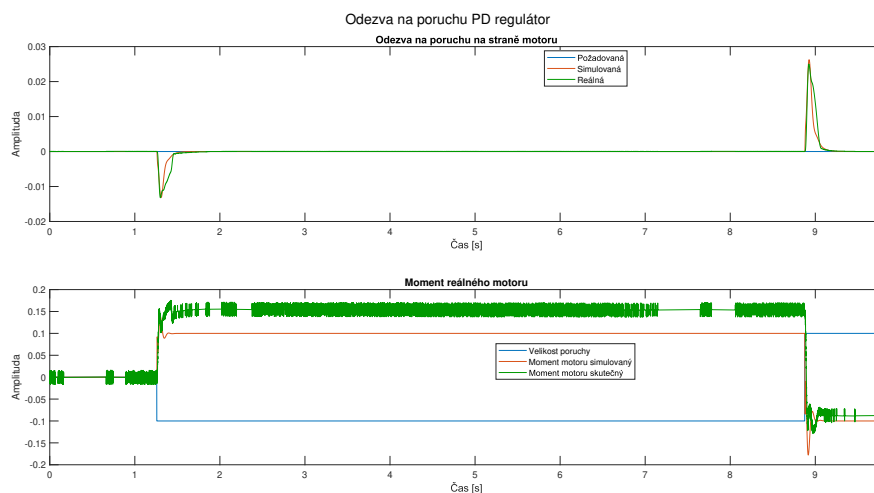
Nejprve proběhly testy, které se zaměřily na změnu požadované hodnoty. Průběh testu je zaznamenaný v obrázku 7.10, kde je důležité se pozastavit nad dvěma jevy. Za prvé se v přechodu vyskytuje odlišnost od simulace, což bylo pozorováno i u P regulátoru. Za druhé došlo k situaci, kdy strana zátěže nedojela na požadovanou hodnotu. To se očekává vzhledem k tomu, že je uzavřená zpětná vazba pouze od motoru nikoliv od zátěže. Tento jev se neukázal u předchozího regulátoru, protože nenastal v takové míře jako to bylo u PD regulátoru.



Obrázek 7.10: Zkouška přechodu PD regulátoru na reálném systému

Druhá část testování byla zaměřena na kompenzaci poruchy, průběh je zaznamenán v grafu 7.11. Na tomto obrázku je velmi dobře patrné, že simulace i reálný systém dopadly velmi podobně a lze toto chování považovat za velmi dobré. Tak jako u P regulátoru i v tomto případě se projevila nelinearita motoru, když motor musel vyvinout větší moment při kompenzování poruchy než v případě simulace.

PD regulátor polohy dopadl při testování nad očekávání dobře. Lze konstatovat, že reálné zkoušky dopadly lépe než simulace. Tento regulátor by byl s PI regulátorem rychlosti vhodný pro řízení takové soustavy, kdy doba regulace je přibližně 0.2 sekundy.



Obrázek 7.11: Odeza na poruchu PD regulátor na reálném systému

8. Závěr

Bakalářská práce je zaměřena na automatický návrh PID regulátorů pro poddajné elektromechanické soustavy. Čtenář je hned v prvních částech práce seznámen obecně s problematikou automatického řízení. Na to navazuje seznámení se s rozbohem dynamického chování elektromechanických soustav, kde je uveden i jejich lineární model. V závěru teoretické části jsou popsány automatické metody návrhu regulátorů metodou H_∞ a aplikací PID Tuner, která je implementována v Matlabu.

Praktická část práce se zaměřila na tvorbu automatické metody návrhu PI regulátorů, kde byl využit algoritmus metody H_∞ regionu. Cílem bylo vytvořit skript, který dokáže nalézt vhodné parametry regulátoru rychlosti a polohy. V návaznosti na to byla metoda automatického návrhu vyzkoušena na několika soustavách a návrhy byly srovnány s návrhy z aplikace PID Tuner. V závěru práce je skript využit k návrhu regulátorů pro reálnou soustavu. Součástí přílohy jsou další návrhy pro náhodné dvou hmotové soustavy a také je zde schéma řídicího systému použitého pro řízení reálné soustavy.

