České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Katedra řídicí techniky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Radek Beňo**

Studijní program: Elektrotechnika a informatika (magisterský), strukturovaný
Obor: Kybernetika a měření, blok KM1 - Řídicí technika

Název tématu: **Řízení Tokamaku COMPASS**

Pokyny pro vypracování:

1. Navrhněte rychlou aktivní zpětnou vazbu pro řízení vertikální polohy plazmatu v tokamaku COMPASS.
2. V rámci diplomové práce vytvořte model, navrhněte parametry řídicího algoritmu a navrhněte postup experimentů určených pro kalibraci těchto parametrů.
3. V závislosti na připravenosti experimentálního zařízení v ÚFP AV ČR proveďte úvodní experimenty.

Seznam odborné literatury:

Vyas, P. (1996). Plasma Vertical Position Control in COMPASS-D Tokamak. Phd thesis, University of Oxford, England.
Wesson, J. (2004). Tokamaks. Clarendon Press, Oxford

Vedoucí: Doc.Ing. Jan John, CSc.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2010/2011

L.S.

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
vedoucí katedry

doc. Ing. Boris Šimák, CSc.
děkan

V Praze dne 16. 2. 2010

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Diplomová práce

Řízení Tokamaku COMPASS

Bc. Radek Beňo

Vedoucí práce: doc. Ing. Jan John, CSc.

Studijní program: Elektrotechnika a informatika

Obor: Kybernetika a měření

leden 2011

Poděkování

Rád bych na tomto místě poděkoval svým rodičům za jejich veškerou podporu v mém životě.
Další nemalé díky patří vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Janu Johnovi, CSc. za jeho nesčetné rady a konzultace. Především ale děkuji za jeho neustávající optimismus, který byl pro mě tou nejlepší podporou.
Děkuji též všem zaměstnancům Ústavu fyziky plazmatu AV ČR za jejich rady, připomínky a za poskytnutí příjemného pracovního prostředí. Jmenovitě pak především děkuji Mgr. Josefu Havlíčkovi a Mgr. Janu Horáčkovi, Ph.D.
V neposlední řadě bych rád poděkoval své přítelkyni Kristýně Horáčkové za její duševní podporu a za četné gramatické a stylistické úpravy textu.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v přiloženém seznamu.

V Praze dne 4.1.2011 .....

Abstract

Themonuclear fusion in tokamaks is a promising global power source for mankind with practically unlimited fuel supply, if some residual physics and technological problems will be solved. This Diploma thesis gives a comprehensive view on control of tokamak, focusing on modeling and control of vertical plasma instability, as the leading instability in higher energetic state.

First is built a mathematical model of the vertical instability caused by poloidal plasma shaping circuits. These circuits cause asymmetric effects of forces on the plasma column. The model is complemented by voltage amplifier, which dynamic properties are modified by current feedback. The voltage amplifier is modeled in two versions - as a continuous amplifier and an amplifier with two-position control.

To control vertical instability is design several controllers using the methods of geometric root locus (P, PI, Lag), LQG controller (optimal linear quadratic with Gaussian distributed noise) and fuzzy controller. The best controller is LQG. Tuning of all controllers is also described.

Abstrakt

Termojaderné slučování v tokamacích je nadějným energetickým zdrojem tohoto tisíciletí, pokud se podaří uspokojivě vyřešit mnohé zbývající fyzikální a technologické problémy. Diplomová práce Řízení tokamaku COMPASS podává ucelený náhled na problematiku řízení tokamaku, zaměřuje se přitom na modelování a řízení vertikální nestability plazmatu, jakožto vůdčí nestability při dosažení stavu s vyšším udržením.
Nejdříve je důsledně sestaven matematický model vertikální nestability, která je způsobena poloidálními obvody pro tvarování plazmatu. Tyto obvody způsobují nesymetrické působení sil na plazma při výboji, které nutí plazma opustit rovnovážnou polohu. Model je dále doplněn napěťovým zesilovačem, který se po zavedení dynamické zpětné vazby chová jako proudový zesilovač. Napěťový zesilovač je modelován ve dvojím provedení - jako spojitý zesilovač a zesilovač s dvoupolohovým řízením.
V rámci vytvořeného modelu je navrženo několik regulátorů pomocí metody geometrického místa kořenů (P, PI, Lag), LQG regulátor (lineární kvadraticky optimální s předpokládaným Gaussovsky rozloženým šumem) a fuzzy regulátor. Zde se jako nejlepší jeví LQG regulátor. U všech regulátorů je popsána metodika jejich seřizování.

Obsah

Seznam obrázků **xiii**

Seznam tabulek **xiv**

1 Úvod **1**

1.1 Termojaderné slučování 2

1.2 Tokamak 3

1.3 Tokamak COMPASS a jeho parametry 5

2 Zpětnovazební řízení tokamaku COMPASS **8**

2.1 Nestability plazmatu 8

2.1.1 Vertikální nestabilita plazmatu 9

2.1.2 Radiální nestabilita plazmatu 10

2.1.3 Nestabilita typu ELM 10

2.2 Řídicí obvody tokamaku COMPASS 11

2.2.1 Pomalá zpětná vazba 13

2.2.2 Rychlá zpětná vazba 14

3 Model řízení **16**

3.1 Fyzikální odvození pohybu plazmatu v tokamaku 16

3.2 Zesilovač a jeho vnitřní zpětná vazba 21

3.3 Celkové sestavení regulačního obvodu 24

3.3.1 Diskuze k hmotnosti plazmatu 25

3.3.2 Odvození pohybových rovnic pro $m_p = 0$ 25

3.3.3 Stavový popis soustavy 26

3.4 Parametry modelu a jejich určení 27

3.5 Pronikání magnetického pole do komory tokamaku 29

3.6 Diskuze nad modelem 30

4 Návrh regulátoru rychlé zpětné vazby (FFPS) **33**

4.1 Měření polohy plazmatu 34
4.2 Regulátor vnitřní zpětné vazby zesilovače 36
4.3 Analýza systému 38
4.3.1 Poruchy vertikální polohy plazmatu 39
4.3.2 Analýza stavového popisu 40
4.4 Diskrétní PID regulace 42
4.4.1 P regulátor 42
4.4.2 PS regulátor 43
4.4.3 Lag regulátor 46
4.4.4 Optimalizace parametrů regulátorů 48
4.5 LQG řízení 49
4.5.1 Kalmanův filtr 49
4.5.2 LQ regulátor 52
4.6 Fuzzy regulátor 55
4.6.1 Krátký úvod do fuzzy řízení 56
4.6.2 Funkce příslušnosti 58
4.6.3 Báze pravidel 59
4.6.4 Výsledky regulace 60
4.7 Úvodní experimenty při sestavování zpětné vazby 62

5 Závěr **64**

Literatura **67**

A Obrázková příloha diplomové práce **69**

B Obsah přiloženého CD **71**

Seznam obrázků

1.1 Principiální schéma tokamaku 4
1.2 Plazma ve tvaru písmene D (tzv. D-shape) 5
1.3 Tokamak COMPASS 7

2.1 Pozice a popis poloidálních cívek na tokamaku COMPASS 12
2.2 Schéma řídicího systému pomalé zpětné vazby (zde pro MFPS) 14
2.3 Schéma řídicího systému rychlé zpětné vazby 15

3.1 Přehled poloidálních magnetických polí tokamaku COMPASS. Autor obrázku: J. Horáček. 17
3.2 Zjednodušený náhled na komoru tokamaku. 19
3.3 Nestabilita plazmatu bez stabilizačního efektu komory a se stabilizací komorou. 20
3.4 Nelineární SIMULINKové schéma spojitého zesilovače. 22
3.5 Nelineární SIMULINKové schéma dvoupolohového zesilovače. 23
3.6 Časový vývoj polohy plazmatu pro různé hmotnosti plazmatu. 25
3.7 Blokové schéma regulačního obvodu. 27
3.9 Vertikální působení polí na plazmatický sloupec při $I_p = 1kA$. Autor obrázku: J. Horáček. 29
3.10 Vliv komory na pronikání vnějšího magnetického toku. Rozměr osy x je čas v ms. 30
3.8 Nelineární model pro řízení polohy plazmatu. 32

4.1 Simulace magnetických polí pro výpočet horizontální (vlevo) a vertikální (vpravo) polohy plazmatu. Autor obrázku: F. Janky 35
4.2 Průběh vertikální polohy kruhového plazmatu v tokamaku COMPASS. Na ose y je vertikální poloha plazmatu z[m]. Autor obrázku: F. Janky 35
4.3 Geometrické místo kořenů vnitřní regulační smyčky. 37
4.4 Skoková odezva výstupu zesilovače a akční zásah regulátoru vnitřní smyčky. 37

4.5 Významná část geometrického místa kořenů soustavy se spojitým zesilovačem. 38
4.6 Amplitudová a fázová charakteristika soustavy. 39
4.7 Typický průběh poruchy vertikální polohy plazmatu. 40
4.8 P regulace soustavy se spojitým zesilovačem. 43
4.9 P regulace soustavy s dvoupolohovým zesilovačem. 43
4.10 Geometrické místo kořenů soustavy se spojitým zesilovačem. 44
4.11 PI regulace soustavy se spojitým zesilovačem. 45
4.12 PI regulace soustavy s dvoupolohovým zesilovačem. 45
4.13 Geometrické místo kořenů soustavy se spojitým zesilovačem. 47
4.14 Lag regulace soustavy se spojitým zesilovačem. 47
4.15 Lag regulace soustavy s dvoupolohovým zesilovačem. 48
4.16 Průběh řešení Riccatiho rovnice. 51
4.17 SIMULINKové schéma pozorovatele stavu. 52
4.18 Průběh řešení Riccatiho rovnice pro LQ regulátor. 54
4.19 SIMULINKové schéma LQ regulátoru s asymptotickým sledováním reference. 55
4.20 Průběh LQG řízení na nelineárním modelu se spojitým zesilovačem. . . . 55
4.21 Ukázka funkce příslušnosti při určení teploty vody. 56
4.22 Celkový proces řízení pomocí fuzzy regulace. 57
4.23 Funkce příslušnosti vstupů a výstupu. 58
4.24 Regulační plocha fuzzy regulátoru. 59
4.25 Struktura fuzzy PD regulátoru. 60
4.26 Výsledky fuzzy regulace při použití spojitého zesilovače. 60
4.27 Výsledky fuzzy regulace při použití spojitého zesilovače - akční zásah regulátoru. 61
4.28 Výsledky fuzzy regulace při použití dvoupolohového zesilovače. 61
4.29 Výsledky fuzzy regulace při použití dvoupolohového zesilovače. (detail) . 62

5.1 Srovnání kvality regulace vybraných druhů regulátorů. 65
5.2 Srovnání akčních zásahů vybraných regulátorů. 66

A.1 Srovnání velikosti plazmatu v tokamacích s D tvarem komory 69
A.2 Obecná geometrie tokamaku. 70
A.3 Tokamak ITER 70

Seznam tabulek

1 Seznam symbolů a zkratek xv
2 Seznam symbolů a zkratek II xvi

1.1 Hlavní parametry tokamaku COMPASS 6

3.1 Konstanty modelu a jejich hodnoty 28

4.1 Báze pravidel fuzzy regulátoru 59
4.2 Porovnání identifikace nestabilní soustavy 63

Seznam použitých symbolů a zkratek

Tabulka 1: Seznam symbolů a zkratek

Symbol	Rozměr	Význam
D	-	Deuterium - tzv. těžký vodík ($^{2}_{1}$H)
T	-	Tritium - tzv. supertěžký vodík ($^{3}_{1}$H)
n	m^{-3}	počet částic v 1 m^3 plazmy
τ_E	s	doba udržení energie plazmatu
τ_i	eV	iontová teplota plazmatu
R_{BR}	$\Omega = V/A$	Odpor řídicí (budicí) cívky
L_{BR}	H	Vlastní indukčnost řídicí cívky
I_{BR}	A	Proud budicí cívkou
U_{BR}	V	Napětí na řídicí cívce
K_i	V/A	Formální zesílení spojitého výkonového zesilovače
G_i	V/A	Zesílení dvoupolohového nelineárního členu
T_a	s^{-1}	Časová konstanta spojitého zesilovače
T_d	s^{-1}	Derivační časová konstanta regulátoru vnitřní smyčky
a	–	Konstanta regulátoru vnitřní smyčky
f_{osc}	Hz	Frekvence oscilací polohy plazmatu
f_{vz}	Hz	Vzorkovací frekvence
T_{vz}	s	Vzorkovací perioda
L^v_{BR}	H	Vzájemná indukčnost komory a budicí cívky
L_v	H	Vlastní indukčnost komory tokamaku
I_p	A	Proud protékající plazmatem
I_v	A	Proud protékající komorou
L^p_v	H	Vzájemná indukčnost komory a plazmatu
$L^p_{v,\partial z}$	H/m	Parciální derivace vzájemné indukčnosti komory a plazmatu
R_v	$\Omega = V/A$	Odpor komory tokamaku
F_E	$Nm^{-1}A^{-2}$	Silové působení od pomalého pole pro stabilizaci
F_S	$Nm^{-1}A^{-2}$	Silové působení od pomalého pole pro tvarování
F_{BR}	$Nm^{-1}A^{-2}$	Silové působení od rychlého pole pro vertikální stabilizaci
I_{Efps}	A	Proud v cívkách pomalého pole pro stabilizaci
I_{Sfps}	A	Proud v cívkách pomalého pole pro tvarování

Tabulka 2: Seznam symbolů a zkratek II

Symbol	Rozměr	Význam
z	m	Vertikální poloha plazmatu
z_0	m	Počáteční vertikální poloha plazmatu v simulacích
z_{0stab}	m	Nulová hladina výsledného působení pomalých polí
z_0^E	m	Nulová hladina pomalého pole pro stabilizaci
z_0^S	m	Nulová hladina pomalého pole pro tvarování
I_{wmax}	A	Maximální přípustná hodnota akčního zásahu regulátoru
U_{max}	V	Maximální možné napětí výkonového zesilovače
m_p	kg	Hmotnost plazmatu
R	m	Hlavní poloměr tokamaku COMPASS
a	m	Vedlejší poloměr tokamaku COMPASS
m_{De}	kg	Hmotnost Deuteria

Kapitola 1

Úvod

Termonukleární fúze je doslova jednou z klíčových otázek celého našeho vesmíru. Bylo to právě plazma, které tvořilo horký vesmír v etapě Velkého třesku a v dalších etapách způsobilo vznik druhotných těžších prvků v nitru hvězd. Započetí termonukleárních reakcí v nitru našeho Slunce dalo vzniku života na Zemi a umožnilo tak celou evoluci lidstva. Při pohledu do budoucnosti můžeme vidět potenciál v získávání energie pro lidstvo tvořením podobných „malých Sluncí“ na Zemi v podobě termonukleárních reaktorů.

V současnosti je nepopíratelné, že se lidstvo nachází na pokraji energetické krize. Ta je způsobena především stále se zvyšující poptávkou po elektrické energii a neustálým snižováním zásob fosilních paliv v důsledku přehnaně komfortního životního stylu lidstva, který se více než kdy podobá rčení: „Po nás potopa!“.
Naši kolegové z ekologických odvětví jistě dokážou vynalézt řadu hybridních elektráren využívající obnovitelné zdroje, ale jsou schopni touto výrobou energie uspokojit celé lidstvo? A bude takto vyrobená energie opravdu ekologická? Právě na tyto otázky se snaží odpovědět i získávání energie v termonukleárních elektrárnách.
Výroba elektrické energie pomocí termonukleárních reaktorů má oproti ostatním dosud známým způsobům hned několik výhod. Tou první je bezesporu palivo. Při ustálené reakci se v těchto reaktorech slučuje težký vodík (^{2}H - deuterium) za vzniku hélia a rychlého neutronu (viz podkapitola 1.1). Pro inicializaci této reakce se využívá supertěžký vodík (^{3}H - tritium), který se díky svému poločasu rozpadu (12.32 let) již na Zemi nevyskytuje. Dá se ale v současné době vyrobit v urychlovačích a i samotná termonukleární elektrárna je navržena tak, aby tritium produkovala jako vedlejší produkt. Světové zásoby deutéria jsou díky složení vody téměř nevyčerpatelné a lidstvo je může nenáročně těžit a čerpat z nich energii až desítky milionů let. Další výhodou je efektivní získávání

energie, jelikož získaná energie z jednoho kilogramu hmoty je desetmilionkrát větší než u jakékoliv chemické reakce včetně hoření. Na roční provoz naší zatím pomyslné termonukleární elektrárny by v konečném důsledku bylo zapotřebí zhruba dvěstě kilo deuteria a třista kilo tritia při výkonu 1 GW. Třetí a poslední velkou výhodou je minimální dopad na životní prostředí. Termonukleární elektrárna neprodukuje skleníkové plyny ani vysoce radioaktivní jaderný odpad, není zde potřeba pokrýt obrovské plochy či dělat radikální zásahy do krajiny. Nehrozí ani riziko jaderné havárie, jelikož při sebemenším náznaku nestability reakce se ta sama bezpečně ukončí během několika okamžiků.

Abychom byli korektní, musíme přiznat, že v současné době není vůbec jasné, zda lze pomocí zatím nejlépe zvládnuté větve termonukleárních reaktorů (tokamaky) energii vůbec kontinuálně získávat. A právě tato diplomová práce by měla být nápomocna při dalším malém krůčku na velmi dlouhé cestě lidstva při získávání energie pomocí termojaderné fúze.

1.1 Termojaderné slučování

Princip termonukleárního slučování spočívá v překonání Coulombovských bariér a tím umožnění jádrům lehkých prvků[1] konat srážky a následné rekonfigurace v těžší prvky.

$$ {}^{2}_{1}\mathrm{D} \;+\; {}^{3}_{1}\mathrm{T} \;\longrightarrow\; {}^{4}_{2}\mathrm{He}\ (3.5\mathrm{MeV}) \;+\; \mathrm{n}^{0}\ (14.1\mathrm{MeV}) \tag{1.1} $$

$$ \begin{aligned} \mathrm{n}^{0} \;+\; {}^{6}_{3}\mathrm{Li} \;&\longrightarrow\; {}^{3}_{1}\mathrm{T} \;+\; {}^{4}_{2}\mathrm{He} \\ \mathrm{n}^{0} \;+\; {}^{7}_{3}\mathrm{Li} \;&\longrightarrow\; {}^{3}_{1}\mathrm{T} \;+\; {}^{4}_{2}\mathrm{He} \;+\; \mathrm{n}^{0} \end{aligned} \tag{1.2} $$

Za základní termonukleární reakci považujeme slučování deutéria a tritia (1.1) za vzniku hélia a rychlého neutronu, který je nositelem největší výstupní energie. Vstupní jádra je potřeba urychlit na energii přibližně $E_{kin} = 20$ keV, aby se k sobě mohla přiblížit na vzdálenost kratší než 10^{-15} m a překonat tak již zmíněnou Coulombovskou bariéru [1]. V tomto okamžiku se z vysoce horkého plynu stává plazma, tj. stav látky s volně odloučenými jádry od jejich elektronového obalu. Po srážkách vzniknou jádra hélia ${}^{4}_{2}\mathrm{He}$ o energii $E_{alfa} = 3.5$ MeV, která dále slouží k ohřevu paliva a rychlé neutrony s energií

[1] Slučováním deutéria a tritia dochází k nejlepšímu poměru dodaná/získaná energie. Teoreticky nám ale nic nebrání exotermicky slučovat další lehké prvky až po železo.

$E_n = 14.1$ MeV, jejichž energie je z velké části využívána k získávání elektrické energie a minoritně použita na produkci lithia v doprovodných fúzních reakcích (1.2).

Již tedy máme návod na získání energie pomocí fúze - vstupní prvky zahřejeme na teplotu 200 mil. K, začne samovolně probíhat termonukleární reakce, která bude produkovat energii. Jak ale tuto reakci stabilizovat a řídit?

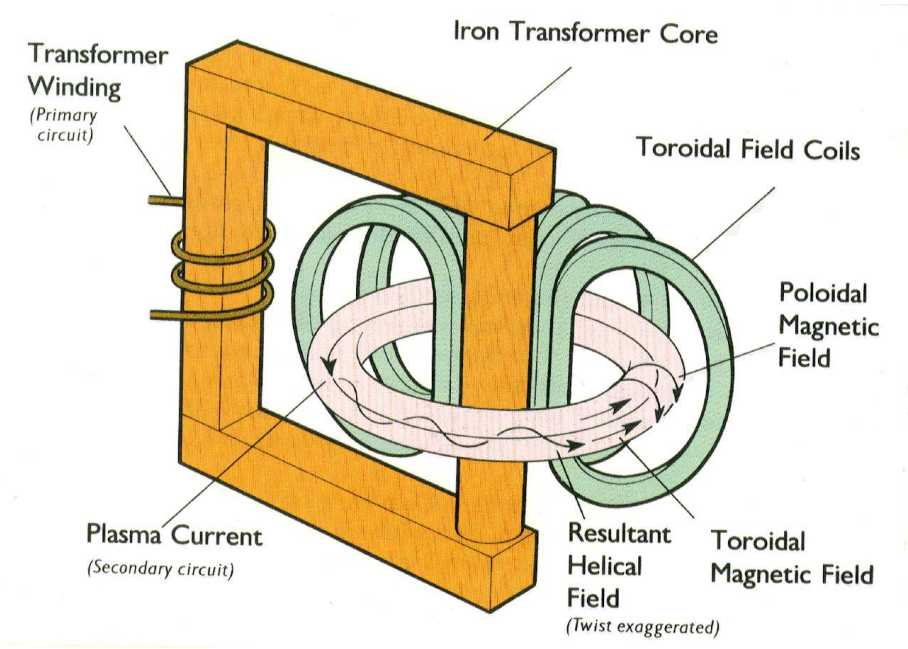
1.2 Tokamak

Tokamak (TOroidalnaja KAmera i MAgnitnyjne Katuški - toroidální komora a magnetické cívky) je experimentální zařízení - nádoba, ve které lze pomocí magnetického pole udržet plazma. V současné době jsou tokamaky ve vedoucí pozici co se týká experimentálních zařízení pro řízenou termonukleární fúzi[2].

Koncepce tokamaku se zrodila v rozmezí let 1950 - 52 v Moskvě, v týmu ruského akademika A. Sacharova. Tokamak si můžeme představit jako dutou komoru ve tvaru toroidu, která je obklopena magnetickými cívkami s případným transformátorovým jádrem uprostřed (viz. obr. 1.1). V tokamaku rozlišujeme dva základní směry - toroidální a poloidální (jak je patrné z obrázku). Toroidální cívky tokamaku generují magnetické pole, které vytváří plazma (viz dále), kdežto poloidální cívky jsou primárně určeny pro magnetické udržení plazmatického sloupce a jeho následné řízení (stabilizace a tvarování). Tokamak využívá princip transformátoru, kde komora s plazmatem tvoří jediný sekundární závit do zkratu.