Nyní v závěru práce je vhodné se zamyslet nad výsledky, kterých bylo dosaženo. Podařilo se vytvořit metodu v Matlabu, která má v sobě implementované funkce, které dokážou automaticky nalézt parametry PI regulátoru. Součástí metody je několik funkcí, které pomáhají návrháři nalézt požadované parametry. Srovnání metod ukázalo schopnost navrhnout stabilní regulátory. V závěru se ukázalo, že metoda je schopna navrhnout regulátor pro reálnou soustavu, problém se objevil v případě nastavení metody, kdy bylo potřeba kvůli kmitavé dynamice zpřísnit požadavky na bezpečnost ve fázi. Testování regulátorů na reálné soustavě se ukázalo jako velmi úspěšné, kdy regulátory nesehaly a poměrně přesně byly schopné řídit reálnou soustavu.

Automatický skript se během používání ukázal jako velmi schopný, pokud byl v rukách návrháře, který věděl jaké chování chce od uzavřené smyčky. Ukázalo se, že je klíčové metodu správně nastavit a zvolit, podle kterých parametrů bude vybrán výsledný regulátor. Do budoucna by bylo vhodné zaměřit se na správné defaultní nastavení metody. Na skriptu je dobré, že vždy vede na stabilní uzavřenou smyčku.

Automatické funkce je třeba v budoucnu lépe optimalizovat, tak aby fungovaly v řádu sekund. Pro zrychlení metody je možné využít paralelních výpočtů, které dokáží zkrátit dobu běhu o více než polovinu, přesto metoda není rychlostně schopna konkurovat aplikaci PID Tuner v Matlabu. Dále by bylo vhodné vytvořit uživatelské prostředí, které by zpřehlednilo návrh.

Metoda automatického návrhu přináší možnost zohlednit kmitavou část zátěže u dvou hmotových soustav při návrhu regulátoru, v čemž spočívá její největší výhoda. Správně nastavená metoda by měla mít využití hlavně v průmyslu, kde se často využívá PID regulace a je zde nedostatek pracovníků, kteří by byly schopni nalézt vhodné parametry pro tyto regulátory.

Bibliografie

- [1] K. Åström a T. Häggglund. *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*. English. ISA - The Instrumentation, Systems a Automation Society, 1995. ISBN: 1-55617-516-7.
- [2] K. Åström a R. Murray. *Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers*. USA: Princeton University Press, 2008. ISBN: 0691135762.
- [3] R. Bannatyne a G. Viot. “Introduction to microcontrollers. I”. In: *Wescon/98. Conference Proceedings (Cat. No.98CH36265)*. 1998, s. 350–360. DOI: 10.1109/WESCON.1998.716623.
- [4] M. Brabec. *Návrh PID regulátoru metodou H-nekonečno optimalizace*. Západočeská univerzita, Plzeň, 2020.
- [5] G. Ellis a R.D. Lorenz. “Resonant load control methods for industrial servo drives”. In: *Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Fifth IAS Annual Meeting and World Conference on Industrial Applications of Electrical Energy (Cat. No.00CH37129)*. Sv. 3. 2000, 1438–1445 vol.3. DOI: 10.1109/IAS.2000.882073.
- [6] M. Goubelj. “Robustní řízení pohybu pružných elektromechanických soustav”. Dis. Západočeská univerzita v Plzni, 2015.
- [7] R. Isermann. “Mechatronic systems-a challenge for control engineering”. In: *Proceedings of the 1997 American Control Conference (Cat. No.97CH36041)*. Sv. 5. 1997, 2617–2632 vol.5. DOI: 10.1109/ACC.1997.611932.
- [8] R. Isermann. “On the design and control of mechatronic systems-a survey”. In: *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 43.1 (1996), s. 4–15. DOI: 10.1109/41.481402.
- [9] J. Liška. *Systémy a modely 1, přednášky*. Letní semestr 2021.
- [10] Mathworks.com. *Tune PID Controller to Favor Reference Tracking or Disturbance Rejection (PID Tuner) - MATLAB, Simulink*. [cit. 10.05.2021]. URL: <https://www.mathworks.com/help/control/getstart/tune-pid-controller-to-balance-tracking-and-disturbance-rejection.html>.
- [11] Mathworks.com. *Tune PID controllers - MATLAB*. [cit. 10.05.2021]. URL: <https://www.mathworks.com/help/control/ref/pidtuner-app.html>.
- [12] J. Melichar a M. Goubelj. *Lineární systémy 1*. Západočeská univerzita, Plzeň, 2017.
- [13] J. Melichar a M. Goubelj. *Lineární systémy 2*. Západočeská univerzita, Plzeň, 2019.
- [14] P. Puchmajer. *Pružnost a pevnost*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN: 80-01-03244-2.
- [15] REX Controls s.r.o. *On-line PID and Control Laboratory*. [cit. 07.5.2021]. URL: <https://virtual.pidlab.com/>.

- [16] M. Schlegel a P Medvecová. “Design of PI Controllers: H_{∞} Region Approach”. In: *IFAC-PapersOnLine* 51.6 (2018). 15th IFAC Conference on Programmable Devices and Embedded Systems PDeS 2018, s. 13–17. ISSN: 2405-8963. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.07.122>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896318308668>.
- [17] S.N. Vukosavic a M.R. Stojic. “Suppression of torsional oscillations in a high-performance speed servo drive”. In: *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 45.1 (1998), s. 108–117. DOI: 10.1109/41.661311.
- [18] S.N. Vukosavić. “Digital Control of Electrical Drives”. In: *Digital Control of Electrical Drives* (led. 2007), s. 1–353. DOI: 10.1007/978-0-387-48598-0.
- [19] B. Werner. “On Vibration Damping of Hydraulically Driven Flexible Robots”. In: *IFAC Proceedings Volumes* 30.20 (1997). 5th IFAC Symposium on Robot Control 1997 (SY-ROCO '97), Nantes, France, 3-5 September, s. 643–648. ISSN: 1474-6670. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)44330-8](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)44330-8). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667017443308>.
- [20] J. Zahradníček. *Mechanické kmity*. Praha: Jednota českosl. matematiků a fyzikůUT, 1942.
- [21] G. Zhang a J. Furusho. “Speed control of two-inertia system by PI/PID control”. In: *Proceedings of the IEEE 1999 International Conference on Power Electronics and Drive Systems. PEDS'99 (Cat. No.99TH8475)*. Sv. 1. 1999, 567–572 vol.1. DOI: 10.1109/PEDS.1999.794627.

Příklady návrhů pro náhodné soustavy

V této kapitole jsou navrženy regulátory pro dvou hmotové kmitavé systémy s náhodně generovanými parametry r , ξ_z a ω_z . Konkrétně se jedná o 5 systémů, pro které byly navrženy regulátory s důrazem na co nejmenší dobu regulace, jak pro přechodovou charakteristiku, tak také pro kompenzaci poruchy.

Nastavení metody

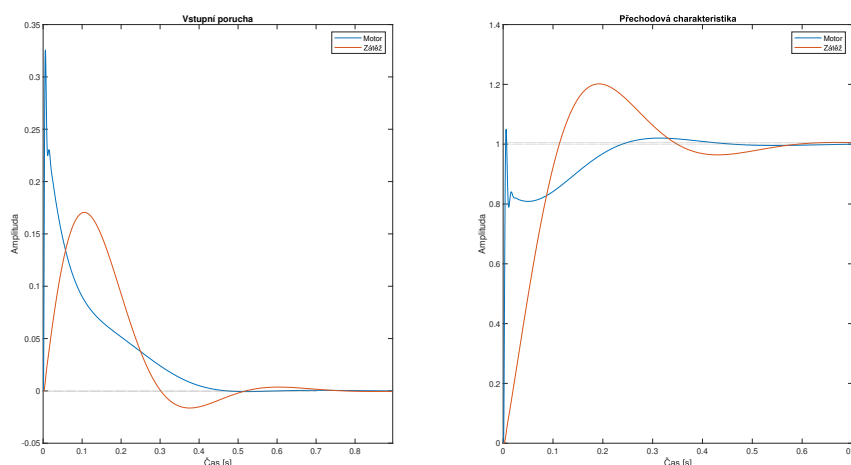
Automatická metoda byla nastavena velmi podobně jako v předchozích kapitolách. Parametry $M_s = 1.8$, $p_m \in (50, \infty)$ a $g_m \in (2.2, \infty)$. Výběr regulátoru se prováděl na základě nejnižšího součtu všech vypočítaných kritérií ITAE. Stejné nastavení bylo použito jak pro rychlostní, tak polohovou smyčku. U polohové smyčky ještě docházelo k dvojitému vyhodnocení tabulky pro zpřesnění návrhu a výsledný regulátor musel být bez překmitu.