Zavedením pulzu na primární vinutí se elektromagnetickou indukcí vybudí proud v sekundárním vinutí (slabě ionizovaném plynu uvnitř komory). Ten má ale značný odpor a tak je rychle zahříván Jouleovým teplem (během milisekundy dosáhne teploty až stovek miliónů stupňů K), čímž se dosáhne plně ionizovaného plazmatu. Dodatečně se pak plazma může ohřívat pomocí vysokofrekvenčního elektromagnetického pole nebo pomocí vstřiku vysokoenergetických neutrálních atomů [1].

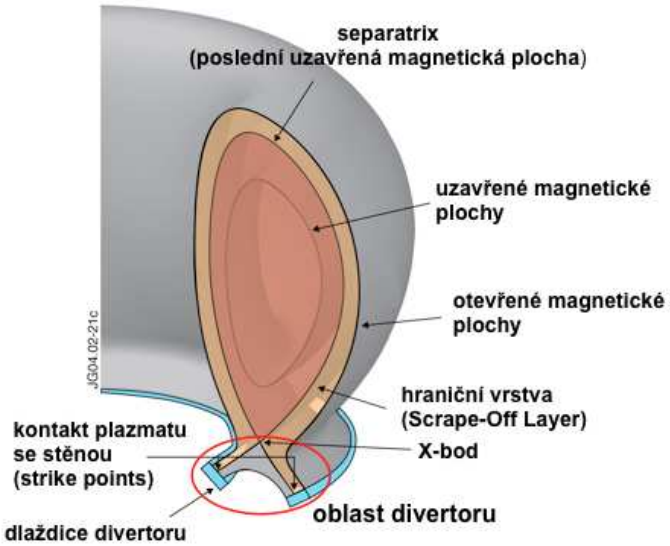
[2] Dalšími takovými zařízeními jsou např. stelarátory nebo magnetické pinče.



Obrázek 1.1: Principiální schéma tokamaku

Moderní tokamaky mají konstruovanou komoru ve tvaru písmene D, což jim dává řadu výhod. Především lze do komory umístit tzv. divertor (jediná část komory, které se plazma dotýká) a plazmatický sloupec vhodně tvarovat[3]. Divertorová konfigurace umožňuje přibližně dvakrát lepší udržení plazmatu, výrazné snížení eroze materiálu stěny a tím i snížení znečištění centrálního plazmatu těmito erozními částicemi. Typické plazma v této konfiguraci má pak tvar písmene D (tzv. D-shape, obr. 1.2) s charakteristickým x-pointem (místo, kde se kříží separatrix - okrajová vrstva plazmatu). V rámci experimentů bylo dokázáno, že právě tento tvar je pro energetickou fúzi nejvýhodnější, jelikož dovoluje přejít do tzv. H-modu, tj. stavu s vyšším udržením. Výnosnost energetické reakce je pak daleko větší než při klasickém kruhovém průřezu plazmatického sloupce.
V současné době je na světě v provozu asi 50 tokamaků, které se zabývají výzkumem plazmatu. Od roku 2005 probíhá ve francouzském městě Cadarache výstavba zatím největšího tokamaku světa ITER obr. A.3. Ten by měl být rozhodující zkouškou využití tokamaků jako plnohodnotných elektráren budoucnosti. Projekt ITER je druhým nejdražším projektem na světě, hned po výstavbě orbitální stanice.

[3]Dříve se v tokamacích tvořilo pouze plazma kruhového průřezu.



Obrázek 1.2: Plazma ve tvaru písmene D (tzv. D-shape)

1.3 Tokamak COMPASS a jeho parametry

Stavba tokamaku COMPASS (COMPact ASSembly) začala v roce 1985, plně začal fungovat v roce 1989. V roce 1992 byl podroben celkové rekonstrukci, během níž byla stávající komora s kruhovým průřezem (COMPASS-C) nahrazena komorou s průřezem ve tvaru písmene D (COMPASS-D). Byl tak dosažen výbojový režim s vyšším udržením plazmatu (H-mód), který bude využíván jako referenční režim na tokamaku ITER. Tokamak COMPASS patří svými rozměry spíše mezi menší tokamaky a spolu s tvarem plazmatu odpovídá jedné desetině ITERu.

Tokamak COMPASS-D fungoval ve Velké Británii do roku 2001. V roce 2008 byl převezen do Prahy, kde byl během roku 2009 znovu uveden do provozu - viz [2] a [3]. Pro Českou republiku (a vpodstatě pro celou východní Evropu) znamená COMPASS velký pokrok. V parametrech $\log(n \cdot \tau_E)$ a $\log(\tau_i)$ je zhruba v polovině mezi tokamaky CASTOR[4] a ITER. Množství energie plazmatu v tokamaku COMPASS je zhruba 5000x větší než v tokamaku CASTOR (tj. 10x větší objem, 10x větší teplota, 5x větší hustota a 10x vyšší doba udržení energie[5]). Na konci roku 2009 byly v Praze provedeny první inženýrské

[4]Tokamak CASTOR - Czech Academic Science TORus - byl až do roku 2007 jediným tokamakem v ČR. Po ukončení výzkumné práce na ÚFP AV ČR byl převezen na fakultu Jadernou a fyzikálně inženýrskou ČVUT v Praze.

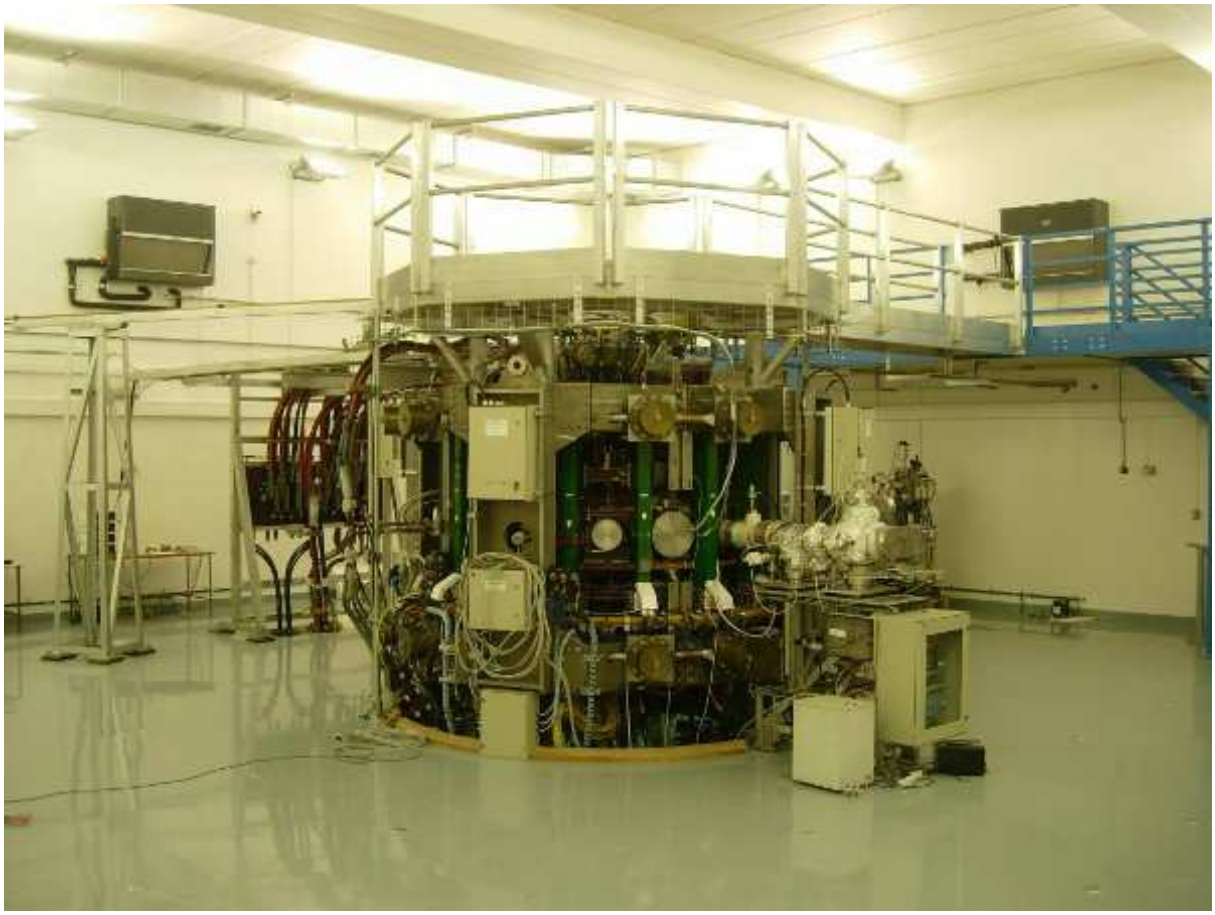
[5]Jak dlouho trvá jedné částici plazmatu, než ztratí svou energii (tzv. než uteče na stěnu).

zkoušky, jejichž výsledkem bylo úspěšné vytvoření kruhového plazmatu.
V současné době jsou v Evropě v provozu pouze dva tokamaky (JET a ASDEX-U), které mají magnetickou konfiguraci podobnou tokamaku ITER a pracují v režimu se zlepšeným udržením plazmatu. Na světě je v provozu zhruba dalších 50 tokamaků. Nejvýznamější jsou především tokamak JET (European Fusion Development Agreement, Culham, Great Britain), tokamak DIII-D (General Atomics, San Diego, USA), tokamak ASDEX-U (Institut fűr Plasmaphysik, Garching, Deutschland), JT-60 (Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI), Ibaraki Prefecture, Japan) atd. Tokamak JET je současné největší experimentální zařízení tohoto typu na světě.
V porovnáním s ostatními tokamaky je COMPASS zhruba pětinásobnou lineární zmenšeninou vůči tokamaku JET a desetinásobnou vůči tokamaku ITER.
Důležité parametry COMPASSu lze najít v tab. 1.1.

Tabulka 1.1: Hlavní parametry tokamaku COMPASS

Parametr	Hodnota	Popis
R	0.56 m	Hlavní poloměr[6]
a	0.18 ÷ 0.23 m	Vedlejší poloměr
$I_p(max)$	380 kA	Maximální proud plazmatem
$B_T(max)$	2.1 T	Maximální vytvořené magnetické pole
Elongation	1.8	Protažení plazmatu ve vertikálním směru
Shape	D, SND, ellipse	Poskytované tvary plazmatu
Pulse lenght	$\sim$ 1 s	Doba pulzu (výstřelu)
P_{LH}, 1.3 GHz	2×0.2 MW	Výkon dodatečného VF ohřevu
P_{NBI}	2×0.3 MW	Výkon neutrálních svazků

Poznámka k tab. 1.1:
Tvary plazmatu v tokamaku (shapes) mohou být skutečně různé. Jedná se pouze o kombinaci poloidálních cívek M a S vinutí, které vymezují „životní prostor“ plazmatickému sloupci a dále ho dodatečně tvarují. Tvar plazmatu je pak určován podle jeho průřezu v rovině z. Na tokamaku COMPASS lze kombinací M vinutí dosáhnout kruhového tvaru plazmatu, tzv. D-shape tvaru (obr. 1.2) v rámci kombinace SND (Single Null Down) a elipsového tvaru plazmatu.
Geometrie komory tokamaku je určena hlavním a vedlejším poloměrem. Významy těchto parametrů nejlépe osvětlí obr. A.2.



Obrázek 1.3: Tokamak COMPASS

Další obrázky týkající se tokamaku COMPASS lze najít v příloze A.

Kapitola 2

Zpětnovazební řízení tokamaku COMPASS

Z hlediska vývoje zpětnovazebního řízení tokamaků se v současné době nacházíme na další významné křižovatce. Prvotní zpětné vazby tokamaků byly pasivní a jednalo se pouze o měděné obaly komory (tzv. „kožuchy“), které dokázaly stabilizovat nejrychlejší nestability indukcí vířivých proudů generovaných plazmatem [4]. S vývojem elektroniky se postupně nabídla možnost stabilizovat plazma pomocí aktivního analogového řízení, které dodnes přetrvává na většině světových tokamaků. Jedná se jak o pomalé, tak rychlé zpětnovazební procesy. Nyní se díky pokroku opět nabízí možnost sofistikovanější regulace za pomocí digitálního řízení. Jednoduchými úpravami řídicích algoritmů můžeme používat nepřeberné množství regulátorů, založených na různých moderních technikách návrhu. Narážíme tím ale též na nové problémy. Jedná se o technologické možnosti použitých prvků, ale především o nové objevy nestabilit plazmatu ve stavu s vyšším udržením. Tyto nestability (ale i možnost na ně reagovat) jsou úměrné velikosti tokamaku, což by mohlo mít výrazný dopad na konstrukci zpětných vazeb budoucích termonukleárních zařízení. Snahou ÚFP AV ČR je navrhnout plně digitální zpětnovazební řízení na tokamaku středních rozměrů a posunout tím možnosti řízení plazmatu o další krůček kupředu.

2.1 Nestability plazmatu

Po stavbě prvních tokamaků se ukázalo, že právě nestability plazmatu budou jedním z největších problémů při fúzním výzkumu. Během vývoje fyziky plazmatu došlo k objevům modelů velkého množství nestabilit, ale toto vítězství paradoxně připomínalo známý Sókratův citát „Vím, že nic nevím.“

Objevům základních nestabilit plazmatu vždy korespondovala změna v řízení celého tokamaku. Po objevu párkové a smyčkové nestability[1] se přidaly k toru poloidální cívky, jimiž šlo tuto nestabilitu řídit. Nejinak se stalo i při výzkumech tvarování plazmatického sloupce a následném objevu vertikální a radiální nestability. Jedinou útěchou v tomto nehasnoucím boji je fakt, že drtivá většina nově objevených nestabilit nezpůsobí zánik plazmatu, ale sníží doby udržení částic či energie (jedná se o tzv. mikronestability - sawtooth, NTI, MHD, TEM, TAEM, ITG, ETG ...), případně zvýší interakce se stěnou tokamaku (ELM, Ballooning, „bloby“). Z globálního hlediska je plazma výrazně nestabilní pouze vertikálně a to právě kvůli vertikálnímu prodloužení (tvarování na D-shape plazma).

2.1.1 Vertikální nestabilita plazmatu

Vertikální nestabilita plazmatu je v dnešní době jednou z klíčových otázek při tvarování plazmatu. Aby bylo možno dosáhnout D-shape tvaru plazmatu, musí být plazma tvarováno poloidálními obvody (Shaping). V důsledku tohoto roztahování a následné radiální nesymetrie plazmatu vzniká destabilizující síla F_d, která vychyluje plazma z rovnovážné polohy především ve vertikálním směru. Proti této síle působí stabilizační síla F_s, která vzniká v důsledu indukce vířivých proudů od pole plazmatu ve stěnách komory[2]. Stabilizující vířivé proudy tak tvoří „filtr“ komory, který zatlumí velmi rychlé vertikální nestability plazmatu. Fyzikálně lze situaci popsat:

$$F_v = F_d - F_s = -2\pi I_p R_p \frac{\partial B_R}{\partial z} z - I_v L^p_{v,\partial z} I_p \tag{2.1}$$

kde I_p je proud plazmatem, R_p odpor plazmatu, $\frac{\partial B_R}{\partial z}$ je parciální derivace pole, které vytváří destabilizující sílu, I_v představuje vířivý proud indukovaný ve stěně komory a $L^p_{v,\partial z}$ parciální derivaci vzájemné indukčnosti plazmatu a stěny komory.
Tímto dostáváme časovou konstantu nestability pro tokamak COMPASS - $\tau \backsim 0.5\ ms$ [5]. Zpomalení nestabilní změny polohy plazmatu vířivými proudy ve stěně komory nám

[1] Párková nestabilita (někdy též označována jako korálková) vzniká náhodným zaškrcením plazmového sloupce. Vlivem vlastního magnetického pole dochází k prohloubení zaškrcení a následně k rozpadu plazmatického sloupce. Takto vzniklé útvary mohou připomínat párky nebo korálky navlečené na niti. Smyčková nestabilita (někdy označovaná jako „kink“ nestabilita) vzniká díky náhodnému ohybu plazmatického sloupce. Deformace vlastního pole pak tuto nestabilitu prohlubuje, což může mít za následek „otírání“ plazmatického sloupce o stěnu tokamaku a jeho následný zánik vlivem dehomogenizace.

[2] Pokud by komora nebyla vodivá (první konstruované tokamaky), zaniklo by plazma díky své malé hmotnosti během pár desítek mikrosekund, jelikož destabilizující síla by působením na malou hmotnost plazmatu vyvolala obrovské zrychlení, které by plazma „hodilo“ na stěnu komory.

tak dává dostatečný čas pro reakci pomocí zpětnovazebního řízení.

2.1.2 Radiální nestabilita plazmatu

Radiální nestabilita plazmatu má ve srovnání s vertikální nestabilitou daleko méně drastický vývoj. V rámci změny radiální polohy plazmatického sloupce hrají hlavní roli dva důležité jevy. Prvním z nich je vysoký záporný gradient tlaku plazmatu, proti kterému působí magnetické pole obvodů MFPS[3]. Druhý a daleko dominantnější jev je vzájemné magnetické působení plazmatického prstence na sebe sama. Plazma tvoří toroid, na jehož opačných koncích teče opačný proud (I_p). Výsledná síla vzájemného působení se pak snaží tento prstenec „roztrhnout“ právě v radiálním směru. Vlivem vnitřních poruch tlaku a proudu plazmatu dochází ke skokovým změnám polohy plazmatu v radiální rovině.

Výsledné působení těchto dvou složek je konstantní síla směrem ven z komory, která je závislá na proudu plazmatu (v kvadrátu), a která vytváří nakloněnou potenciálovou rovinu. Proti této síle působí stabilizující síla, kterou společně vytváří obvody EFPS a $\mathrm{FFPS_{BV}}$.

Obvod pole EFPS vytváří silné, ale díky své velké indukčnosti pomale proměnné vertikální pole, které působí proti této síle a silně stabilizuje pomalejší výchylky plazmatu v rámci jeho radiálního pohybu. Obvody EFPS jsou regulovány od proudu plazmatu a tím vytváří konstantní sílu směrem do středu komory a radiálně stabilizují polohu plazmatu. Rychlejší výkyvy lze stabilizovat pomocí rychlých $\mathrm{FFPS_{BV}}$ obvodů, které jsou díky své malé indukčnosti schopny rychlého akčního zásahu.

2.1.3 Nestabilita typu ELM

ELM (Edge Local Mode) je nestabilita, která byla experimentálně objevena při prvních výbojích s plazmatem ve vyšším stavu udržení (tzv. H-mód). V důsledku velkého gradientu tlaku v plazmatu (tlak se změní během několika stovek μs) dochází k turbulencím na okraji plazmatu a nastává tzv. ELM crash, neboli „vyvrhnutí“ části plazmatu na stěnu komory tokamaku. Toto plazma pak tepelně naruší stěnu komory a může odpařit její částice. Bylo vypozorováno, že k těmto nestabilitám dochází periodicky také v závislosti na konstrukčních rozměrech komory tokamaku. Čím je komora tokamaku větší, tím méně často k těmto poruchám dochází, o to víc se ale během této nestability uvolní

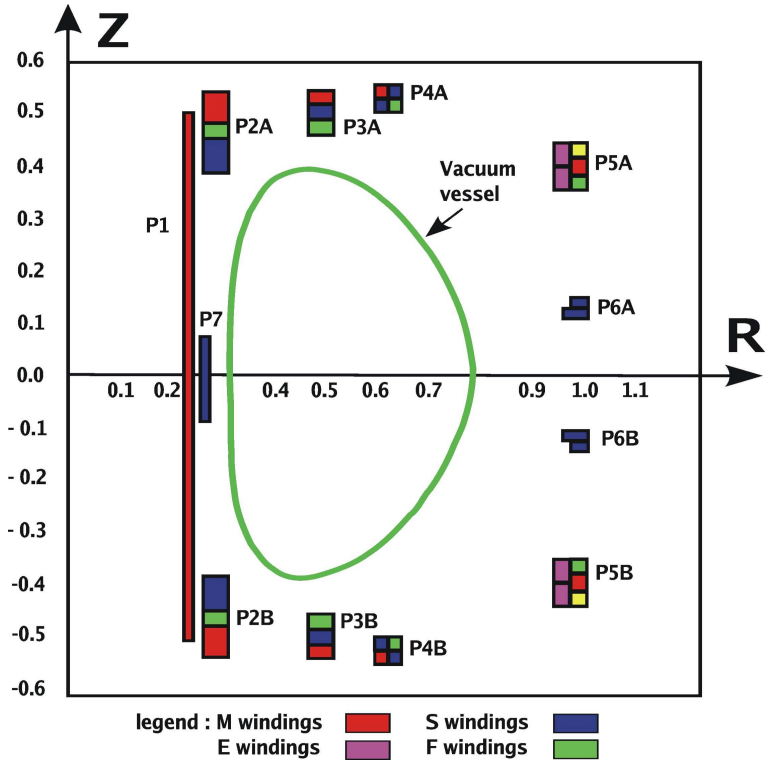
[3] Význam a účel jednotlivých poloidálních obvodů tokamaku je vysvětlen v podkapitole Řídicí obvody tokamaku COMPASS

energie na stěnu. To může být hrozbou pro velké tokamaky především při fúzi, kdy by tak mohlo dojít postupně k částečné destrukci komory [6]. Laicky můžeme ELMy přirovnat k erupcím na Slunci.
Důležitým faktem pro řízení je, že tato nestabilita ovlivňuje informace o poloze plazmatu. Pravděpodobně dojde i k částečné skokové změně polohy plazmatu. V dostupné literatuře [6] se proto doporučuje během nestability typu ELM zpětnovazební řízení vypnout. Zajímavostí je, že stejným mechanismem (prudkou změnou polohy plazmatu) se dají nestability typu ELM vyvolávat. V současné době se výzkum nestability zaměřuje právě na častější vyvolávání nestabilit s o to menším energetickým dopadem plazmatu na stěny komory tokamaku. Tento tzv. „triggering“ nestability ELM může být cenným obranným mechanismem budoucích energetických tokamaků.