Soustava č.1

Parametry soustavy č.1 a výsledný návrh PI regulátoru jsou popsány v tabulce 8.1, obdobně jsou parametry pro polohovou smyčku v tabulce 8.2. Tabulky jsou doplněny obrázky s přechodovými charakteristikami.

| r | ω_z | x_z | k_p | k_i | g_m | p_m | s_m |
|------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 2.65 | 15.74 | 0.36 | 3.11 | 36.43 | 2.79 | 55.88 | 0.55 |

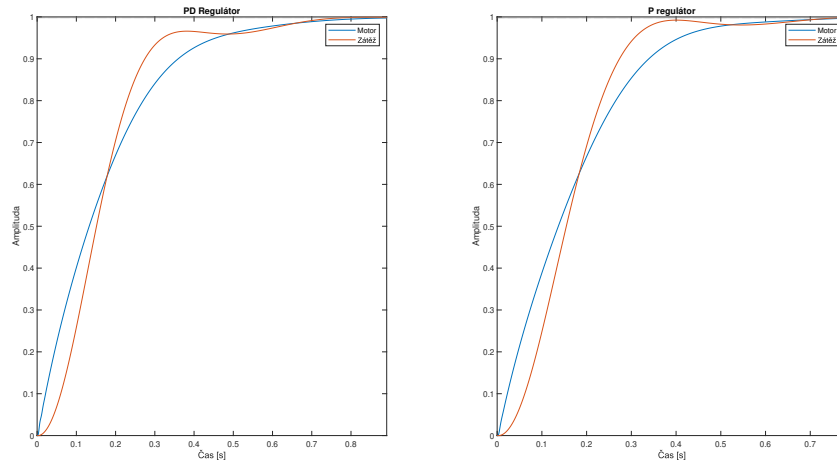
Tabulka 8.1: Parametry první náhodné soustavy a PI regulátoru



Obrázek 8.1: Návrh PI regulátoru pro první soustavu

| k_p | g_m | p_m | s_m | k_p | k_d | g_m | p_m | s_m |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 6.05 | 73.09 | 81 | 0.97 | 9.31 | 0.59 | 87 | 86 | 0.99 |

Tabulka 8.2: Parametry regulátorů polohy pro první náhodnou soustavu



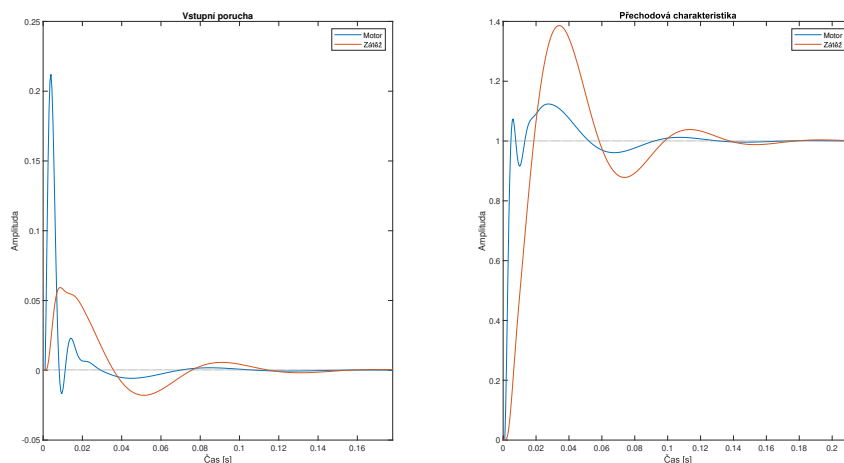
Obrázek 8.2: Návrh rychlostních regulátorů pro první soustavu

Soustava č.2

Parametry soustavy č.2 a výsledný návrh PI regulátoru jsou popsány v tabulce 8.3, obdobně jsou parametry pro polohovou smyčku v tabulce 8.4. Tabulky jsou doplněny obrázky s přechodovými charakteristikami.

| r | ω_z | x_z | k_p | k_i | g_m | p_m | s_m |
|------|------------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|
| 3.18 | 102.53 | 0.357 | 1.98 | 1147.7 | 2.73 | 61.04 | 0.55 |

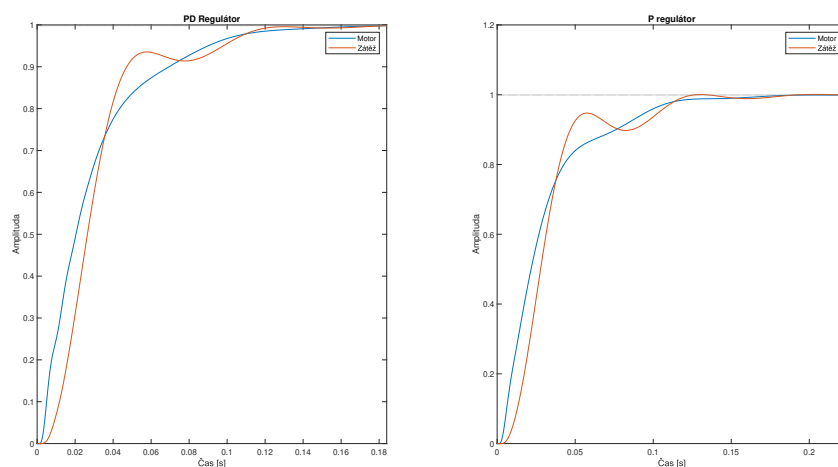
Tabulka 8.3: Parametry druhé náhodné soustavy a PI regulátoru



Obrázek 8.3: Návrh PI regulátoru pro druhou soustavu

| k_p | g_m | p_m | s_m | k_p | k_d | g_m | p_m | s_m |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 32.06 | 14.74 | 87.24 | 0.86 | 53.7 | 0.59 | 17.12 | 89 | 0.94 |

Tabulka 8.4: Parametry regulátorů polohy pro druhou náhodnou soustavu



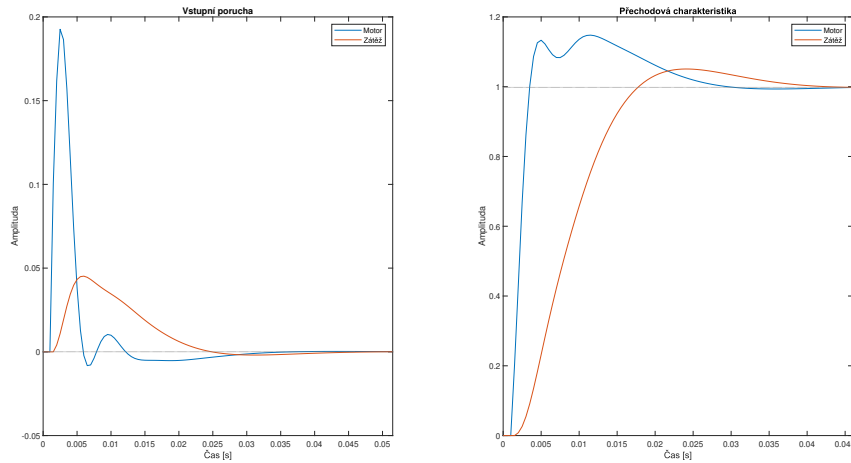
Obrázek 8.4: Návrh rychlostních regulátorů pro druhou soustavu

Soustava č.3

Parametry soustavy č.3 a výsledný návrh PI regulátoru jsou popsány v tabulce 8.5, obdobně jsou parametry pro polohovou smyčku v tabulce 8.6. Tabulky jsou doplněny obrázky s přechodovými charakteristikami.