2.2 Řídicí obvody tokamaku COMPASS

Tokamak COMPASS disponuje celkem čtyřmi sadami poloidálních cívek (celkem 37 ks) pro udržení, stabilizaci a tvarování plazmatu [7]. Rozmístění cívek kolem komory tokamaku lze vidět na obr. 2.1. Jedná se o:

- vinutí M - Magnetising - cívky vytvářející pole jehož změna generuje proud plazmatem k ohřevu a udržení
- vinutí E - Equilibrium - cívky kompenzující radiální expanzi plazmatického toru
- vinutí S - Shaping - cívky poskytující různé tvary plazmatu
- vinutí F - Feedback - cívky pro rychlou kontrolu polohy plazmatu pomocí zpětnovazebního řízení



Obrázek 2.1: Pozice a popis poloidálních cívek na tokamaku COMPASS

Hlavním úkolem magnetických cívek je především vytvoření poloidálního magnetického pole uvnitř komory tokamaku a rychlá kontrola jeho malých změn. Toto pole pak vymezuje tvar plazmatu v komoře. Tzv. cívky M tvoří dva obvody - MA a MB, které jsou společně řízeny pomocí Magnetising Field Power Supply (MFPS). Proud od zdroje MFPS se s časem mění od 15 kA do -5 kA. Časová derivace tohoto proudu generuje a zahřívá plazma.

Cívky vinutí E vytvářejí dodatečné magnetické pole, které polohuje plazma do rovnovážné polohy tím, že zmenšuje jeho hlavní poloměr R. Tyto obvody jsou však příliš pomalé k tomu, aby mohly zároveň rychle řídit polohu plazmatu při vertikálních nestabilitách. Obvod cívek E je tvořen párovými cívkami E1 a E2 a obvodem MB. Zdroj EFPS dodává do vinutí E průměrně 10 kA.

Obvody vinutí S pro tvarování (dále shaping) jsou charakteristické pro všechny tokamaky, které mohou mít i jiný než kruhový průřez plazmatu. Jejich hlavním cílem je tvarování průřezu plazmatu takřka libovolně. Cívky vinutí S nejčastěji tvoří dvě základní variace - SFPS-SND a SFPS-SNT (SND - Single Null Down a SNT - Single Null down with a higher Triangularity). Typická hodnota proudu SFPS je 5 kA.

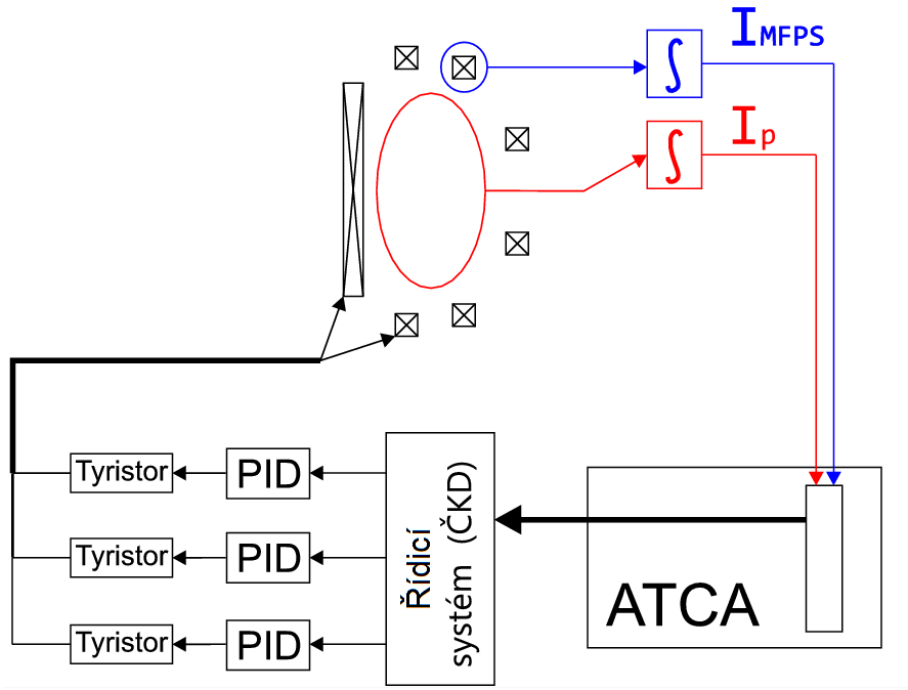
V důsledku různých nestabilit (především vertikální nestabilita způsobená obvody pro tvarování) byly pro účely stabilizace a řízení přidány rychlé cívky s minimálním počtem

závitů. Cívky pro feedback se dělí dále na obvody pro radiální (BV) a vertikální (BR) stabilizaci[4]. Obvody jsou společně řízeny pomocí Feedback Field Power Supply (FFPS), který dodává do obvodu proměnný proud o hodnotě přibližně ± 4 kA.
Z hlediska realizace ale též odezvy zpětné vazby můžeme tyto poloidální obvody rozdělit na pomalou zpětnou vazbu (obvody MFPS, EFPS a SFPS) a na rychlou zpětnou vazbu (obvody FFPS).

2.2.1 Pomalá zpětná vazba

Typické schéma řídicí smyčky pomalých zpětných vazeb můžeme vidět na obr. 2.2, kde je vyobrazeno řízení proudu v cívkách MFPS od proudu plazmatu. Obvod je tvořen především cívkami MFPS, které jsou rozmístěny kolem komory (tyto cívky nevytváří žádný magnetický tok uvnitř komory). Na těchto cívkách se pomocí rogowského pásku a následné integrace měří proud I_{MFPS} a obdobným způsobem (parciální rogowského cívky uvnitř komory) dostáváme též informaci o proudu plazmatem. Tyto informace jsou zavedeny do řídicího systému pracujícím na architektuře ATCA (speciálně do karty, která je určena pro řízení MFPS). Zde je implementován řídicí algoritmus. Vzorkování „pomalé“ karty je $h = 2000$ vzorků$\cdot s^{-1}$.
Řídicí počítač pro účely zpětnovazebního řízení tokamaku COMPASS je postaven na architektuře ATCA [8]. Jedná se o embedded PC, které je tvořeno několika kartami, z nichž každá má své vlastní FPGA hradlo. Tento počítač bude použit jak pro rychlé (vertikální a radiální stabilizace), tak pomalé (MFPS, EFPS,..) zpětnovazební řízení tokamaku COMPASS.
Požadavky od karty řídicího počítače jsou vedeny do systému řízení ČKD, který v současné době pouze přeposílá tyto požadavky PID regulátorům jednotlivých vinutí, které jsou empiricky nastaveny od ČKD. Regulované napětí pak vstupuje do tyristorů, kde je tvořen výstupní signál pro jednotlivé cívky.

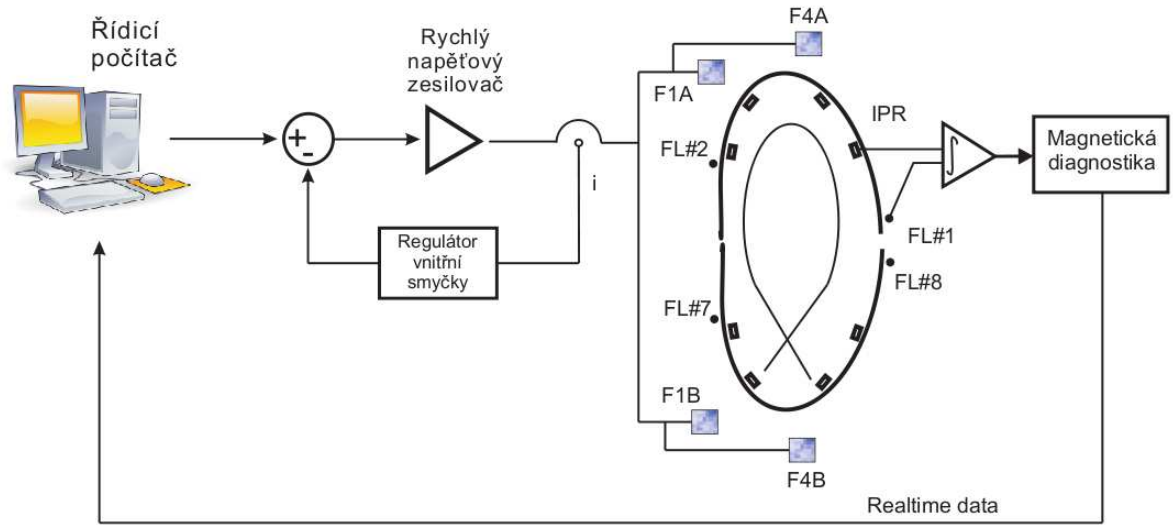
[4] Značení je opravdu dobře, jelikož cívka podle zavedené konvence nese jméno podle pole, které vytváří. Obvody stabilizující radiální nestabilitu vytváří vertikální pole atd.



Obrázek 2.2: Schéma řídicího systému pomalé zpětné vazby (zde pro MFPS)

2.2.2 Rychlá zpětná vazba

Rychlá zpětná vazba nepodléhá standardnímu zapojení (obr. 2.2) a je konstruována samostatně. Základní zapojení zpětnovazbního obvodu (viz. obr. 2.3) je tvořeno řídicím počítačem (ATCA), rychlým zesilovačem s vlastní proudovou zpětnou vazbou upravující jeho dynamické vlastnosti, poloidálními cívkami tokamaku (BR a BV) a magnetickou diagnostikou pro měření polohy plazmatu. Každá rychlá zpětná vazba má svůj vlastní obvod. Vzorkování rychlých obvodů je $h = 20000$ vzorků$\cdot s^{-1}$.



Obrázek 2.3: Schéma řídicího systému rychlé zpětné vazby

Vertikální nestabilita je tedy vůdčí nestabilitou v rámci celého tokamaku. Oproti jiným nestabilitám se u ní navíc projevují doprovodné jevy (nestability typu ELM), které situaci ještě zhoršují. V dalším textu se proto budeme věnovat v rámci rychlé zpětné vazby především vertikální stabilizaci.

Kapitola 3

Model řízení

Fyzikální náhled na vertikální nestabilitu plazmatu a její následné řízení se v průběhu výzkumu na ÚFP AV ČR měnil. Základní náhled byl poskytnut v bakalářské práci [9]. V návaznosti na ni byl členy zpětnovazební sekce odvozen nový model, jehož základní pilíře tvoří pohyb plazmatického sloupce v magnetickém poli tokamaku včetně vybuzených vířivých proudů, vertikální nestabilita a její řízení pomocí rychlých BR poloidálních cívek [10]. Stručné odvození tohoto modelu lze najít v první podkapitole. Model bude dále analyzován z hlediska teorie řízení.

3.1 Fyzikální odvození pohybu plazmatu v tokamaku

Popisovat striktně fyzikálně pohyb plazmatu v tokamaku je nad rámec této diplomové práce. Model pohybu plazmatu by měl být jednoduchý, avšak stále korektní vůči naší situaci. Proto budeme při odvozování pohybové rovnice uvažovat tyto zjednodušení:

- Hmotnost plazmatu m_p je během výboje konstantní a lze ji vypočítat pomocí rovnice (3.1).
- Jelikož je naše situace jednorozměrná, lze se v rámci popisu vertikální polohy plazmatu omezit na jednu souřadnici tokamaku - z (vzdálenost středu plazmatického prstence od midplane neboli horizontální osy komory).
- Vzhledem k rychlosti vertikální nestability a celkovému systému zpětnovazebního řízení lze také zanedbat dynamiku pomalých polí (EFPS a SFPS) a prohlásit je za statické.

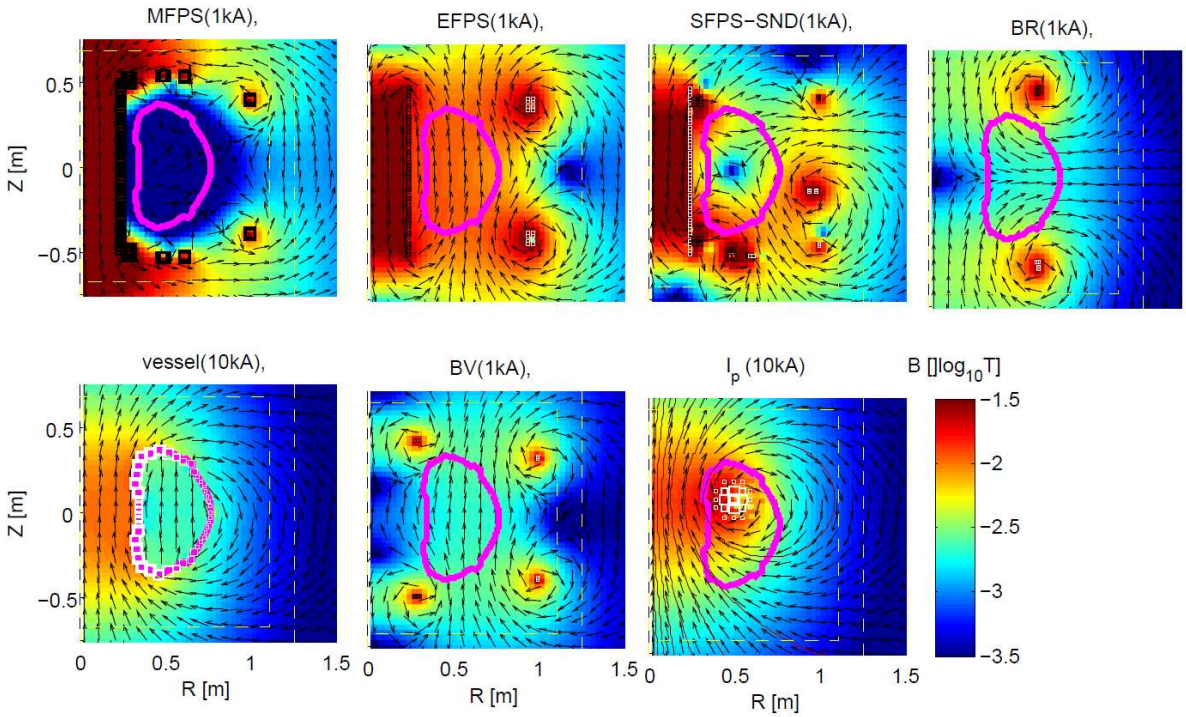
- Řízení vertikální nestability začíná krátce po průrazu plazmatem (moment, kdy se z velmi teplého seskupení částic stane plazma). V tomto momentě již nedochází dramaticky ke změnám proudu plazmatu I_p, lze tedy i proud plazmatem prohlásit za konstantní.

$$m_p = 2\pi^2 R a^2 m_{De} \bar{n}_e \sim 300\mu g \tag{3.1}$$

Model systému pro vertikální stabilizaci plazmatu vychází ze základní myšlenky mechanické fyziky, z Newtonova druhého pohybového zákonu. Působíme-li na plazma o hmotnosti m_p vnějším polem, vyvine jeho síla $F_z(z)$ zrychlení:

$$\frac{\mathrm{d}^2 z}{\mathrm{d}t^2} = \frac{F_z(z)}{m_p} \tag{3.2}$$

Exkurzí poloidálních polí tokamaku COMPASS (obr. 3.1) zjišťujeme, že pole, která působí na plazma ve vertikálním směru jsou právě EFPS, SFPS a pole od rychlých cívek pro vertikální stabilizaci FFPS_{BR}. Přitom pouze u polí EFPS a SFPS (které považujeme za statické) závisí silový účinek pole na aktuální poloze plazmatického sloupce.



Obrázek 3.1: Přehled poloidálních magnetických polí tokamaku COMPASS. Autor obrázku: J. Horáček.

Jednotlivé příspěvky od všech polí lze vyjádřit pomocí rovnice:

$$F_z(z) = I_p \cdot (F_E I_{Efps}(z(t) - z_0^E) + F_S I_{Sfps}(z(t) - z_0^S) + F_{BR} I_{BR}(t)) \tag{3.3}$$

Nyní si všimněme dvou členů této rovnice

$$I_{Efps}F_E(z(t)-z_0^E)+I_{Sfps}F_S(z(t)-z_0^S) = (I_{Efps}F_E+I_{Sfps}F_S)\cdot z(t)+(-I_{Efps}F_E z_0^E-I_{Sfps}F_S z_0^S) \tag{3.4}$$

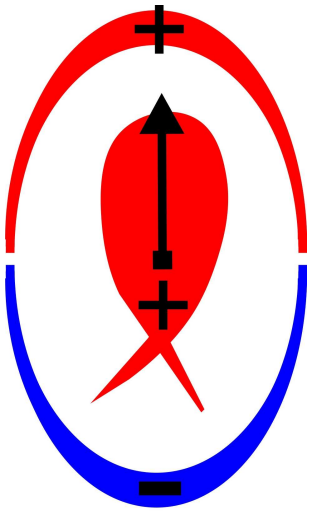
Jedná se o členy určující nestabilitu plazmatu, která závisí na současné poloze plazmatu a na způsobu, jakým plazma v této poloze působí pole EFPS a SFPS. Právě pole SFPS má tendenci destabilizovat vertikální polohu plazmatu díky svému silovému působení, které je potřeba k vytvoření průřezu plazmatu ve tvaru písmene D (D-shape). Proti této nestabilitě působí svojí dynamikou komora, která stabilizuje nejrychlejší výchylky (mikronestability) pomocí vířivých proudů. Dále tuto nestabilitu snižuje pole EFPS, které má díky své mírné nehomogenitě i částečný silový účinek ve vertikálním směru. Důležitým závěrem tohoto pozorování je fakt, že se díky různému silovému účinku polí v různé vzdálenosti od své „rovnovážné“ polohy (která není na horizontální ose komory) bude nestabilní pól polohy plazmatu posouvat v nestabilní oblasti (nestabilita plazmatu je různá v odlišných vertikálních vzdálenostech od nulové hladiny polí EFPS a SFPS). Laicky můžeme tuto situaci přirovnat k inverznímu matematickému kyvadlu, které je nejdelší ve své rovnovážné poloze a se zvyšující se výchylkou se jeho délka zkracuje.
Hladinu, na které jsou pole EFPS a SFPS v rovnováze, lze snadno určit ze členu (3.4), který položíme roven nule.

$$\begin{aligned} 0 &= I_{Efps}F_E(z(t) - z_0^E) + I_{Sfps}F_S(z - z_0^S) \\ z_0 &= \frac{I_{Efps}F_E z_0^E + I_{Sfps}F_S z_0^S}{I_{Efps}F_E + I_{Sfps}F_S} = -0.0697m \end{aligned} \tag{3.5}$$

Tato nulová hladina platí pro konstanty uvedené v podkapitole „Parametry modelu a jejich určení“. Na této hladině bude plazma v nestabilní rovnováze.

Pokud sloučíme rovnice (3.2) a (3.3) a podrobíme je časové analýze, zjistíme, že plazma je v takovém případě silně nestabilní a během $10\mu s$ je „hozeno“ na stěnu komory (modrá křivka na obr. 3.3). Do rovnice je potřeba ještě zakomponovat vliv vířivých proudů, které se díky pohybu plazmatu indukují v komoře a zpomalují vertikální pohyb plazmatu [4]. Tuto skutečnost lze fyzikálně postihnout právě pomocí vyjádření všech napětí na komoře. Pro tyto účely budeme uvažovat komoru jako dva dráty (nahoře a dole) s vlastní indukčností a odporem odpovídající komoře tokamaku a s plazmatem uvnitř. Oblasti

komory v okolí midplane zanedbáme, jelikož žádným způsobem nepřispívají v rámci vertikálního pohybu plazmatu - viz obr. 3.2 [11].



Obrázek 3.2: Zjednodušený náhled na komoru tokamaku.

Aplikací Kirchhoffova zákonu na napětí způsobené vlastním proudem vzniká rovnice pro vlastní proud komorou :

$$R_v I_v(t) + L_v \frac{\mathrm{d}I_v(t)}{\mathrm{d}t} = U_{loop} \tag{3.6}$$

Další proud v komoře lze generovat pomocí vnějšího pole pro feedback (FFPS$_{BR}$) a taky pomocí vířivých proudů indukovaných plazmatem:

$$U_{loop} = \frac{\mathrm{d}I_{BR}(t)}{\mathrm{d}t} L^v_{BR} + I_p \frac{\mathrm{d}L^p_v}{\mathrm{d}t} \tag{3.7}$$

Na první pohled nás může zarazit, že člen $\frac{\mathrm{d}L^p_v}{\mathrm{d}t}$ není zapsán klasicky jako indukčnost krát derivace proudu, ale jako derivace indukčnosti krát proud. Tento popis je zvolen z důvodu uvažování konstantního proudu plazmatem. Vzájemná indukčnost plazmatu a komory se však s vertikální polohou mění. Funkci $\frac{\mathrm{d}L^p_v}{\mathrm{d}t}$ lze korektně rozepsat na $\frac{\mathrm{d}L^p_v}{\mathrm{d}t} = \frac{\partial L^p_v}{\partial z}\frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t}$, jelikož vzájemná indukčnost komory a plazmatu se s časem nemění. Její změna s polohou v ose z ($\frac{\partial L^p_v}{\partial z}$) je téměř lineární a její hodnota je přibližně $\frac{\partial L^p_v}{\partial z} = 10^{-6}$H/m.
Nyní nám už nic nebrání napsat celkovou rovnici proudu v komoře tokamaku :

$$R_v I_v(t) + L_v \frac{\mathrm{d}I_v(t)}{\mathrm{d}t} = I_p \frac{\partial L^p_v}{\partial z}\frac{\mathrm{d}z(t)}{\mathrm{d}t} + \frac{\mathrm{d}I_{BR}(t)}{\mathrm{d}t} L^v_{BR} \tag{3.8}$$

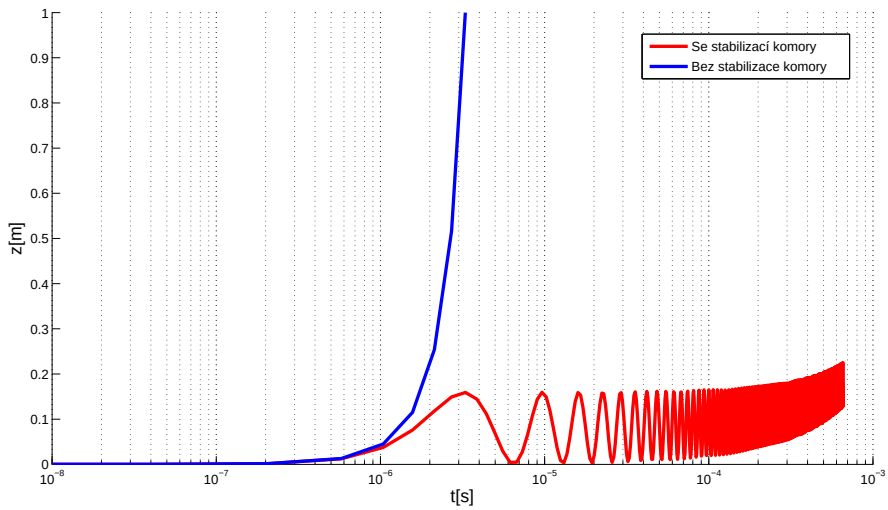
Silový účinek vířivých proudů lze vyjádřit z rovnice celkové potenciální energie komory a plazmatu :

$$\begin{aligned} E &= \frac{1}{2}L_v I_v^2 + \frac{1}{2}L_p I_p^2 + L_v^p I_p I_v \\ E(z) &= L_v^p I_p I_v(t) \end{aligned} \tag{3.9}$$

Její parciální derivace podle osy z určuje silový účinek vířivých proudů (první dva členy rovnice nezávisí na poloze). Jelikož je situace symetrická (plazma se pohybuje směrem vzhůru, vrchní část komory ho odpuzuje, spodní naopak přitahuje), musíme tuto sílu vynásobit dvěma:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_z}{\partial z} &= I_p I_v(t)\frac{\partial L_v^p}{\partial z} \\ F_{eddy} &= 2 I_p I_v(t)\frac{\partial L_v^p}{\partial z} \end{aligned} \tag{3.10}$$

Pokud po zakomponování vířivých proudů provedeme stejný experiment jako s rovnicemi (3.2) a (3.3), dostaneme poněkud překvapivý výsledek - viz. obr. 3.3. Plazma kmitá přibližně na frekvenci 100 KHz. To se děje v důsledku přidání vířivých proudů do rovnice silové rovnováhy a plazma pak kmitá netlumeně s komorou.



Obrázek 3.3: Nestabilita plazmatu bez stabilizačního efektu komory a se stabilizací komorou.

Po sloučení všech odvozených rovnic dostáváme celkovou sadu pohybových rovnic vertikální polohy plazmatu (3.11), která bude ještě následně doplněna o popis zesilovače a

jeho proudové zpětné vazby. Jedná se o diferenciální rovnice druhého a prvního řádu, které nám poslouží jako základ pro tvorbu stavového popisu.

$$\begin{aligned} m_p \frac{\mathrm{d}^2 z(t)}{\mathrm{d}t^2} &= F_z(z) - F_{eddy} \\ F_z(z) &= I_p \cdot (F_E I_{EFPS}(z(t) - z_0^E) + F_S I_{SFPS}(z(t) - z_0^S) + F_{BR} I_{BR}(t)) \\ F_{eddy} &= 2 I_p I_v(t) \frac{\partial L_v^p}{\partial z} \\ R_v I_v(t) + L_v \frac{\mathrm{d}I_v(t)}{\mathrm{d}t} &= I_p \frac{\partial L_v^p}{\partial z} \frac{\mathrm{d}z(t)}{\mathrm{d}t} + \frac{\mathrm{d}I_{BR}(t)}{\mathrm{d}t} L_{BR}^v \end{aligned} \tag{3.11}$$

3.2 Zesilovač a jeho vnitřní zpětná vazba

Pro účely řízení vertikální polohy plazmatu v tokamaku COMPASS byl navržen portugalskou skupinou rychlý koncový dvoupolohový zesilovač ve třídě D. Po dvou letech vývoje tohoto zařízení a následné konstrukci na ÚFP však finální zkoušky prokázaly chyby v návrhu zesilovače[1], které vedly k rozhodnutí tento zesilovač pro řízení polohy plazmatu nepoužívat. Jelikož toto rozhodnutí přišlo v době, kdy byla psána tato diplomová práce, znemožnilo jakékoliv finální experimenty v rámci celkového sestavení zpětné vazby. Vybrané části systému budou nicméně použity při sestavování nově navrženého zesilovače. Při dalším návrhu modelu zesilovače budeme vycházet ze základního zapojení spojitého napěťového zesilovače, který má díky proudové zpětné vazbě charakter zdroje proudu [12]. Do zpětné vazby zesilovače je přidán pomocný regulátor proudu zesilovače, díky kterému se zesilovač stává pomocným regulátorem typu PD s kompenzací derivační složky při nasycení výstupního napětí.

V modelu zesilovače je samozřejmě nutné počítat jak s omezením napětí zesilovače $U_{max} = \pm 100\ V$, tak i s omezením vstupního žádaného cívkového proudu $I_{wmax} = \pm 5\ kA$. Tato hodnota byla stanovena pracovníky ÚFP jako limitující hodnota proudu pro obvody $\mathrm{FFPS_{BR}}$. Fyzikální omezení proudu dané obvody je $\pm I_{BRmax} = U_{BR}/R_{BR} = \pm 8.33\ kA$ a maximální možný nárůst proudu cívkou je $\frac{\mathrm{d}I_{BR}(t)}{\mathrm{d}t} = U_{BR}/L_{BR} = 1.087\ A/\mu s$.

Spojitý zesilovač lze modelovat jako systém prvního řádu, tedy s jistým časovým zpožděním při odezvě napětí podle rovnice:

$$u_{out}(t) = -T_a \frac{\mathrm{d}u_{out}(t)}{\mathrm{d}t} + K_i u_{in}(t)\ , \tag{3.12}$$

[1] Konkrétně se jednalo o vysokou indukčnost ochranných odporů tranzistorů, která měla za následek špičkové nárůsty proudů při spínání tranzistorů nad jejich mezní konstrukční parametry. Bylo rovněž odzkoušeno, že bez těchto odporů není možno zařízení provozovat.

kde T_a je časová konstanta zesilovače a K_i formální zesílení proudu (V/A). Této soustavě odpovídá přenos:

$$\frac{U_{out}(s)}{U_{in}(s)} = \frac{K_i}{T_a s + 1} \ . \tag{3.13}$$

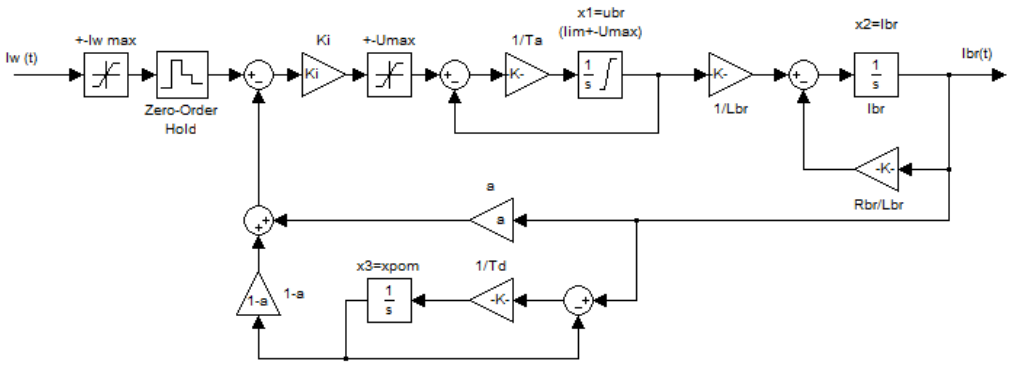
Silové obvody BR cívek lze popsat standardní diferenciální rovnicí:

$$u_{BR}(t) = R_{BR} I_{BR}(t) + L_{BR} \frac{\mathrm{d}I_{BR}(t)}{\mathrm{d}t} \ , \tag{3.14}$$

kde u_{BR} je přiložené napětí (V), R_{BR} vlastní odpor cívek BR (Ω), L_{BR} vlastní indukčnost obvodů BR (H) a I_{BR} proud cívkami. Této soustavě odpovídá přenos:

$$\frac{I_{BR}(s)}{U_{BR}(s)} = \frac{1}{L_{BR}\ s + R_{BR}} \ . \tag{3.15}$$

Spojením napěťového zesilovače s obvody BR cívek získáme kompletní nelineární model spojitého zesilovače pro řízení polohy plazmatu (obr. 3.4).



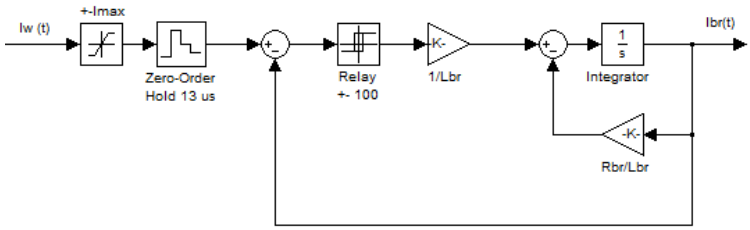
Obrázek 3.4: Nelineární SIMULINKové schéma spojitého zesilovače.

Schéma je možné popsat lineárními stavovými rovnicemi ve tvaru :

$$\begin{aligned}
\dot{u}_{BR}(t) &= -\frac{1}{T_a} u_{BR}(t) - \frac{a \cdot K_i}{T_a} I_{BR}(t) - \frac{(1-a)K_i}{T_a} x_3 + \frac{K_i}{T_a} i_w(t) \\
\dot{I}_{BR}(t) &= -\frac{R_{BR}}{L_{BR}} I_{BR}(t) + \frac{1}{L_{BR}} u_{BR}(t) \\
\dot{x}_3(t) &= -\frac{1}{T_d} x_3(t) + \frac{1}{T_d} I_{BR}(t)
\end{aligned} \tag{3.16}$$

Návrhem vnitřní zpětné vazby se zabývá kapitola 4.2.

V souladu s navrženým zesilovačem lze uvažovat i možnost dvoupolohového řízení pomocí napěťového zesilovače[2], ke kterému lze pomocí výše uvedeného postupu navrhnout SIMULINKové schéma:



Obrázek 3.5: Nelineární SIMULINKové schéma dvoupolohového zesilovače.

Obvod je možné popsat lineární stavovou rovnicí ve tvaru (jako stav je zvolen proud zesilovačem I_{BR}):

$$\frac{\mathrm{d}I_{BR}(t)}{\mathrm{d}t} = -\left(\frac{G_i + R_{BR}}{L_{BR}}\right) I_{BR}(t) + \left(\frac{G_i}{L_{BR}}\right) U_{BR}(t) \ , \tag{3.17}$$

kde G_i přebírá zesílení dvoupolohového nelineárního členu, tedy $\mathrm{G_i} = \pm 100\ V$. Tato nelinearita má však zásadní dopad na celkové chování obvodu. Při přibližném dosažení žádaného proudu v obvodech BR způsobí stálá nenulová regulační odchylka oscilace produ kolem žádané hodnoty. To může mít za následek nepříznivé ovlivňování polohy plazmatu, jelikož poloidální cívky jsou oproti jiným tokamakům blízko komory a komora sama je vzhledem k ostatním tokamakům velmi slabá a má malý stabilizační efekt v rámci vířivých proudů.

V současné době jsou obvody BR cívek tvořeny párovými cívkami F1, F2, F3, F4 a F5, které mají celkovou vlastní indukčnost 93.4 μH. Podle propočtů Mgr. Josefa Havlíčka by však bylo vhodnější k vertikální stabilizaci využívat pouze cívek F1 a F4, které mají nižší vlastní indukčnost (41.4 μH) a vyšší homogenitu radiálního pole [13].

[2]Předpokládá se, že za vzorkovací periodu ($h = 13\mu s$) dokáže zesilovač kompletně změnit hodnotu vlastního napětí.

3.3 Celkové sestavení regulačního obvodu

Po doplnění rovnic pohybu plazmatu (3.11) o rovnice proudového zesilovače jsme schopni sestavit celkový stavový popis regulované soustavy. Pokud bychom ale tyto rovnice přímo převedli do stavového popisu, vznikly by v popisu soustavy díky rovnici komory tokamaku algebraické smyčky. Této nepříjemnosti se lze vyhnout tak, že do rovnice komory zakomponujeme statickou a posléze i dynamickou rovnováhu působení polí v komoře tokamaku.

Ze statické rovnováhy silového působení polí v komoře tokamaku (první 3 rovnice (3.11)) vyjádříme proud komorou:

$$I_v(t) = \frac{1}{2L^p_{v,\partial z}} \cdot \left(F_{BR} I_{BR}(t) + F_E I_{Efps}(z(t) - z_0^E) + F_S I_{Sfps})(z(t) - z_0^S) - \frac{m_p}{I_p} \frac{\mathrm{d}^2 z(t)}{\mathrm{d}t^2} \right) . \tag{3.18}$$

Časová derivace proudu komorou pak odpovídá:

$$\frac{\mathrm{d}I_v(t)}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{2L^p_{v,\partial z}} \cdot \left(F_{BR} \frac{\mathrm{d}I_{BR}(t)}{\mathrm{d}t} + (F_E I_{Efps} + F_S I_{Sfps}) \frac{\mathrm{d}z(t)}{\mathrm{d}t} - \frac{m_p}{I_p} \frac{\mathrm{d}^3 z(t)}{\mathrm{d}t^3} \right) . \tag{3.19}$$

Pro komoru tokamaku platí rovnice:

$$R_v I_v + L_v \frac{\mathrm{d}I_v}{\mathrm{d}t} = I_p L^p_{v,\partial z} \frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t} + \frac{\mathrm{d}I_{BR}}{\mathrm{d}t} L^v_{BR} . \tag{3.20}$$

Dosazením proudu komorou (3.18) a jeho časové derivace (3.19) do rovnice komory získáváme pohybovou rovnici pro vertikální pohyb plazmatu v tokamaku:

$$\begin{aligned} -\frac{L_v m_p}{I_p} \frac{\mathrm{d}^3 z(t)}{\mathrm{d}t^3} - \frac{R_v m_p}{I_p} \frac{\mathrm{d}^2 z(t)}{\mathrm{d}t^2} + (L_v(F_E I_{Efps} + F_S I_{Sfps}) - 2I_p(L^p_{v,\partial z})^2) \frac{\mathrm{d}z(t)}{\mathrm{d}t} + \\ + R_v F_E I_{Efps}(z(t) - z_0^E) + R_v F_S I_{Sfps}(z(t) - z_0^S) = \\ = (2L^p_{v,\partial z} L^v_{BR} - L_v F_{BR}) \frac{\mathrm{d}I_{BR}(t)}{\mathrm{d}t} - R_v F_{BR} I_{BR}(t) . \end{aligned} \tag{3.21}$$

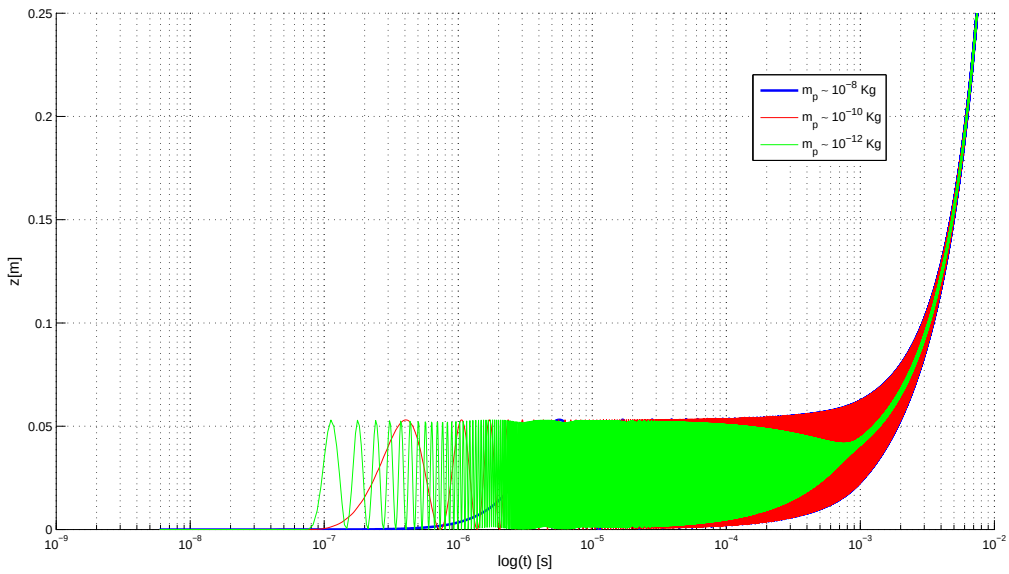
Je zřejmé, že na nulové hladině působení polí (3.5) bude tato rovnice lineární.

Odpovídající přenosová funkce je

$$\frac{Z(s)}{I_{BR}(s)} = \frac{3.263 \cdot 10^7 (s + 931.7)(s + 666.7)}{(s - 532.7)(s + 666.7)(s^2 + 1199\ s + 8.11 \cdot 10^{11})} . \tag{3.22}$$

3.3.1 Diskuze k hmotnosti plazmatu

Nenulová hmotnost plazmatu způsobuje díky kmitání s komorou oscilace polohy plazmatu. Pro různé hmotnosti plazmatu byl simulován vývoj polohy plazmatu - viz obr. 3.6.



Obrázek 3.6: Časový vývoj polohy plazmatu pro různé hmotnosti plazmatu.

Z obr. 3.6 je patrné, že nenulová hmotnost plazmatu má vliv pouze na frekvenci kmitání polohy plazmatu. Fyzikálně lze tuto situaci popsat tak, že čím menší je hmotnost plazmatu, tím rychleji je plazma urychlováno vnějším polem. Tím větší vířivý proud se ale naindukuje v komoře tokamaku, který ho vrací do původní polohy[3]. Při reálných hmotnostech plazmatu (3.1) je frekvence oscilací přibližně $f_{osc} \sim 100$kHz. Tato frekvence je vysoko nad vzorkovací frekvencí měření polohy plazmatu ($f_{vz} = 20$kHz). Proto se nabízí možnost považovat hmotnost plazmatu za nulovou a nežádoucí kmity tím odstranit.

3.3.2 Odvození pohybových rovnic pro $m_p = 0$

Pro $m_p = 0$ přechází rovnice statické rovnováhy polí (první 3 rovnice ve (3.11)) v

$$F_z(z) = F_{eddy} \ . \tag{3.23}$$

[3]Platí samozřejmě pro frekvence vyšší, než které komora propouští.

Poté už je odvození pohybové rovnice ekvivalentní postupu výše. Výsledná pohybová rovnice při nulové hmotnosti plazmatu je

$$\begin{aligned}&(L_v(F_E I_{Efps} + F_S I_{Sfps}) - 2I_p(L^p_{v,\partial z})^2)\frac{\mathrm{d}z(t)}{\mathrm{d}t} + R_v F_E I_{Efps}(z(t) - z_0^E) + \\ &R_v F_S I_{Sfps}(z(t) - z_0^S) = (2L^p_{v,\partial z} L^v_{BR} - L_v F_{BR})\frac{\mathrm{d}I_{BR}(t)}{\mathrm{d}t} - R_v F_{BR} I_{BR}(t)\ . \end{aligned} \tag{3.24}$$

Již zde je vidět, že za předpokladu nulové hmotnosti plazmatu je odstraněna pouze nežádoucí dynamika kmitů. V rovnovážné poloze polí lze vyjádřit přenos soustavy

$$\frac{Z(s)}{I_{BR}(s)} = \frac{4.023 \cdot 10^{-5}(s + 931.7)(s + 666.7)}{(s + 666.7)(s - 532.7)}\ , \tag{3.25}$$

který tuto myšlenku dokazuje, neboť soustava má stejné póly jako (3.22), pouze jsme odstranili dvojici kmitavých pólů a statické zesílení se tak stalo „realističtějším“.

3.3.3 Stavový popis soustavy

Po sloučení rovnice pro vertikální pohyb plazmatu (3.24) s rovnicemi popisující spojitý zesilovač (3.16) dostáváme konečný stavový popis soustavy. Jako stavový vektor je zvolen $[u_{BR} \quad I_{BR} \quad x_3 \quad z]^T$, vstupem do soustavy je žádaná hodnota cívkového proudu $u = i_w$. Pro přehlednost stavových rovnic a následného stavového popisu zavedeme značení: $\alpha = L_v(F_E I_{Efps} + F_S I_{Sfps}) - 2I_p(L^p_{v,\partial z})^2$ a $F_{set} = \frac{R_v(F_E I_{Efps} z_0^E + F_S I_{Sfps} z_0^S)}{L_v(F_E I_{Efps} + F_S I_{Sfps}) - 2I_p(L^p_{v,\partial z})^2}$.

$$\begin{aligned}
x_1(t) &= -\frac{1}{T_a}x_1(t) - \frac{K_i a}{T_a}x_2(t) - \frac{K_i(1-a)}{T_a}x_3(t) + \frac{K_i}{T_a}u(t) \\
x_2(t) &= \frac{1}{L_{BR}}x_1(t) - \frac{R_{BR}}{L_{BR}}x_2(t) \\
x_3(t) &= \frac{1}{T_d}x_2(t) - \frac{1}{T_d}x_3(t) \\
x_4(t) &= \frac{2L^v_{BR}L^p_{v,\partial z} - F_{BR}L_v}{L_{BR}\,\alpha}\,x_1(t) - \frac{2L^v_{BR}R_{BR}L^p_{v,\partial z} + F_{BR}(L_{BR}R_v - L_v R_{BR})}{L_{BR}\,\alpha}\,x_2(t) - \\
&- \frac{R_v(F_E I_{Efps} + F_S I_{Sfps})}{\alpha}x_4(t) + F_{set} \\
y(t) &= z(t) = x_4(t)
\end{aligned} \tag{3.26}$$

Koeficienty stavového popisu a_{mn} a b_{mn} odpovídají jednotlivým členům ve stavových rovnicích (3.26).

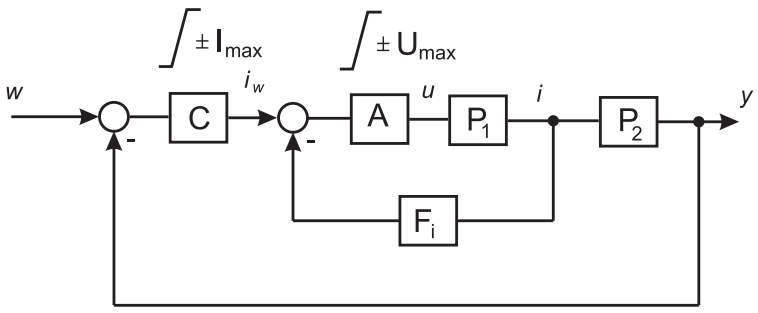
$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{x}_3(t) \\ \dot{x}_4(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 & 0 \\ 0 & a_{32} & a_{33} & 0 \\ a_{41} & a_{42} & 0 & a_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot u(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ F_{set} \end{bmatrix}$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \end{bmatrix} + [0] \cdot u(t) \tag{3.27}$$

Přenos celého systému lze vyjádřit ze stavového popisu jednoduše :

$$\frac{Z(s)}{I_w(s)} = \mathbf{C}(s \cdot \mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{B} + \mathbf{D} = \frac{437.2814(s+7692)(s+931.7)}{(s+3463)(s-532.7)(s^2+6360s+2.473 \cdot 10^7)} \,. \tag{3.28}$$

Kompletní lineární stavový popis (3.27) kopíruje nelineární SIMULINKové schéma, které bude použito při simulacích celkového řídicího algoritmu - viz obr. 3.8. Blokové schéma regulačního obvodu lze vidět na obr. 3.7. Jednotlivé přenosy pak odpovídají : A - zesilovač, P_1 - soustava cívek BR, F_i - regulátor vnitřní smyčky zesilovače, P_2 - vliv BR obvodů na polohu plazmatu a C - regulátor vnější smyčky.