| r | ω_z | x_z | k_p | k_i | g_m | p_m | s_m |
|------|------------|-------|-------|---------|-------|-------|-------|
| 4.82 | 306 | 0.281 | 1.48 | 2136.75 | 2.52 | 61.1 | 0.56 |

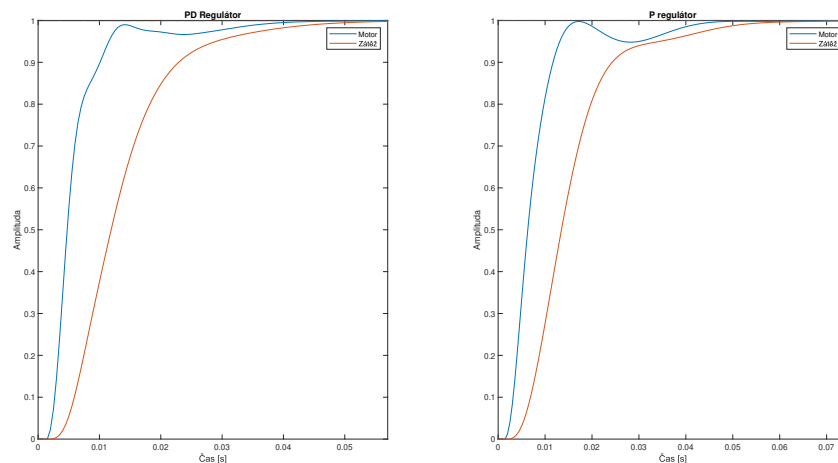
Tabulka 8.5: Parametry třetí náhodné soustavy a PI regulátoru



Obrázek 8.5: Návrh PI regulátoru pro třetí soustavu

| k_p | g_m | p_m | s_m | k_p | k_d | g_m | p_m | s_m |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 124.37 | 4.76 | 66.46 | 0.71 | 223.8 | 0.41 | 5.96 | 83.15 | 0.83 |

Tabulka 8.6: Parametry regulátorů polohy pro třetí náhodnou soustavu



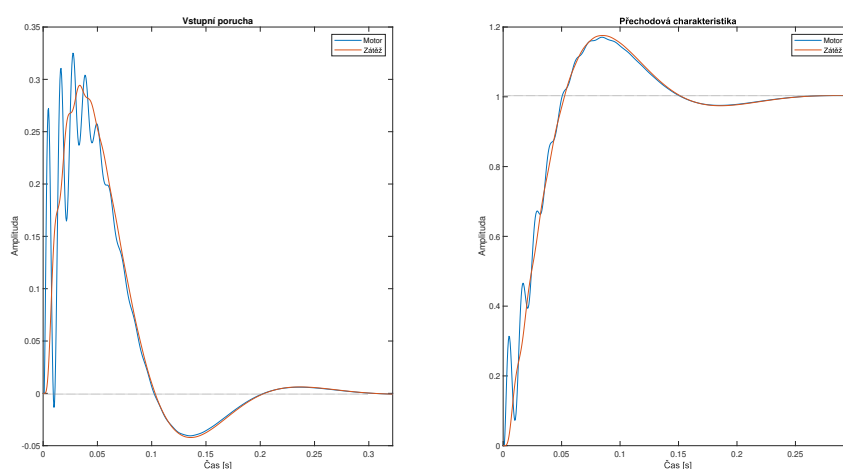
Obrázek 8.6: Návrh rychlostních regulátorů pro třetí soustavu

Soustava č.4

Parametry soustavy č.4 a výsledný návrh PI regulátoru jsou popsány v tabulce 8.7, obdobně jsou parametry pro polohovou smyčku v tabulce 8.8. Tabulky jsou doplněny obrázky s přechodovými charakteristikami.

| r | ω_z | x_z | k_p | k_i | g_m | p_m | s_m |
|------|------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 2.72 | 179.76 | 0.0227 | 0.99 | 67.61 | 5.33 | 50.11 | 0.6 |

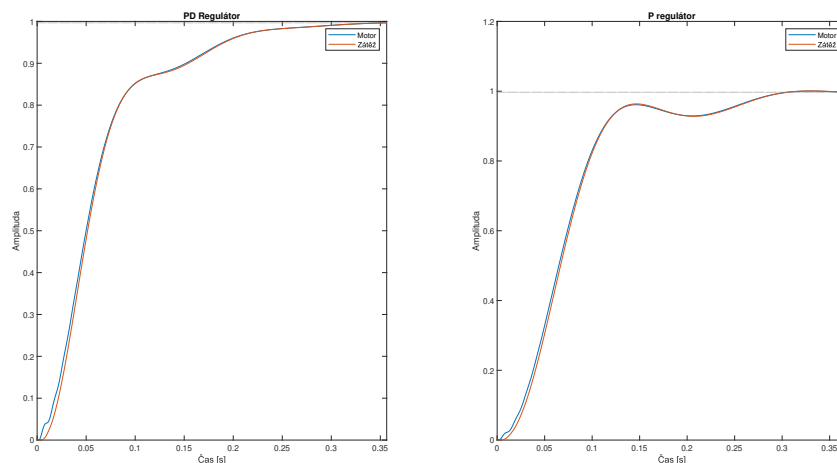
Tabulka 8.7: Parametry čtvrté náhodné soustavy a PI regulátoru



Obrázek 8.7: Návrh PI regulátoru pro čtvrtou soustavu

| k_p | g_m | p_m | s_m | k_p | k_d | g_m | p_m | s_m |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 13.22 | 6.12 | 75.21 | 0.68 | 30.97 | 1.049 | 33.49 | 87.12 | 0.89 |

Tabulka 8.8: Parametry regulátorů polohy pro čtvrtou náhodnou soustavu



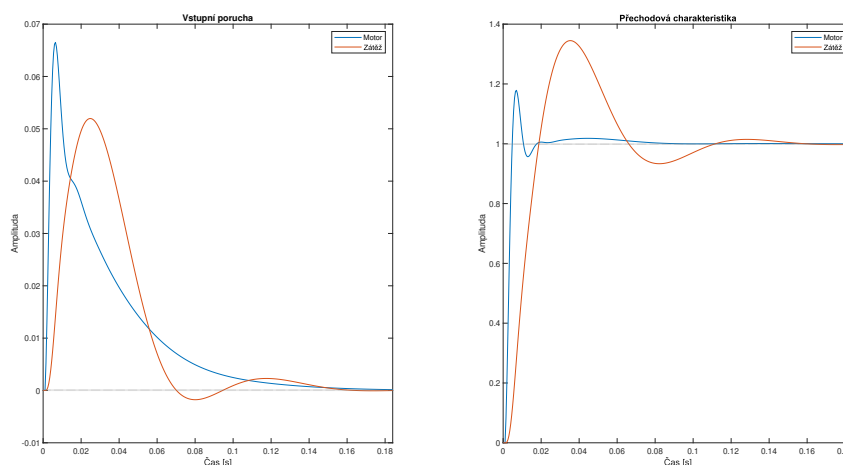
Obrázek 8.8: Návrh rychlostních regulátorů pro čtvrtou soustavu

Soustava č.5

Parametry soustavy č.5 a výsledný návrh PI regulátoru jsou popsány v tabulce 8.9, obdobně jsou parametry pro polohovou smyčku v tabulce 8.10. Tabulky jsou doplněny obrázky s přechodovými charakteristikami.

| r | ω_z | x_z | k_p | k_i | g_m | p_m | s_m |
|-----|------------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|
| 1.1 | 77.4 | 0.4367 | 15.97 | 508.56 | 2.94 | 50 | 0.55 |