Obrázek 3.7: Blokové schéma regulačního obvodu.

3.4 Parametry modelu a jejich určení

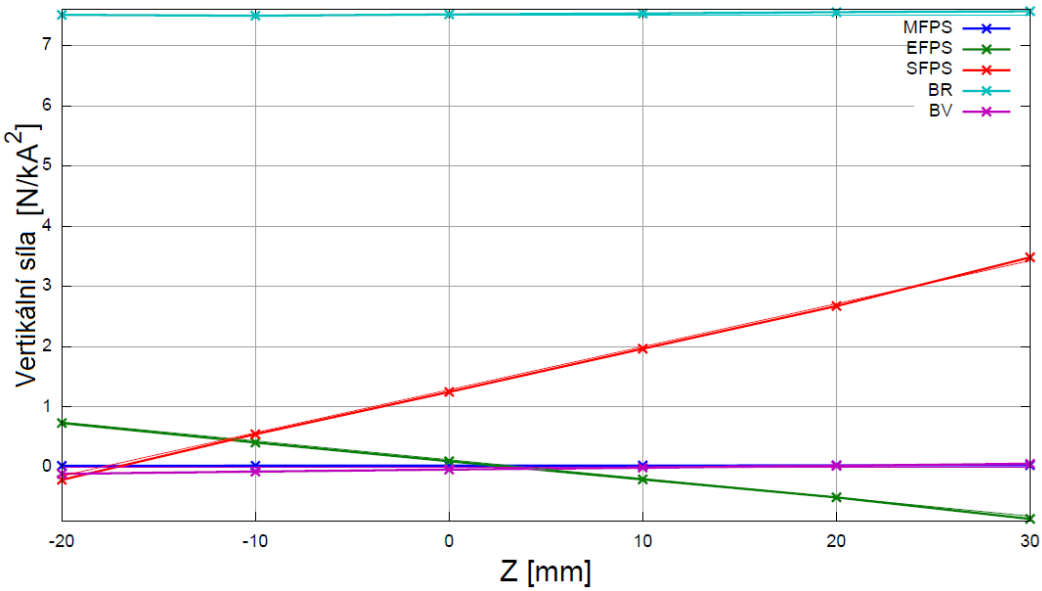
V tab. 3.1 můžeme najít přehled jednotlivých konstant modelu. Tyto hodnoty byly přesně změřeny nebo vypočteny ze simulací.

Tabulka 3.1: Konstanty modelu a jejich hodnoty

Symbol	Hodnota	Symbol	Hodnota
R_{BR}	$12 \cdot 10^{-3}$ Ω	L_{BR}	$92 \cdot 10^{-6}$ H
K_i	±0.5 V/A	L^v_{BR}	$1.6 \cdot 10^{-6}$ H
L_v	$1.5 \cdot 10^{-6}$ H	I_p	$180 \cdot 10^3$ A
$L^p_{v,\partial z}$	10^{-6} H/m	R_v	10^{-3} Ω
L^v_{BR}	$1.6 \cdot 10^{-6}$ H	-	-
F_E	$-31.3 \cdot 10^{-6}$ $Nm^{-1}A^{-2}$	F_S	$71.4 \cdot 10^{-6}$ $Nm^{-1}A^{-2}$
F_{BR}	$7.5 \cdot 10^{-6}$ $Nm^{-1}A^{-2}$	-	-
I_{Efps}	$8 \cdot 10^3$ A	I_{Sfps}	$5 \cdot 10^3$ A
z^E_0	$4 \cdot 10^{-3}$ m	z^S_0	$-18 \cdot 10^{-3}$ m

Hodnota odporu vinutí řídicí cívky R_{BR} byla změřena čtyřsvorkovou metodou. Předpokládá se však její částečné navýšení vlivem odporu vedení přívodních kabelů od rychlého zesilovače k cívkám.
Konečná odhadovaná hodnota je tedy $R_{BR} = R_{civka} + R_{vedeni} = 10^{-2} + 2 \cdot 10^{-3} = 12 \cdot 10^{-3} \Omega$
Hodnota vlastní indukčnosti řídicí cívky L_{BR} byla vypočtena z geometrických vlastností cívky [9].
Hodnota vzájemné indukčnosti komory tokamaku a řídicí cívky L^v_{BR} byla vypočítána z materiálových vlastností komory a cívky BR, kdy byla komora „rozřezána“ na několik menších závitů.
Hodnoty vlastní indukčnosti komory tokamaku L_v a odporu komory R_v jsou převzaty z původní technické dokumentace tokamaku COMPASS-D z britského Culhamu. Tyto hodnoty byly dále přepočítány stejným postupem jako v případě vzájemné indukčnosti komory a řídicí cívky.
Vzájemná indukčnost komory a plazmatu $L^p_{v,\partial z}$ byla vypočtena obdobně jako v předchozích dvou případech. Plazma je při tomto výpočtu bráno jako jeden závit s polohou na horizontální ose tokamaku. Pohybem plazmatu po vertikální ose komory pak dostáváme různé hodnoty vzájemných indukčností. Jejich změna je však vzhledem k vertikálnímu pohybu téměř lineární a tak může být tento člen nahrazen konstantou udávající směrnici aproximované přímky.
Jelikož jsme při konstrukci modelu zanedbali měnící se proud v obvodech EFPS, SFPS a i měnící se proud plazmatem, byly tyto proudy určeny jako obvyklé hodnoty při výboji. Silové působení cívek obvodů SFPS (F_S), EFPS (F_E) a $FFPS_{BR}$ (F_{BR}), stejně tak jako nulové hladiny potenciálu příslušných polí (z^S_0 a z^E_0) byly vypočteny na základě simulace

působení jednotlivých polí na plazmatický sloupec [11]. Při daném průřezu plazmatu se jeho proudová hustota vynásobí lokálně horizontální složkou velikosti pole (vytváří vertikální sílu). Po jejich přeintegrování přes průřez plamatu pak dostáváme pro rozdílné vzdálenosti plazmatu od středu komory rozdílné silové působení. Dále se postupuje stejně jako v případě parciální derivace vzájemné indukčnosti plazmatu a komory. Výsledné silové působení všech polí lze vidět na obr. 3.9. Hodnoty F_S a F_E lze určit jako směrnice příslušných přímek, z_0^S a z_0^E jsou vertikální vzdálenosti od osy komory, kde pole nepůsobí. Jelikož má pole BR konstantní působení, bereme jako hodnotu F_{BR} tuto konstantu.



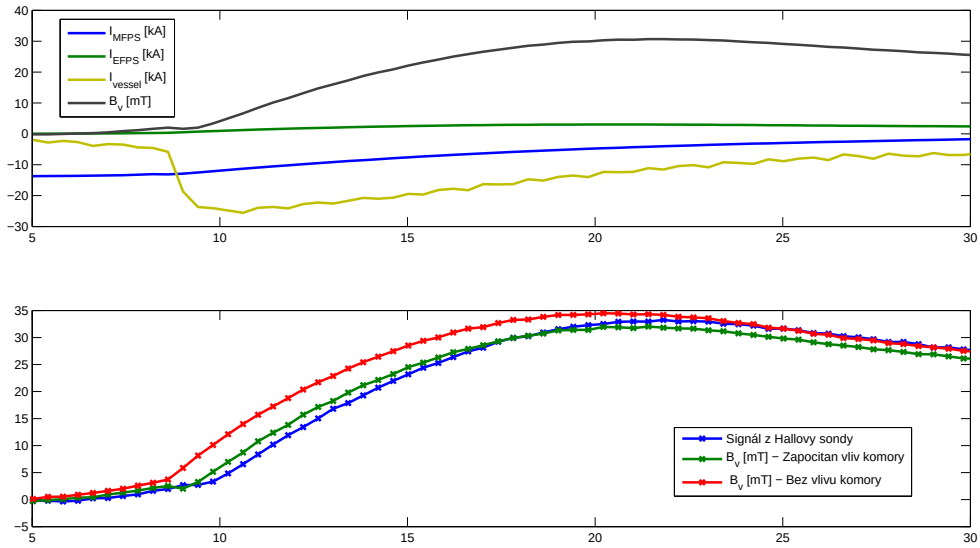
Obrázek 3.9: Vertikální působení polí na plazmatický sloupec při $I_p = 1kA$.
Autor obrázku: J. Horáček.

3.5 Pronikání magnetického pole do komory tokamaku

V rámci úvodních experimentů k sestrojení zpětnovazebního řízení plazmatu bylo provedeno měření pronikání vnějšího magnetického pole do komory tokamaku. K měření byla použita Hallova magnetická sonda, která byla umístěna do středu komory. Měření mělo prokázat nenulovou složku vertikálního pole při standardním výboji v tokamaku. Jako zdroj magnetického pole jsou použity obvody MFPS a EFPS. Budicí signály lze tedy přirovnat k rampám, což lze vidět na vrchní části obr. 3.10. Za metodickou chybu měření můžeme považovat nepřesné nastavení senzoru vůči rovině tokamaku, kdy se senzor odchýlil přibližně o 3° od roviny, což způsobilo nepřesnost měření 10 %.

Měření byla porovnávána se simulacemi modelu, který reagoval na stejné vstupní signály

(spodní část obr. 3.10). Měření prokazuje, že pronikání magnetického pole je přibližně v souladu s modelem. Pole uvnitř komory je tedy mírně zeslabeno a časově zpožděno vlivem vířivých proudů.



Obrázek 3.10: Vliv komory na pronikání vnějšího magnetického toku. Rozměr osy x je čas v ms.

3.6 Diskuze nad modelem

Odvozený model systému řízení vertikální polohy plazmatu se snaží o adekvátní fyzikální popis nejdůležitějších jevů působících na plazma během výboje v tokamaku. Při jeho reálném nasazení se však projeví některé minoritní jevy, které byly při odvozování zanedbány nebo brány jako přibližné. Jedná se například o měnící se pole EFPS a SFPS na dlouhém časovém horizontu, což může mít částečný vliv na nestabilitu plazmatu. Tyto vlivy by ale neměly radikálně ohrozit stabilitu obvodu.

Dalším jevem, který je třeba v této souvislosti zmínit, je ovlivnění napětí na řídicích cívkách změnou proudu plazmatu, který jsme uvažovali jako konstantní. Vzhledem k tomu, že naindukované napětí by bylo v řádu několika voltů, se tento jev zanedbává.

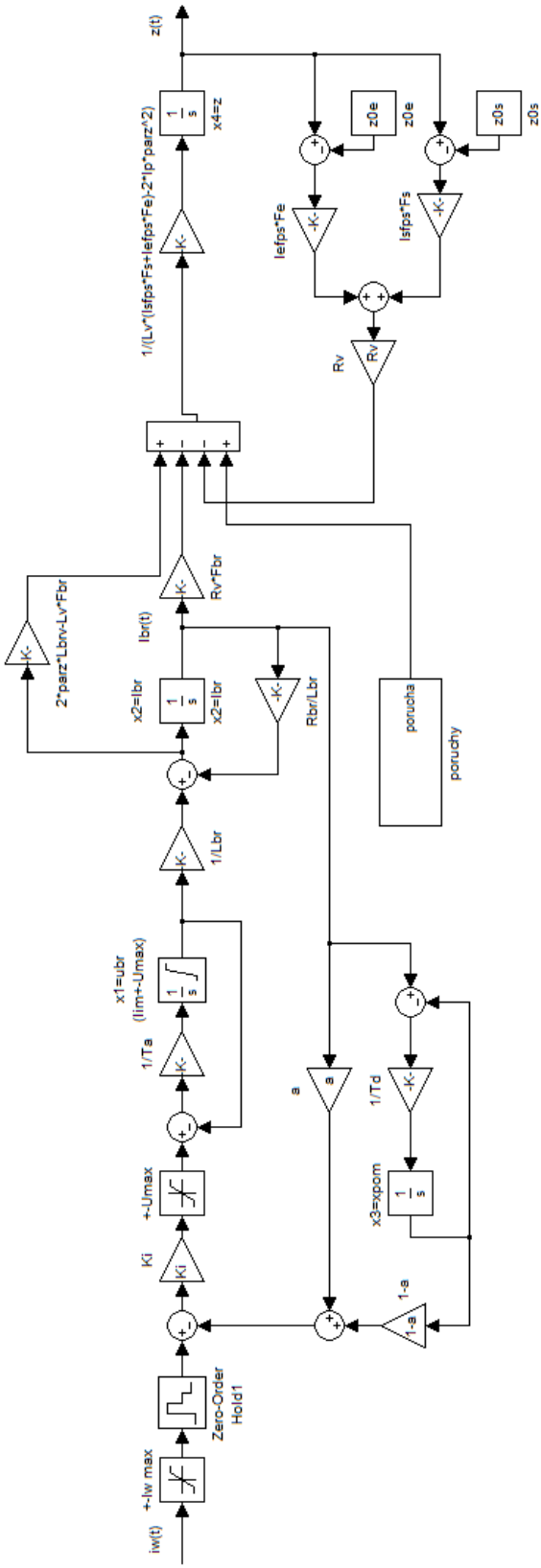
Oproti modelu řízení polohy plazmatu v bakalářské práci [9] se nyní zanedbává i zpětné ovlivnění proudu řídicími cívkami od vířivých proudů (indukce skrze člen $L^v_{BR}\frac{\mathrm{d}I_v}{\mathrm{d}t}$ v rovnici pro součet napětí na řídicí cívce (3.14)), který přidával do modelu v bakalářské práci

jednu nulu. Situaci lze přiblížit pomocí porovnání členů napěťové rovnice:

$$\begin{aligned} u_{BR} = 100V = L_{BR}\frac{\mathrm{d}I_{BR}}{\mathrm{d}t} &= L^v_{BR}\frac{\mathrm{d}I_v}{\mathrm{d}t} \\ \mathrm{d}I_{BR} &= \frac{L^v_{BR}}{L_{BR}}\mathrm{d}I_v \\ \mathrm{d}I_{BR} &= \frac{1.5\cdot 10^{-6}}{92\cdot 10^{-6}}10^3 = 16.3A\ , \end{aligned} \tag{3.29}$$

tedy poruchová skoková změna proudu komory o zhruba 1 kA (vyvolaná indukcí od poruchové skokové změny polohy plazmatu o 1 cm, což je reálná výchylka vlivem mikronestabilit) se do obvodů BR naindukuje proud přibližně 16 A. Tento vliv je tedy z hlediska řízení zanedbatelný a lze ho brát jako poruchu proudu řídicích cívek.
V konečném důsledku je model odvozený v bakalářské práci velmi podobný nově vytvořenému modelu. Jedinou výraznější změnou je redukce jednoho stavu vlivem příznivého pronikání magnetického pole do komory tokamaku.

Největší nevýhodou modelu však stále zůstává pronikání magnetického pole do plazmatického sloupce a jeho následné ovlivnění polohy plazmatu. V současném modelu je tento průnik okamžitý, což nedpovídá realitě. Korektní přístup v modelování tohoto jevu by však vyžadoval popis plazmatického sloupce pomocí magnetohydrodynamických rovnic, což je nad rámec současných znalostí fyziky plazmatu autora této práce. Bude tak velmi zajímavé, pozorovat při prvotních pokusech při sestavování zpětnovazebního obvodu, do jak velké míry se tento fakt projeví při řízení vertikální polohy plazmatu.



Obrázek 3.8: Nelineární model pro řízení polohy plazmatu.

Kapitola 4

Návrh regulátoru rychlé zpětné vazby (FFPS)

V této kapitole se podrobně zaměříme na návrh řízení největší makroskopické nestability v tokamacích, která se dramaticky projevuje především při vytvoření tvarovaného plazmatu - tzv. D-shape (obr. 1.2).

V rámci vytvořeného modelu lze využít hned několik přístupů při návrhu regulátorů (klasické metody seřizování regulátorů, využití stavové zpětné vazby a fuzzy řízení). Regulaci budeme navrhovat jak pro spojitý, tak pro dvoupolohový regulátor. Počáteční stav polohy plazmatu je zvolen záměrně daleko od rovnovážné polohy polí SFPS a EFPS ($z(0) = -0.0352$), abychom se přesvědčili, zda dokáže navržený regulátor zvládnout i nevydařený start výboje. Jako referenční poloha regulátorů je volena osa tokamaku ($z_{ref} = 0$). Každý navržený regulátor je následně testován na nelineárním Simulinkovém modelu. Musí tedy respektovat nelinearity soustavy, ale taky v dostatečné době zatlumit poruchy polohy plazmatického sloupce.
Pokud regulátor nezvládne svoji úlohu, nastává náraz plazmatu do stěny komory tokamaku - tzv. VDE (*Vertical displacement event*). Plazma pak zaniká během několika μs vlivem vlastní nehomogenity (ušpinění od stěny). U tokamaku COMPASS vede tato situace pouze k nestandardnímu ukončení výboje. U tokamaků, ve kterých by měla probíhat D-T reakce, je plazma a především jeho magnetické pole nositelem energie a tak může náraz plazmatu o komoru způsobit poškození stěny komory a následné vyřazení zařízení z provozu.

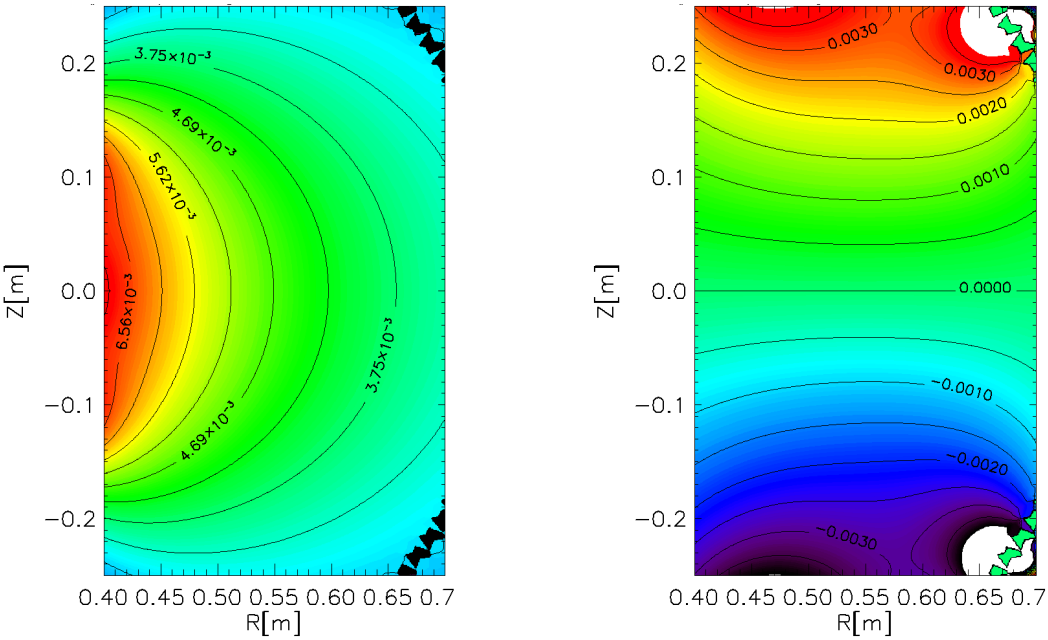
4.1 Měření polohy plazmatu

V následující krátké podkapitole se seznámíme se způsobem měření polohy plazmatu. Tokamak COMPASS disponuje celkem třemi sadami měřících cívek pro určování polohy plazmatu. V současné době se k měření polohy využívá sedmi měřících IPR (Internal Partial Rogowski) cívek uvnitř komory tokamaku (3 pro měření radiální polohy, 4 pro měření vertikální polohy), jejichž signály jsou dále v reálném čase zpracovávány pomocí signálového procesoru [14].
Poloha plazmatu je určována z měření jeho magnetického pole. Pro daný tvar plazmatu a jeho proudový profil lze pomocí Biot-Savartova zákona vypočítat naindukovaný signál v měřících cívkách. Z důvodu přesnosti měření jednotlivých složek magnetického pole se používají pouze některé měřící cívky. Výsledné složky magnetického pole dostáváme podle rovnic:

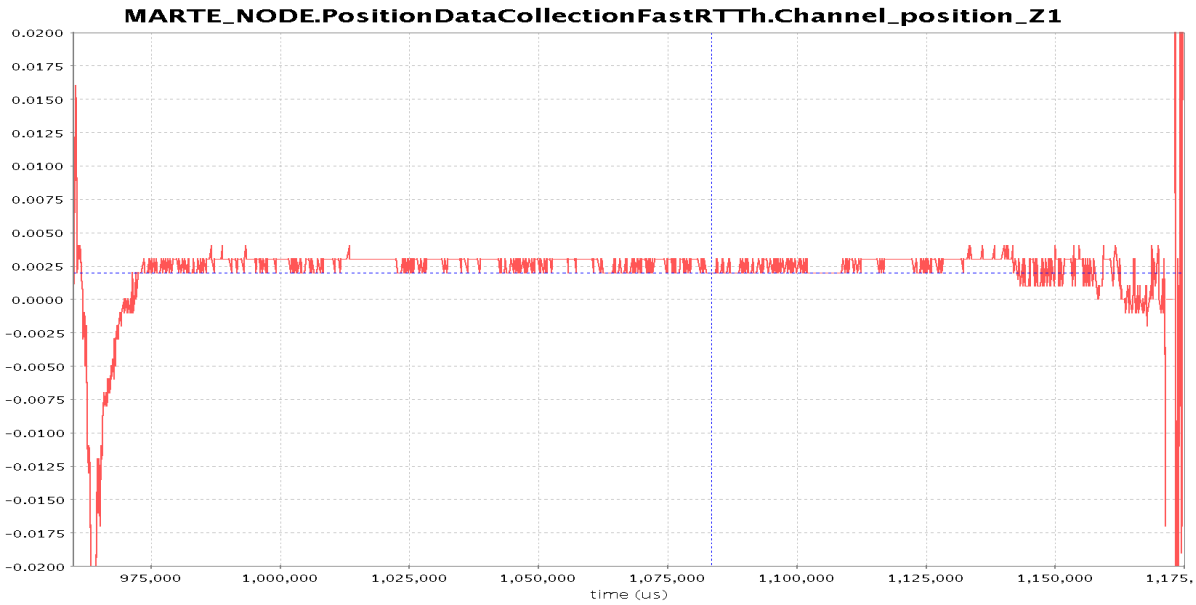
$$\begin{aligned} B_{ver} &= 1.2 \cdot IPR_8 + IPR_9 + 1.2 \cdot IPR_{10} \\ B_{hor} &= 3 \cdot IPR_5 + IPR_3 - 3 \cdot IPR_{13} - IPR_{15} \ . \end{aligned} \tag{4.1}$$

Z těchto rovnic dostáváme složky magnetického pole, kterým odpovídají jednotlivé ekvipotenciály na obr. 4.1. Průsečík těchto ekvipotenciál udává polohu plazmatu.

Pomocí simulace byly získány různé hodnoty polí B_{ver} a B_{hor} pro různé polohy plazmatu v komoře tokamaku. Souhrn těchto hodnot tvoří look-up table, která je naprogramována v rychlém signálovém procesoru a je používána pro online výpočet polohy plazmatu. Ukázka reálného výpočtu vertikální polohy plazmatu je na obr. 4.2.



Obrázek 4.1: Simulace magnetických polí pro výpočet horizontální (vlevo) a vertikální (vpravo) polohy plazmatu. Autor obrázku: F. Janky



Obrázek 4.2: Průběh vertikální polohy kruhového plazmatu v tokamaku COMPASS. Na ose y je vertikální poloha plazmatu z[m]. Autor obrázku: F. Janky

4.2 Regulátor vnitřní zpětné vazby zesilovače

Pomocí vnitřní zpětné vazby se standardní napěťový zesilovač chová jako zesilovač proudu. Nabízí se možnost umístit do zpětné vazby zesilovače pomocný regulátor k urychlení přechodového děje a částečného zmenšení zákmitů zesilovače. Regulátor bude navrhován pouze pro spojitý zesilovač, dvoupolohový zesilovač ponecháme bez regulátoru ve zpětné vazbě.

Přenos napěťové části zesilovače lze vyjádřit jako:

$$A(s) = \frac{U_{out}(s)}{U_{in}(s)} = \frac{K_i}{T_a s + 1} = \frac{0.5}{0.0005s + 1} \ , \tag{4.2}$$

kde $K_i = 0.5$ je formální zesílení proudu (V/A) a $T_a = 0.5\ ms$ předpokládaná časová konstanta napěťového zesilovače.

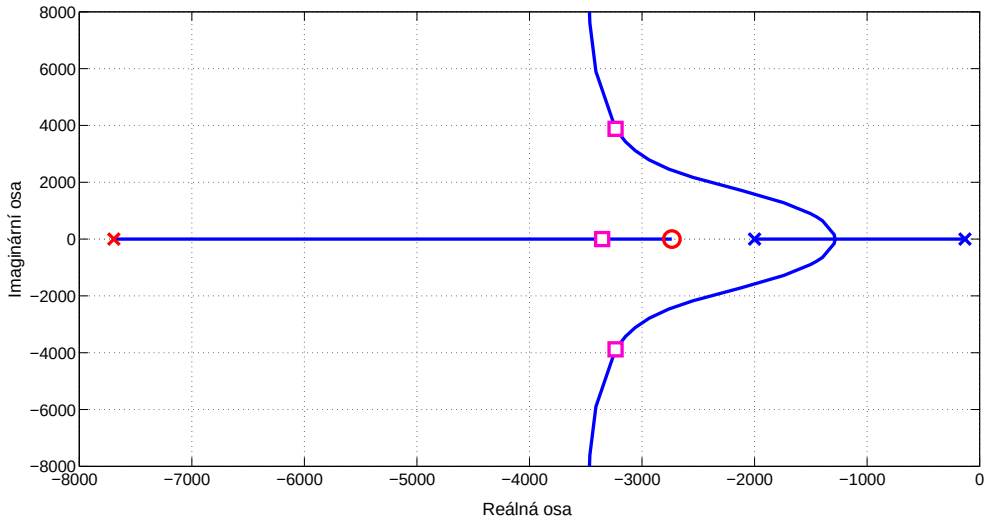
Přenos BR obvodů vyjádříme z rovnice napětí (3.14) jako:

$$P_1(s) = \frac{u_{BR}(s)}{I_{BR}(s)} = \frac{1}{L_{BR}s + R_{BR}} = \frac{1}{9.2 \cdot 10^{-5}s + 0.012} \ . \tag{4.3}$$

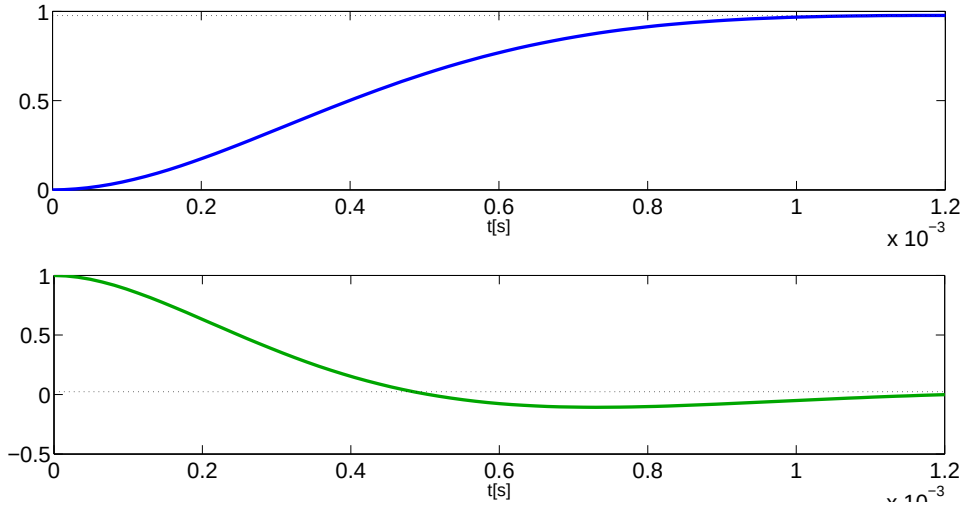
K soustavě $A(s) \cdot P_1(s)$ lze pomocí metody geometrického místa kořenů navrhnout zpětnovazební regulátor typu Lead (kompenzace s fázovým předstihem), který je aproximací PD regulátoru. Jeho nespornou výhodou je, že může být realizován pasivními prvky. Přenos takovéhoto regulátoru bude:

$$F_i(s) = \frac{aT_d s + 1}{T_d s + 1} \ . \tag{4.4}$$

Při volbě konstanty regulátoru $a = 2.7692$ a jeho derivační časové konstanty $T_d = 130\mu s$ dosahujeme přibližně šestinásobného zrychlení odezvy soustavy při minimálním kmitání výstupu. Geometrické místo kořenů ukazuje obr. 4.3 a výstup regulované soustavy spolu s akčním zásahem regulátoru (obr. 4.4).



Obrázek 4.3: Geometrické místo kořenů vnitřní regulační smyčky.



Obrázek 4.4: Skoková odezva výstupu zesilovače a akční zásah regulátoru vnitřní smyčky.

Celkový přenos zesilovače s proudovou zpětnou vazbou bude:

$$F_1(s) = \frac{A(s)P_1(s)}{1 + F_i(s)A(s)P_1(s)} = \frac{1.09 \cdot 10^7(s + 7692)}{(s + 3463)(s^2 + 6360s + 2.473 \cdot 10^7)} \ . \tag{4.5}$$

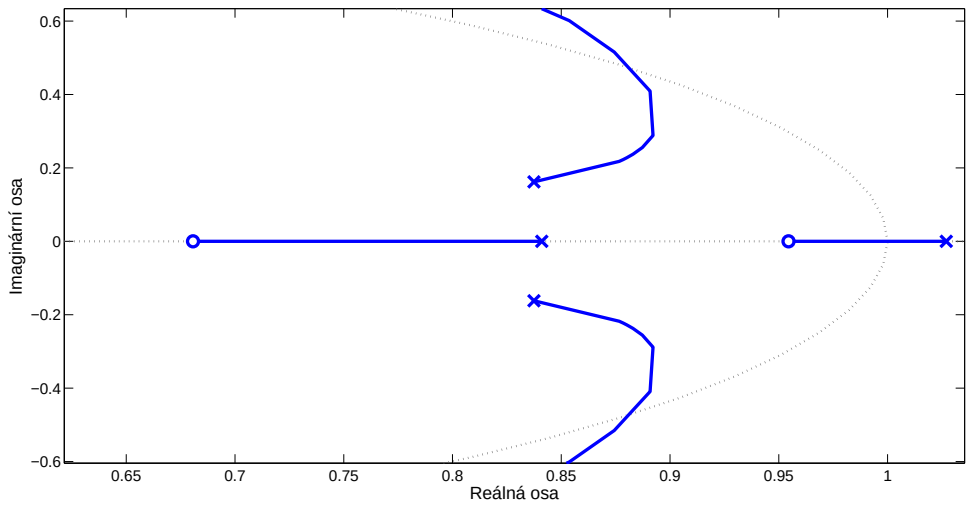
Vstupem této části celkového systému bude výstup vnějšího regulátoru polohy plazmatu (tedy žádaná hodnota cívkového proudu), která bude omezena saturací $\pm I_{wmax}$ z důvodu ochrany zesilovače. Toto omezení též chrání obvod proti windupu, který by mohl

vzniknout při použití vnějšího regulátoru s integrační složkou.

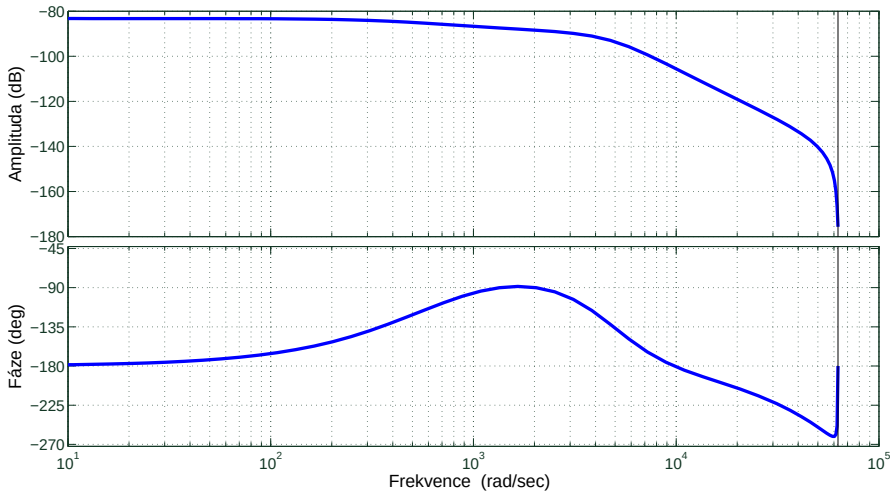
4.3 Analýza systému

Po doplnění rychlého zesilovače o dynamiku polohy plazmatu $(F_1(s) \cdot P_2(s))$ získáváme celkový přenos systému (3.28). Významnou část geometrického místa kořenů lze vidět na obr. 4.5, amplitudovou a fázovou charakteristiku pak na obr. 4.6.

$$\frac{Z(z)}{I_w(z)} = \frac{5.3758 \cdot 10^{-7}(z+0.9882)(z-0.9545)(z-0.6807)}{(z-1.027)(z-0.841)(z^2-1.675\ z+0.7276)}\ ,\ T_{vz} = 50\ \mu s \tag{4.6}$$



Obrázek 4.5: Významná část geometrického místa kořenů soustavy se spojitým zesilovačem.

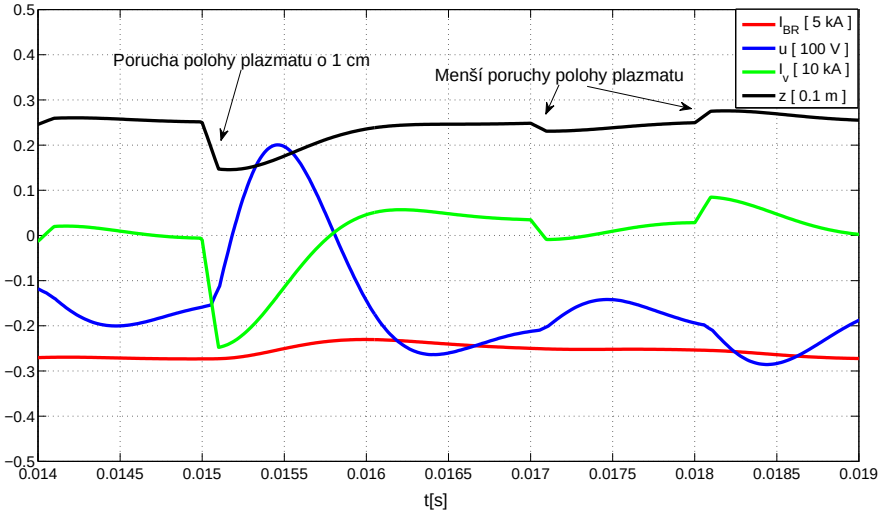


Obrázek 4.6: Amplitudová a fázová charakteristika soustavy.

Již nyní lze vidět, že je soustava řiditelná pomocí P regulátoru. Do dalších úvah lze zahrnout i regulaci pomocí PI regulátoru nebo regulaci s fázovým zpožděním (Lag).

4.3.1 Poruchy vertikální polohy plazmatu

Poruchy vertikální polohy plazmatu nastávají v důsledku mikronestabilit a projevují se takřka skokovou změnou polohy plazmatu v rozsahu několika milimetrů až centimetrů, přičemž za fyzikálně přípustnou lze v rámci tokamaku COMPASS ještě považovat skokovou změnu polohy plazmatu o 5 cm. Tyto nepředvídatelné skoky se v terminologii fyziky plazmatu nazývají „kicky“, což lze do češtiny volně přeložit jako „kopance“.
Abychom se v rámci simulace co nejlépe přiblížili realitě, budeme tyto poruchy simulovat pomocí krátkých pulzů, které budou přičítány k derivaci polohy plazmatu. Na obr. 4.7 lze vidět typický průběh poruchy vertikální složky polohy společně s reakcí regulátoru.



Obrázek 4.7: Typický průběh poruchy vertikální polohy plazmatu.

4.3.2 Analýza stavového popisu

Pomocí analýzy stavového popisu zajistíme důležité vlastnosti pro další návrh LQG regulátoru. Jedná se především o stabilizovatelnost a pozorovatelnost soustavy. Poté vyjádříme diskrétní popis soustavy.

Systém je pozorovatelný, pokud má matice pozorovatelnosti $\mathcal{O}$ plnou hodnost (řečeno lépe - hodnost této matice je rovna řádu systému):

$$\begin{aligned} \mathcal{O} &= \begin{bmatrix} \mathbf{C} \\ \mathbf{CA} \\ \mathbf{CA^2} \\ \mathbf{CA^3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0.437 & 0.0322 & 0 & 532.7 \\ -291.2 & -1197.9 & 773.6 & 2.838 \cdot 10^5 \\ -1.231 \cdot 10^7 & 6.923 \cdot 10^6 & -6.466 \cdot 10^6 & 1.512 \cdot 10^8 \end{bmatrix} \\ hodnost\{\mathcal{O}\} &= 4 \ . \end{aligned} \tag{4.7}$$

Systém je tedy plně pozorovatelný a lze pro něj sestavit pozorovatele stavu.

Systém je stabilizovatelný, pokud jsou všechny nestabilní módy systému dosažitelné. Pro každý takový mód systému λ platí rovnice:

$$hodnost[\lambda \mathbf{I} - \mathbf{A} \quad \mathbf{B}] = N \ , \tag{4.8}$$

kde N je řád systému. Pro náš nestabilní mód 532.7 dostáváme:

$$
\begin{aligned}
\mathcal{S} &= [\lambda\mathbf{I} - \mathbf{A} \quad \mathbf{B}] = \begin{bmatrix} 2533 & 2769 & -1769 & 0 & 1000 \\ -10870 & 663 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -7692 & 8225 & 0 & 0 \\ -0.4373 & -0.0322 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
hodnost\{\mathcal{S}\} &= 4 \ . \qquad (4.9)
\end{aligned}
$$

Soustava je tedy pozorovatelná a stabilizovatelná.

K získání diskrétního stavového popisu soustavy využijeme standardní vztahy pro diskretizaci soustavy se synchronním vzorkováním vstupu a výstupu:

$$
\mathbf{M} = e^{\mathbf{A}T_{vz}} \qquad \mathbf{N} = e^{\mathbf{A}T_{vz}} \int_0^{T_{vz}} (e^{\mathbf{A}\tau} \mathrm{d}\tau \mathbf{B}) \ , \qquad (4.10)
$$

kde T_{vz} je vzokovací perioda $T_{vz} = 5 \cdot 10^{-5}$ s. Výstupní matice soustavy zůstávají při transformaci s periodickým vzorkováním nezměněny. Spojitý stavový popis soustavy tak přechází v diskrétní stavový popis, který je:

$$
\begin{aligned}
\mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{M}\mathbf{x}(k) + \mathbf{N}u(k) \\
y(k) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(k) \qquad (4.11)
\end{aligned}
$$

Numerické vyjádření diskrétního lineárního stavového popisu při vzorkovací periodě $T_{vz} = 5 \cdot 10^{-5}$ s je:

$$
\begin{aligned}
\begin{bmatrix} u_{BR}(k+1) \\ I_{BR}(k+1) \\ x_3(k+1) \\ z(k+1) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0.8726 & -0.1154 & 0.06876 & 0 \\ 0.5094 & 0.9602 & 0.02035 & 0 \\ 0.08846 & 0.3142 & 0.6832 & 0 \\ 2.127 \cdot 10^{-5} & 2.54 \cdot 10^{-7} & 8.395 \cdot 10^{-7} & 1.027 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{BR}(k) \\ I_{BR}(k) \\ x_3(k) \\ z(k) \end{bmatrix} + \\
&+ \begin{bmatrix} 0.04702 \\ 0.01304 \\ 0.001539 \\ 5.376 \cdot 10^{-7} \end{bmatrix} \cdot I_w(k) \\
y(k) &= z(k) \quad . \qquad (4.12)
\end{aligned}
$$

Pomocí této krátké analýzy jsme si připravili systém pro návrh optimálního pozorovatele stavu (Kalmanův filtr) a LQ regulátoru.

4.4 Diskrétní PID regulace

V této podkapitole postupně navrhneme P, PI a Lag regulátor pomocí metody geometrického místa kořenů. Vzorkovací perioda všech regulátorů je stanovena cyklem rychlého počítače ve kterém bude regulátor implementován na $T_{vz} = 50\ \mu s$

4.4.1 P regulátor

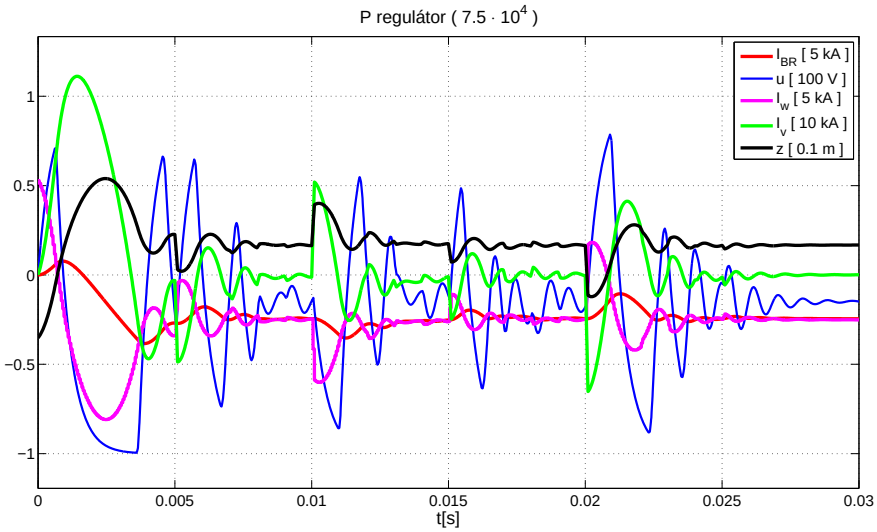
Po exkurzi geometrického místa kořenů přenosové funkce (4.6) zjišťujeme, že soustavu lze stabilizovat a řídit již pomocí P regulátoru. Minimální hodnotu P zesílení lze odvodit přímo z rovnice pro geometrické místo kořenů. Zpětnovazební vyjádření systému lze po úpravě vyjádřit jako:

$$P(z) = \frac{A(z)C(z)P_1(z)P_2(z)}{1 + A(z)P_1(z)(F_i(z) + C(z)P_2(z))} \ . \tag{4.13}$$

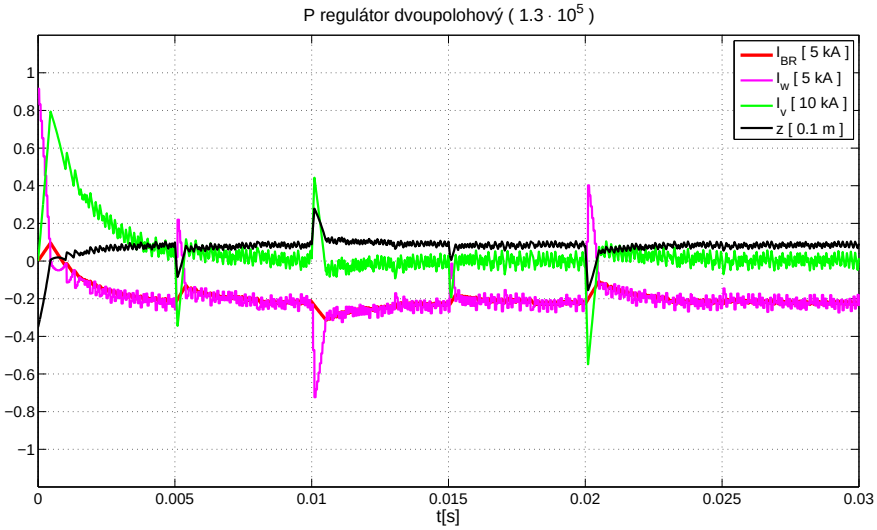
Pokud jmenovatel položíme roven nule, získáváme rovnici geometrického místa kořenů:

$$\begin{aligned} 1 + A(z)P_1(z)F_i(z) + A(z)C(z)P_1(z)P_2(z) &= 0 \\ C(z) &= -\frac{1 + A(z)P_1(z)F_i(z)}{A(z)P_1(z)P_2(z)} \end{aligned} \tag{4.14}$$

Při volbě z=1 (pól na hranici stability) dostáváme pro zadané parametry hodnotu minimálního zesílení C(z)=14544.3 . P regulátor lze v tomto případě seřizovat zkusmo (např. využitím Matlabovské funkce sisotool) nebo pomocí různých integrálních kritérií.
Příkladem tak může být P regulátor s zesílením $k_p = 7.5 \cdot 10^4$. Výsledky simulace pro spojitý a dvoupolohový zesilovač lze vidět na obr. 4.8 a obr. 4.9.



Obrázek 4.8: P regulace soustavy se spojitým zesilovačem.



Obrázek 4.9: P regulace soustavy s dvoupolohovým zesilovačem.