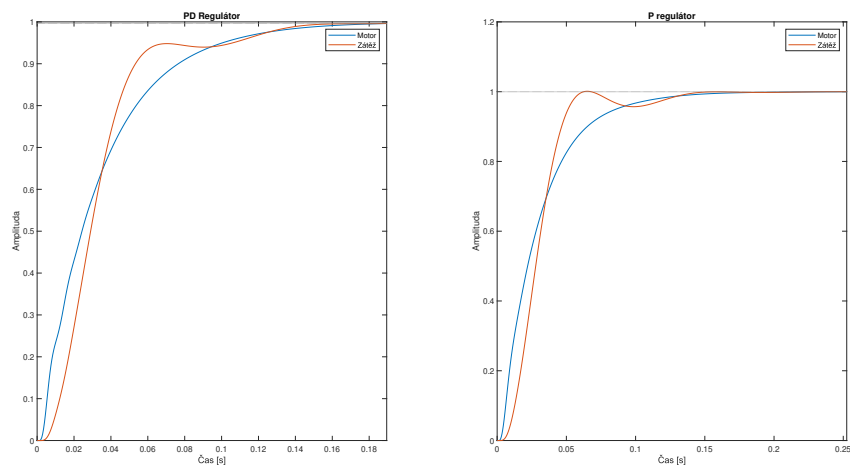
Tabulka 8.9: Parametry páté náhodné soustavy a PI regulátoru



Obrázek 8.9: Návrh PI regulátoru pro pátou soustavu

| k_p | g_m | p_m | s_m | k_p | k_d | g_m | p_m | s_m |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
| 32.5067 | 11.23 | 84.42 | 0.9 | 47.56 | 0.65 | 14.46 | 88.114 | 0.93 |

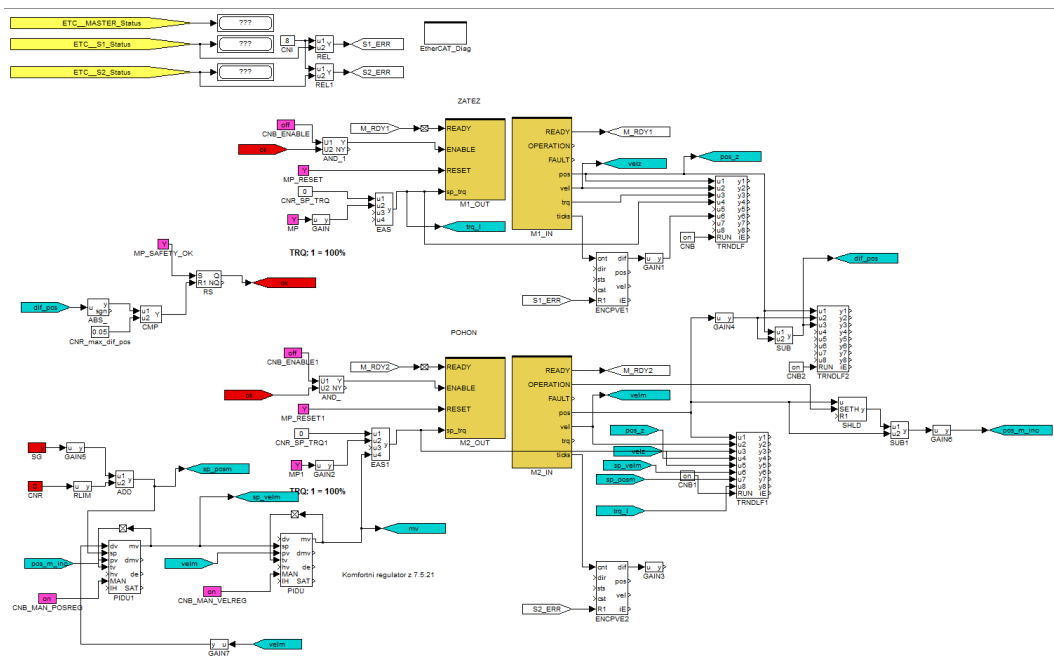
Tabulka 8.10: Parametry regulátorů polohy pro pátou náhodnou soustavu



Obrázek 8.10: Návrh rychlostních regulátorů pro pátou soustavu

Schéma zapojení reálného systému

V této příloze je znázorněné schéma v systému REXYGEN, které bylo použito k experimentům s reálnou soustavou. Součástí schématu jsou zapojené regulátory polohy a rychlosti. Jsou zde bloky pro měření strany jak motoru, tak zátěže. Bloky vstupů a výstupů pro reálný systém a bloky pro vizualizaci průběhu experimentu, kde jsou zobrazené polohy a rychlosti motoru a zátěže, požadované hodnoty rychlosti a polohy a také odchylka zátěže od motoru.



Obrázek 8.11: Schéma bloků v REXYGENU pro reálný systém