P regulátor nejspíš nebude ideálním regulátorem pro stabilizaci a řízení soustavy. Jeho výhodou je ale jednoduchost a frekvenční nezávislost a díky tomu je vhodný pro prvotní pokusy při seřizování soustavy.

4.4.2 PS regulátor

PS regulátor je diskrétní obdobou spojitého PI regulátoru, který přidává do geometrického místa kořenů sumátor (pól na hranici stability) a jednu nulu. PS regulátor lze v

diskrétní oblasti popsat rovnicí:

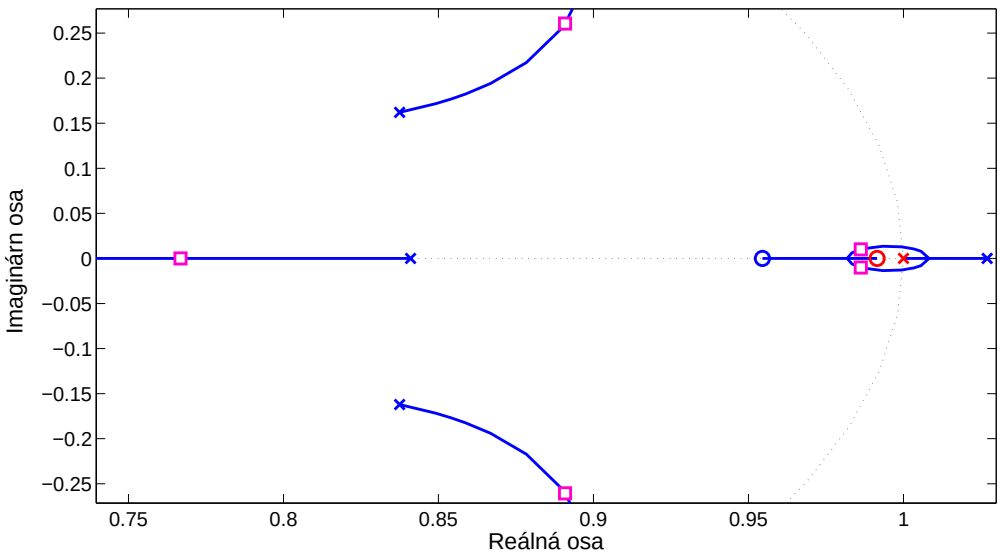
$$u(k) = \beta u(k-1) + k_p e(k) - k_p \alpha e(k-1) \ , \tag{4.15}$$

které odpovídá přenos:

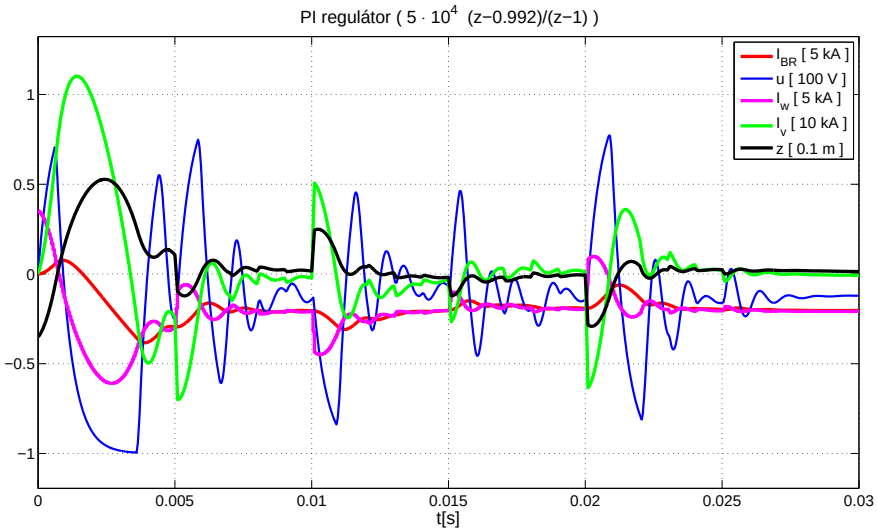
$$\frac{U(z)}{E(z)} = k_p \left(1 + \frac{T_{vz}}{T_i} \frac{1}{(z-1)}\right) \ . \tag{4.16}$$

Pomocí metody geometrického místa kořenů (Matlabovská funkce *sisotool*) lze pro soustavu navrhnout PS regulátor (4.20). Geometrické místo kořenů soustavy s regulátorem ukazuje obr. 4.10, výsledky simulací pro soustavu se spojitým a posléze dvoupolohovým zesilovačem lze vidět na obr. 4.11 a obr. 4.12.

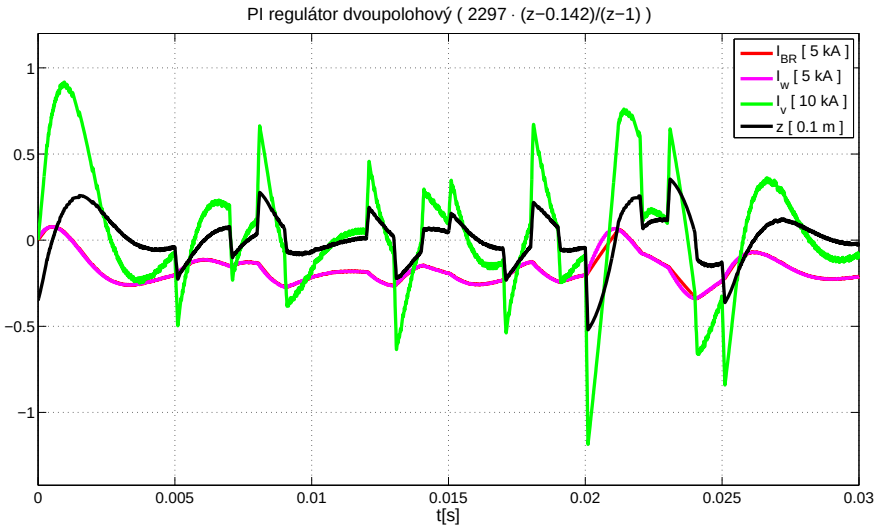
$$PS_{spojity-zes} = 5 \cdot 10^4 \frac{(z-0.992)}{(z-1)} \qquad PS_{dvoupolohovy} = 2.297 \cdot 10^3 \frac{(z-0.142)}{(z-1)} \tag{4.17}$$



Obrázek 4.10: Geometrické místo kořenů soustavy se spojitým zesilovačem.



Obrázek 4.11: PI regulace soustavy se spojitým zesilovačem.



Obrázek 4.12: PI regulace soustavy s dvoupolohovým zesilovačem.

Ze simulací je patrné, že proporcionální zesílení regulátoru není vhodné volit příliš vysoké, jelikož způsobuje spolu s integrační složkou velké kmitání polohy plazmatu. Vhodný interval volby tohoto zesílení je zhruba $< 2 \cdot 10^3, 8 \cdot 10^4 >$.

Při seřizování regulátoru se ukázalo, že v rámci rozsahu akčního zásahu regulátoru není potřeba PI regulátor vybavovat anti-windup obvodem[1]. Pokud je totiž plazmatický slou-

[1]Windup - Integrační složka zesilovače integruje nad saturační meze akčního členu. Díky tomu je po opuštění saturace potřeba další čas na odintegrování, místo aby soustava zareagovala okamžitě a v obvodu dochází k nepříznivému zpoždění.

pec natolik nestabilní, že dochází k saturaci integrační složky regulátoru, je již situace nenávratně ztracena. Čili plazma zanikne nárazem o stěnu dříve, než dojde k saturaci integrační složky regulátoru. Tím se potvrzuje myšlenka, že je lepší mít k dispozici rychlejší BR obvod (menší L_{BR}) i za cenu menšího silového působení tohoto obvodu.
V rámci implementace regulátoru v rychlém řídicím počítači lze problém windupu vyřešit velmi jednoduše. Implementace anti-windup filtru může v jazyce C vypadat např:

```
if (integrator > integrator_max) {
integrator = integrator_max ;
}
elseif (integrator < integrator_min) {
integrator = integrator_min ;
}
```

4.4.3 Lag regulátor

Lag regulátor je aproximací PI regulátoru (jedná se o regulaci s fázovým zpožděním). Do geometrického místa kořenů přidává jednu nulu a jeden pól. Výhodou použití diskrétní Lag regulace je fakt, že nezanáší do soustavy tak velké zpoždění jako PS regulátor. Přenos regulátoru lze vyjádřit:

$$u(k) = \beta u(k-1) + k_p e(k) - k_p \alpha e(k-1) \ , \tag{4.18}$$

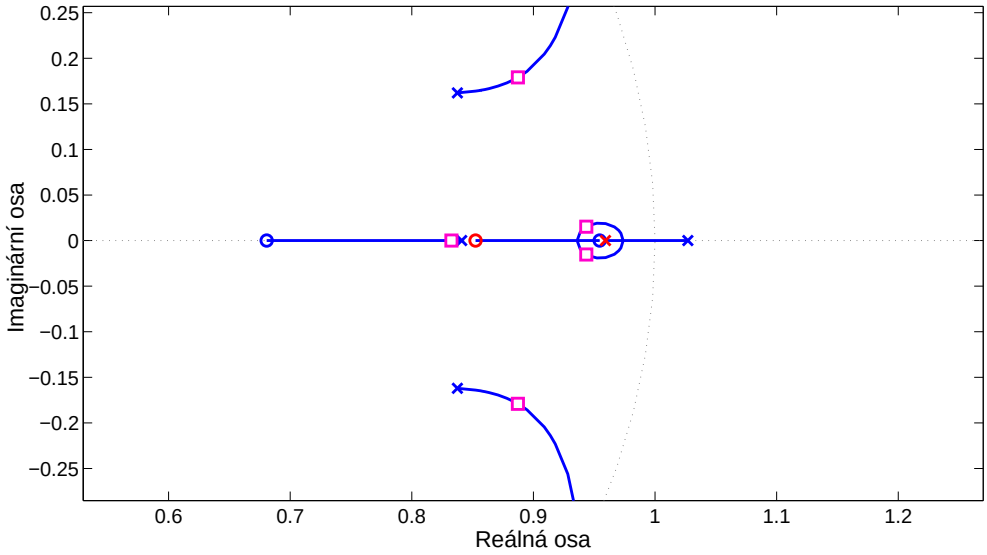
které odpovídá diskrétní přenos:

$$\frac{U(z)}{E(z)} = k_p \left(\frac{(z-\alpha)}{(z-\beta)} \right) \ . \tag{4.19}$$

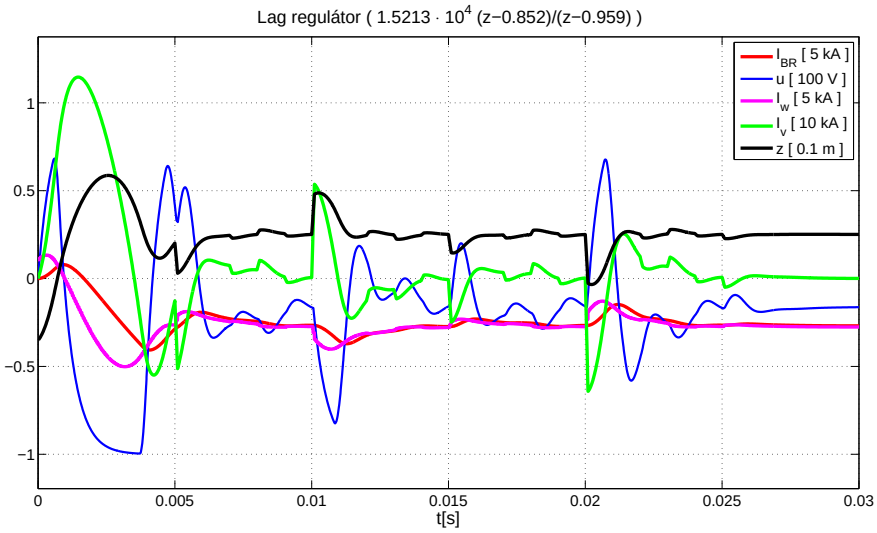
Stejně jako v případě PS regulátoru lze pomocí metody geometrického místa kořenů navrhnout diskrétní Lag regulátory pro obě soustavy:

$$Lag_{spojity-zes} = 1.5213 \cdot 10^4 \frac{(z-0.852)}{(z-0.959)} \qquad Lag_{dvoupolohovy} = 2.379 \cdot 10^3 \frac{(z-0.113)}{(z-0.983)} \tag{4.20}$$

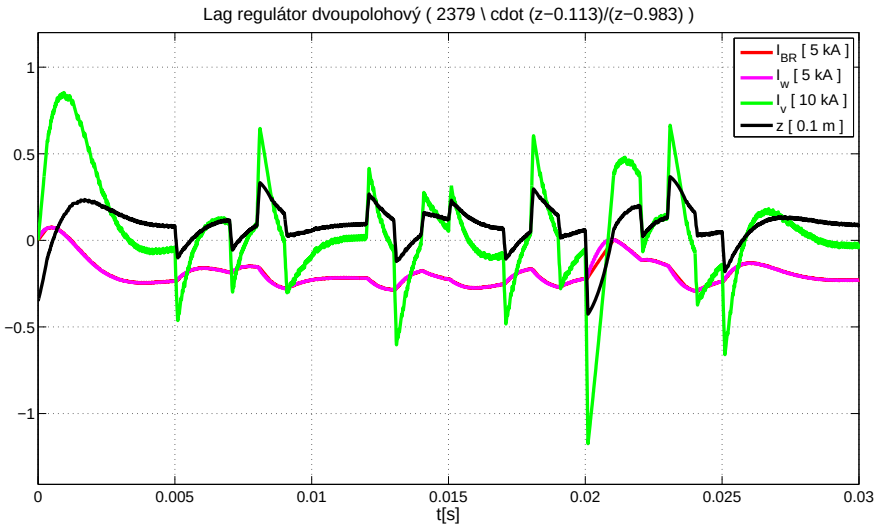
Geometrické místo kořenů pro soustavu se spojitým zesilovačem je na obr. 4.13, výsledky regulací na obou soustavách pak na obr. 4.14 a obr. 4.15.



Obrázek 4.13: Geometrické místo kořenů soustavy se spojitým zesilovačem.



Obrázek 4.14: Lag regulace soustavy se spojitým zesilovačem.



Obrázek 4.15: Lag regulace soustavy s dvoupolohovým zesilovačem.

Z výsledků regulace je patrné, že Lag regulátor je lepší volbou než PS regulátor, avšak nereguluje soustavu s nulovou regulační odchylkou. Tento nedostatek můžeme odstranit vhodnou volbou reference.

4.4.4 Optimalizace parametrů regulátorů

Metod seřizování PID regulátorů existuje mnoho. Následující podkapitola ukazuje další možnosti seřízení regulátoru pomocí lokální a globální metody nastavování regulačních konstant.
Příkladem lokální metody může být metoda pokus-omyl při seřizování PI regulátoru:

1. Zesílení integračního kanálu nastavíme na minimum.
2. Počáteční hodnotu proporcionálního zesílení k_p nastavíme na malou, ale stabilizující hodnotu.
3. Postupně zvyšujeme k_p, až dosáhneme vhodného kompromisu mezi kmitáním výstupu a rychlostí jeho odezvy. Pokud nedojde ke stabilizaci plazmatického sloupce, zvolili jsme příliš malou hodnotu proporcionálního zesílení.
4. Postupně zvyšujeme zesílení integračního kanálu, až dosáhneme vhodného nastavení PI regulátoru.

Pozn.: Při seřizování PI regulátoru pomocí metody pokus-omyl je nutné vybavit integrační složku regulátoru anti-windup obvodem.

Pomocí této metody byl na nelineárním simulinkovém schématu s dvoupolohovým zesilovačem navržen PI regulátor s přenosem $2800 \cdot (z - 0.15)/(z - 1)$ při šesti pokusech se soustavou.

Vyšší metody optimalizace klasických regulátorů se mohou opírat například o globální prohledávání stavového prostoru parametrů regulátoru pomocí minimalizace kriteriální funkce:

$$J(k_p, k_i) = \sum_{k=0}^{N} ([e(k) - e(N)]^2 + \kappa[u(k) - u(N)]^2) \ , \tag{4.21}$$

kde e(k) je regulační odchylka, e(N) ustálená hodnota regulační odchylky, u(k) akční zásah regulátoru a u(N) ustálená hodnota akční veličiny. Vhodnou volbou váhového koeficientu κ lze dosáhnout požadovaného tlumení akčního zásahu.
Kriteriální funkci lze optimalizovat např. pomocí metody simulovaného ochlazování. Takto prováděná optimalizace by byla náročná při jejím nasazení na celý systém. Může dát ale velmi dobré výsledky, pokud jako počáteční hodnotu optimalizovaných konstant zvolíme konstanty již fungujícího regulátoru.

4.5 LQG řízení

Lineární kvadraticky optimální regulátor (dále jen LQ) je obdobou stavového regulátoru. Zásadní rozdíl je v návrhu regulátoru, kdy jsou póly regulátoru umísťovány tak, aby bylo minimální kvadratické kritérium. LQ regulátor má jako vstup vektor stavů soustavy. První kroky tak povedou k návrhu pozorovatele stavu, neboť jediným měřeným stavem naší soustavy je poloha plazmatu.

4.5.1 Kalmanův filtr

Pro plně pozorovatelnou soustavu lze navrhnout pozorovatele stavu několika metodami. Kalmanův filtr je optimální pozorovatel stavu, který odhaduje stav na základě LMS (lineární odhad minimalizující střední kvadratickou chybu) odhadu.

Uvažujme lineární stochastický systém:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{M}\mathbf{x}(k) + \mathbf{N}u(k) + \mathbf{v}(k) \\ y(k) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(k) + \mathbf{D}u(k) + \mathbf{e}(k) \ , \end{aligned} \tag{4.22}$$

kde $\mathbf{v}(k)$ a $\mathbf{e}(k)$ jsou diskrétní bílé posloupnosti s nulovou střední hodnotou a známou kovarianční maticí:

$$\mathcal{E}\left\{ \begin{bmatrix} \mathbf{v}(k_1) \\ \mathbf{e}(k_1) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{v}(k_2) \\ \mathbf{e}(k_2) \end{bmatrix}^T \right\} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q} & 0 \\ 0 & \mathbf{R} \end{bmatrix} \delta(k_1 - k_2) \ , \ \delta(k_1 - k_2) \begin{cases} = 1 \ pro \ k_1 = k_2 \\ = 0 \ pro \ k_1 \neq k_2 \end{cases} . \tag{4.23}$$

V těchto rovnicích značí $\mathbf{v}$ šum procesu a $\mathbf{e}$ šum měření, $\mathbf{Q}$ a $\mathbf{R}$ jsou symetrické pozitivně semidefinitní matice. Ty jsou jedinou, ale velmi důležitou volbou seřizujícího při sestavování Kalmanova filtru. Přibližné hodnoty členů těchto matic lze získat, pokud na vstup našeho modelu přivedeme standardní bílý šum, tj. posloupnost s nulovou střední hodnotou a jednotkovým rozptylem. Jelikož by dělal problém nestabilní pól polohy plazmatu, lze ho ve stavovém popisu nahradit symetrickým pólem (podle meze stability), který bude stabilní. Poté je třeba Kalmanův filtr navrhnout a podle potřeby matice doladit. Tímto postupem dostáváme kovarianční matice pro návrh Kalmanova filtru:

$$\mathbf{Q} = diag[0.01, 0.04, 0.03, 10^{-10}] \quad , \quad \mathbf{R} = 10^{-10} \ . \tag{4.24}$$

Kalmanův filtr je založen na algoritmu generující posloupnost odhadu stavů $\hat{\mathbf{x}}(k\|k)$ a kovariančních matic chyb odhadu :

$$\mathbf{P}(k) = \mathcal{E}\left\{ (\mathbf{x}(k) - \hat{\mathbf{x}}(k))(\mathbf{x}(k) - \hat{\mathbf{x}}(k))^T \right\} \ . \tag{4.25}$$

Odhad stavu $\hat{\mathbf{x}}(k)$ je v každém kroku algoritmu minimalizován kritériem [15]:

$$J_{LMS} = trace\left(\mathcal{E}\left\{\tilde{\mathbf{x}}^T\tilde{\mathbf{x}}\right\}\right) \ , \ \tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}_{LMS} \ , \tag{4.26}$$

přičemž předpokládáme, že hledaná data $\hat{\mathbf{x}}_{LMS}(\mathbf{y})$ jsou pouze afinní funkcí naměřených dat $\mathbf{y}$

$$\hat{\mathbf{x}}_{LMS}(\mathbf{y}) = \mathbf{A}\mathbf{y} + \mathbf{b} \ . \tag{4.27}$$

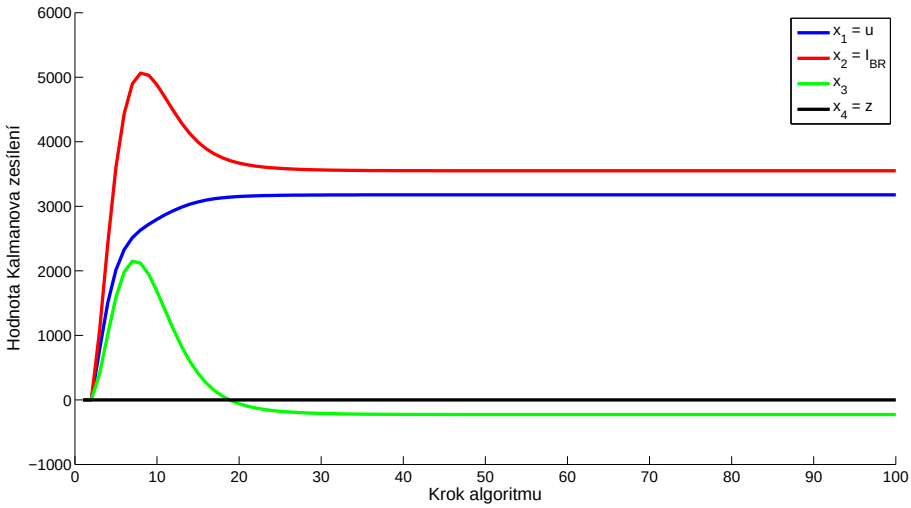
Řešení této úlohy získáme pomocí řešení Riccatiho rovnice ve tvaru:

$$\begin{aligned} \mathbf{P}(k+1) &= \mathbf{M}\mathbf{P}(k)\mathbf{M}^T + \mathbf{Q} - \mathbf{L}(k)(\mathbf{C}\mathbf{P}(k)\mathbf{M}^T) \\ \mathbf{L}(k) &= \mathbf{M}\mathbf{P}(k)\mathbf{C}^T(\mathbf{C}\mathbf{P}(k)\mathbf{C}^T + \mathbf{R})^{-1} \ , \end{aligned} \tag{4.28}$$

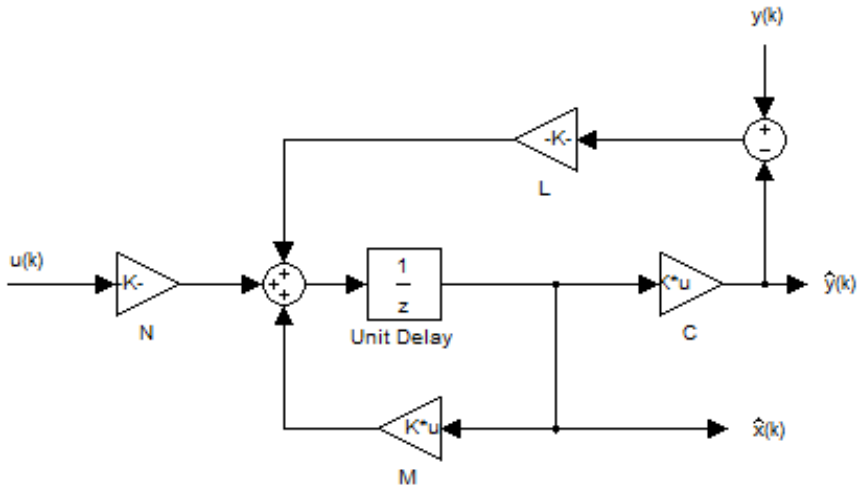
kde $\mathbf{L}(k)$ je Kalmanovo zesílení. Správně bychom měli kovariační matici chyby odhadu $\mathbf{P}(k+1)$ a $\mathbf{P}(k)$ značit $\mathbf{P}(k+1 \mid k)$ a $\mathbf{P}(k \mid k-1)$ neboť se jedná o podmíněné hodnoty. Iterací Riccatiho rovnice dostáváme ustálené řešení - Kalmanovo zesílení $\mathbf{L}$, které lze použít pro časově neproměnný Kalmanův filtr:

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} 3177.9 \\ 3550.7 \\ -226.1 \\ 0.78 \end{bmatrix} . \tag{4.29}$$

Na obr. 4.16 lze vidět průběh řešení Riccatiho rovnice, obr. 4.17 ukazuje Simulinkové schéma kvadraticky optimálního pozorovatele stavu.



Obrázek 4.16: Průběh řešení Riccatiho rovnice.



Obrázek 4.17: SIMULINKové schéma pozorovatele stavu.

4.5.2 LQ regulátor

Velmi podobným způsobem jako v případě optimálního pozorovatele stavu navrhneme i samotný LQ regulátor. Pro lineární diskrétní stabilizovatelný dynamický systém

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{M}\mathbf{x}(k) + \mathbf{N}u(k) \tag{4.30}$$

lze navrhnout optimální LQ regulátor minimalizací kritéria [15]

$$J = \frac{1}{2}\mathbf{x}^T(N)\mathbf{Q}(N)\mathbf{x}(N) + \frac{1}{2}\sum_{k=t_0}^{N-1}[\mathbf{x}^T(k)u^T(k)]\begin{bmatrix} \mathbf{Q}(k) & \mathbf{S}(k) \\ \mathbf{S}^T(k) & \mathbf{R}(k) \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \mathbf{x}(k) \\ u(k) \end{bmatrix} . \tag{4.31}$$

V tomto kritériu značí t_0 počáteční a N koncový čas řešení, matice $\mathbf{Q}$, $\mathbf{S}$ a $\mathbf{R}$ jsou váhové matice, pomocí nichž seřizující určuje výslednou podobu regulátoru. Minimalizace kritéria (4.31) vede stejně jako v případě optimálního pozorovatele na Riccatiho rovnici, kterou je ale v tomto případě potřeba řešit zpětně v čase s koncovou podmínkou $\mathbf{P}(k) = \mathbf{Q}(N)$ dokud se neustálí Kalmanovo zesílení $\mathbf{K}^T(k)$:

$$\begin{aligned} \mathbf{P}(k) &= \mathbf{M}^T\mathbf{P}(k+1)\mathbf{M} + \mathbf{Q} - (\mathbf{M}^T\mathbf{P}(k+1)\mathbf{N})\mathbf{K}^T(k) \\ \mathbf{K}^T(k) &= (\mathbf{N}^T\mathbf{P}(k+1)\mathbf{N} + \mathbf{R})^{-1}\mathbf{N}^T\mathbf{P}(k+1)\mathbf{M} . \end{aligned} \tag{4.32}$$

Výsledkem je ustálené Kalmanovo zesílení $\mathbf{K}$, které použijeme k optimálnímu řízení soustavy :

$$\mathbf{u}^*(k) = -\mathbf{K}^T\mathbf{x}(k) \ . \tag{4.33}$$

Takto navržený LQ regulátor by dokázal plazmatický sloupec stabilizovat. Situaci můžeme vylepšit obohacením stavového popisu soustavy o generátor konstantní reference a sumátor regulačních odchylek. Tím docílíme stavu, kdy bude LQ regulátor asymptoticky sledovat referenční signál.
Do stavového popisu soustavy přidáme generátor konstantní reference dimenze 1 :

$$\begin{aligned} x_{REF}(k+1) &= x_{REF}(k) \\ y_{REF}(k) &= x_{REF}(k) \ , \end{aligned} \tag{4.34}$$

kde x_{REF} je reference $x_{REF} = [z_{REF}]$. Požadavek asymptotického sledování lze splnit přidáním sumátoru regulačních odchylek do kritéria J :

$$\begin{aligned} x_{SUM}(k+1) &= x_{SUM}(k) + \mathbf{C}\mathbf{x}(k) - y_{REF}(k) \\ y_{SUM}(k) &= x_{SUM}(k) \ , \end{aligned} \tag{4.35}$$

kde podobně jako v předchozím případě je prvek x_{SUM} suma regulačních odchylek $x_{SUM} = [z_{SUM}]$.

Rozšířený systém je tedy možné zapsat jako:

$$\mathbf{x}'(k+1) = \begin{bmatrix} \mathbf{M} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ \mathbf{C} & -1 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{x}'(k) + \begin{bmatrix} \mathbf{N} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u(k) \ , \tag{4.36}$$

kde stavový vektor $\mathbf{x}'(k) = [\mathbf{x}^T(k) \quad x_{REF}(k) \quad x_{SUM}(k)]^T$ vznikne rozšířením stavového vektoru původního systému.
Kvadratické kritérium pak přechází na tvar:

$$J' = \frac{1}{2}\mathbf{x}'^T(N)\mathbf{Q}'(N)\mathbf{x}'(N) + \frac{1}{2}\sum_{k=t_0}^{N-1}[\mathbf{x}'^T(k)u^T(k)] \begin{bmatrix} \mathbf{Q}'(k) & \mathbf{S}'(k) \\ \mathbf{S}'^T(k) & \mathbf{R}'(k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}'(k) \\ u(k) \end{bmatrix} \tag{4.37}$$

s rozšířenou váhovou maticí kritéria :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Q}' & \mathbf{S}' \\ \mathbf{S}'^T & \mathbf{R}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{C} & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_y & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{Q}_{SUM} & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{C} & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \ . \tag{4.38}$$

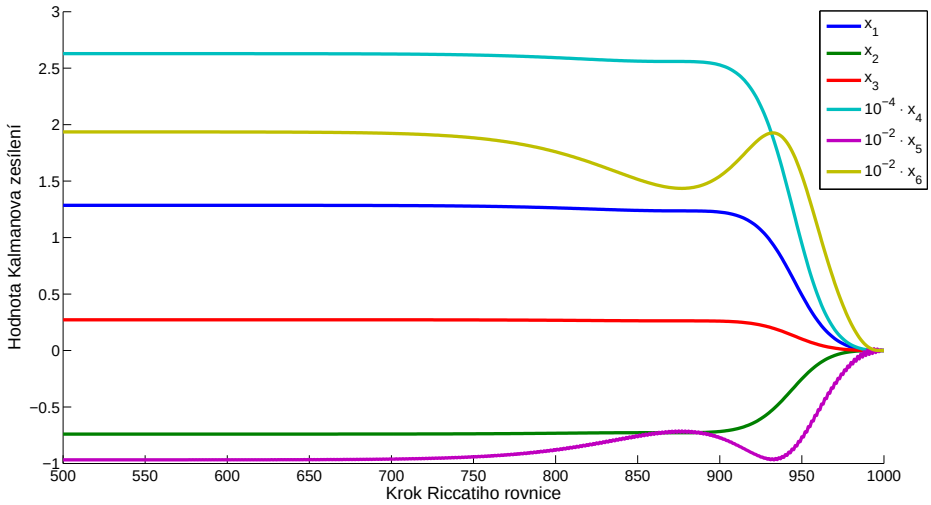
Pro váhové matice:

$$\mathbf{Q}' = \begin{bmatrix} 10^{-4} & 0 \\ 0 & 4 \cdot 10^{-6} \end{bmatrix} \quad \text{a} \quad \mathbf{R}' = 10^{-10} \ , \tag{4.39}$$

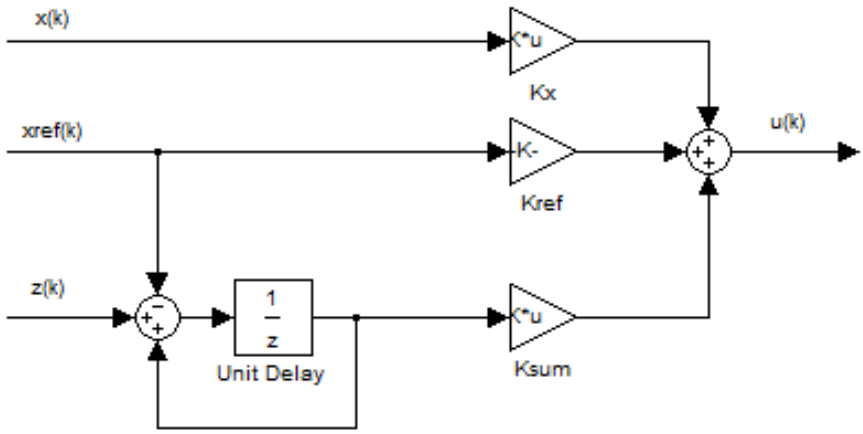
dostáváme řešením Riccatiho rovnice (4.32) zpětně v čase pro rozšířený systém ustálené Kalmanovo zesílení ve tvaru:

$$\mathbf{K}' = [\mathbf{K_x} \ \ \mathbf{K}_{REF} \ \ \mathbf{K}_{SUM}] \, [1.28 \quad -0.74 \quad 0.272 \quad 26285.14 \quad -96.78 \quad 193.57] \ . \tag{4.40}$$

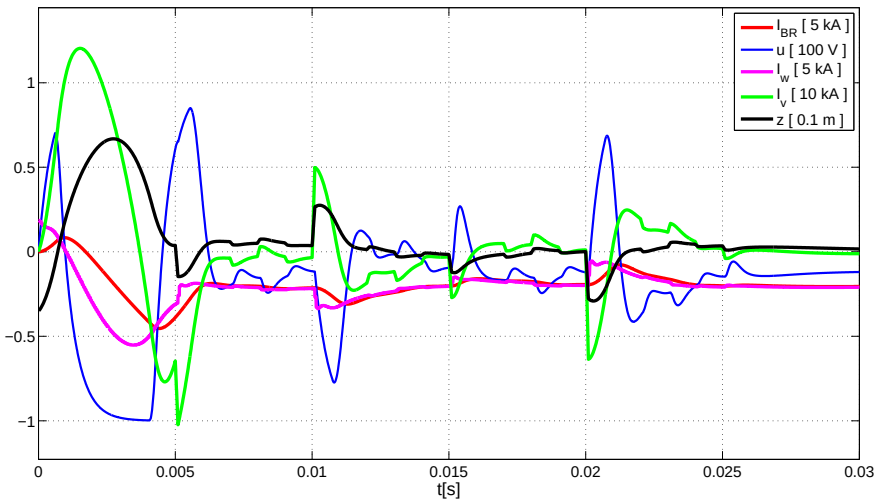
Řešení Riccatiho rovnice je na obr. 4.18, strukturu LQ regulátoru lze vidět na obr. 4.19, výsledky simulace na nelineárním modelu se spojitým zesilovačem pak na obr. 4.20.



Obrázek 4.18: Průběh řešení Riccatiho rovnice pro LQ regulátor.



Obrázek 4.19: SIMULINKové schéma LQ regulátoru s asymptotickým sledováním reference.



Obrázek 4.20: Průběh LQG řízení na nelineárním modelu se spojitým zesilovačem.

4.6 Fuzzy regulátor

Oproti klasickým nebo moderním metodám řízení má fuzzy řízení[2] k seřizování regulátoru zcela odlišný přístup. Namísto seřizování parametrů regulátoru nebo volbě kritéria

[2]Fuzzy řízení bylo „postaveno“ nad fuzzy logikou, která byla zavedena roku 1965 Lotfim Zadehem z Kalifornské univerzity v Berkeley.

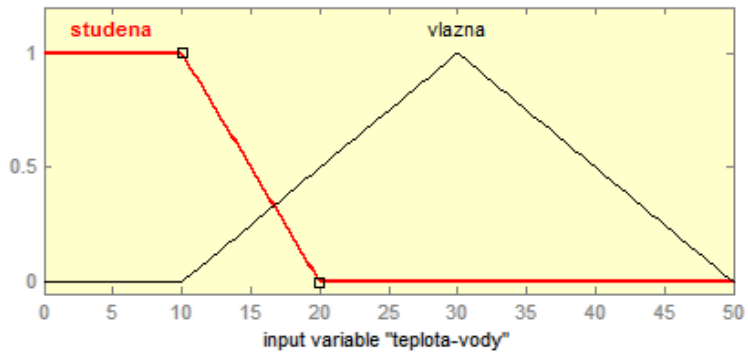
seřizující určuje, jakým způsobem má regulátor chápat své vstupy a výstupy - tzv. funkce příslušnosti a nad nimi staví bázi pravidel, která regulátoru říká, jakým způsobem má interpretovat tyto vstupy ve výstupy. Fuzzy regulace má oproti klasickým přístupům hned několik výhod:

- Fuzzy logika napodobuje „lidský“ popis reality. Seřízení regulátoru je tedy otázkou chápání systému a jakým způsobem by se měl regulátor zachovat v různých případech, které při regulaci nastávají. Fuzzy řízení tak napodobuje experta (fyzika, operátora) tím, že se snaží využít jeho znalostí nabytých při řízení daného procesu.
- Vágní interpretace funkcí příslušnosti dovoluje aplikaci i na silně nelineární systémy.
- V rámci implementace regulátoru se jedná o řídicí algoritmus ve formě „lookup table“. Složitost výpočtu řídicího algoritmu by neměla být o mnoho větší než v případě implementace PID regulátoru.

Četná omezení a nelinearity v soustavě vybízí k možnosti vyzkoušet fuzzy regulátor pro řízení vertikální polohy plazmatu.

4.6.1 Krátký úvod do fuzzy řízení

Fuzzy logika obecně spadá do množiny metod známých jako Soft-Computing. Fuzzy logika rozšiřuje logické operátory na fuzzy množiny. Celá teorie spočívá v zavedení tzv. stupně příslušnosti, který může nabývat hodnot z intervalu <0,1>[3]. Funkce příslušnosti pak v tomto intervalu definuje míru příslušnosti daného prvku k množině. Příkladem může být např. teplota vody - viz obr. 4.21, kdy definujeme stavy vody *studená* a *vlažná* pomocí tzv. L-funkce a Λ-funkce (lineární lomené fce).



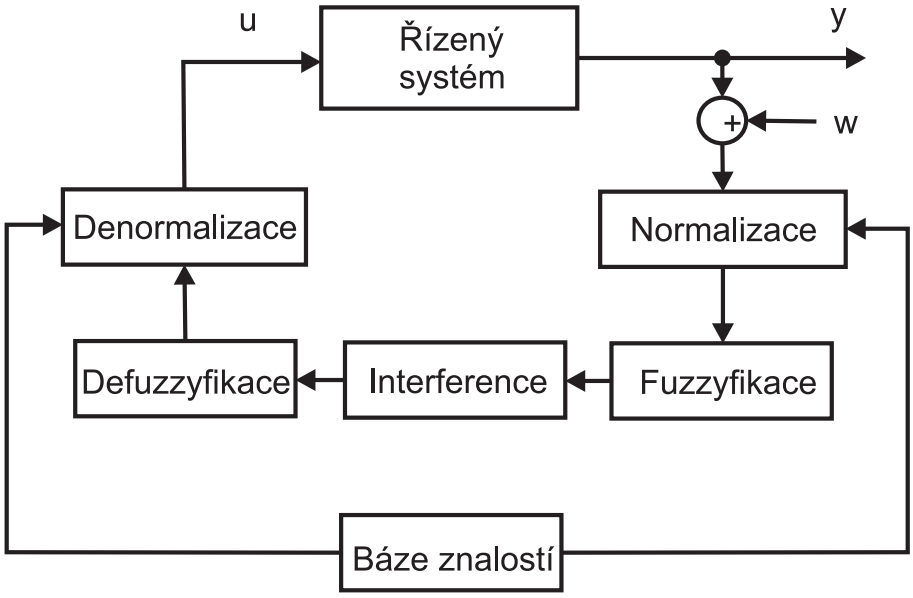
Obrázek 4.21: Ukázka funkce příslušnosti při určení teploty vody.

[3]V klasické teorii množin každý prvek do množiny patří nebo nepatří.

Naměření teploty 15°C indikuje, že teplota vody patří do lingvistické hodnoty *studená* se stupněm příslušnosti 0.5 a do lingvistické hodnoty *vlažná* se stupněm příslušnosti 0.25. Tento proces (přiřazování měřených hodnot vstupních veličin do fuzzy množin pomocí funkcí příslušností) se nazývá fuzzyfikace. Zcela obdobně lze zavést proces defuzzyfikace, tedy přiřazování výstupních hodnot akčních veličin na základě hodnot funkcí příslušností.
Srdcem fuzzy regulátoru jsou pak *interferenční pravidla*, která volí seřizující a která mapují vstupní funkce příslušnosti na výstupní. V rámci řízení a regulace se nejčastěji používají interferenční pravidla ve formě implikace dvou fuzzy výroků :

JESTLIŽE <*fuzzy výrok*> **PAK** <*fuzzy výrok*>.

Celkový proces regulace pomocí fuzzy řízení lze vidět na obr. 4.22. Báze znalostí zde značí celkové znalosti člověka (operátora) o dané problematice. Normalizace a denormalizace pak určuje mapování vstupních a výstupních veličin na nebo z intervalu <0,1>.

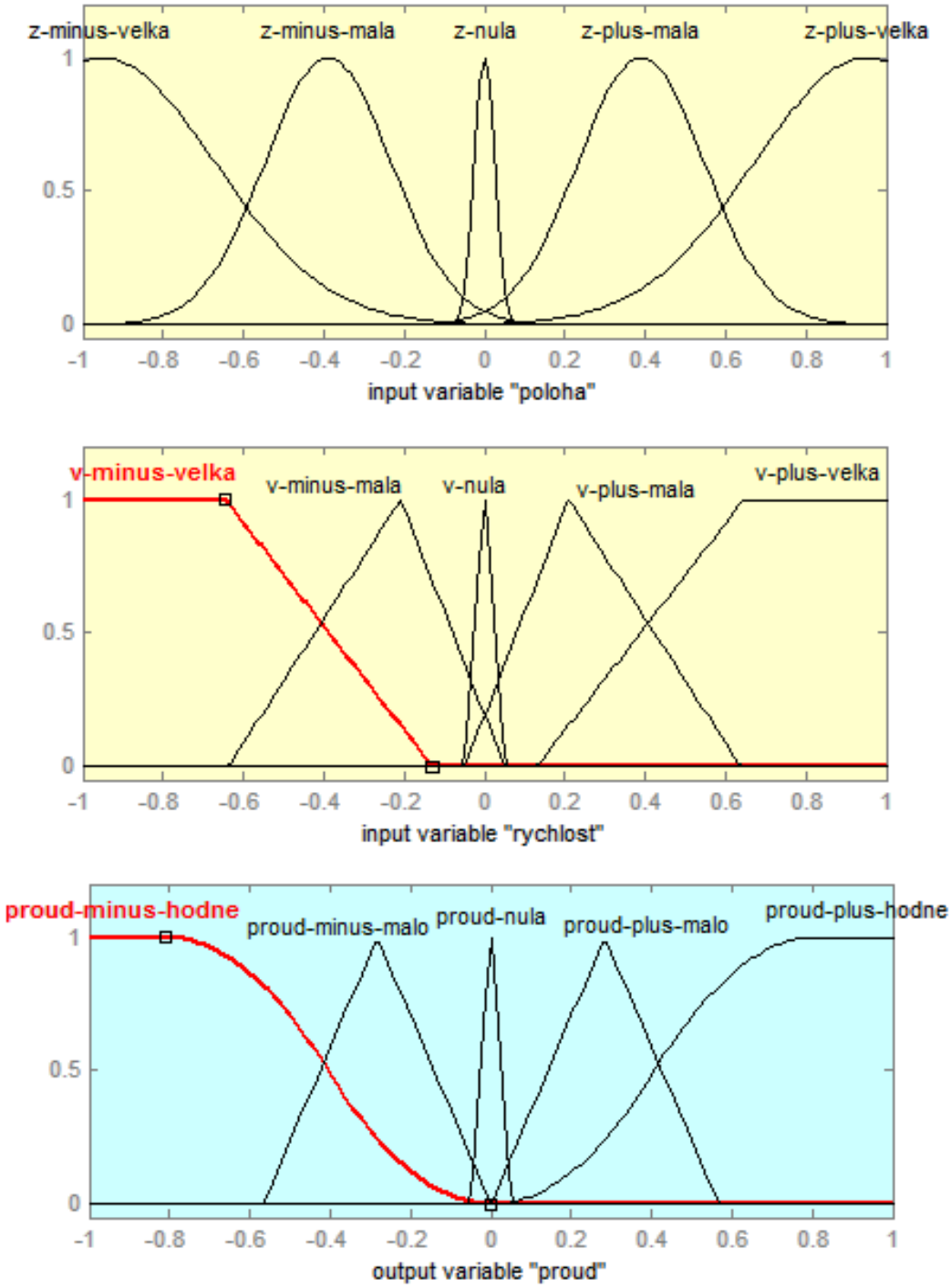


Obrázek 4.22: Celkový proces řízení pomocí fuzzy regulace.

Při návrhu fuzzy regulátoru byl použit Fuzzy Logic Toolbox, který je přímou součástí prostředí Matlab.

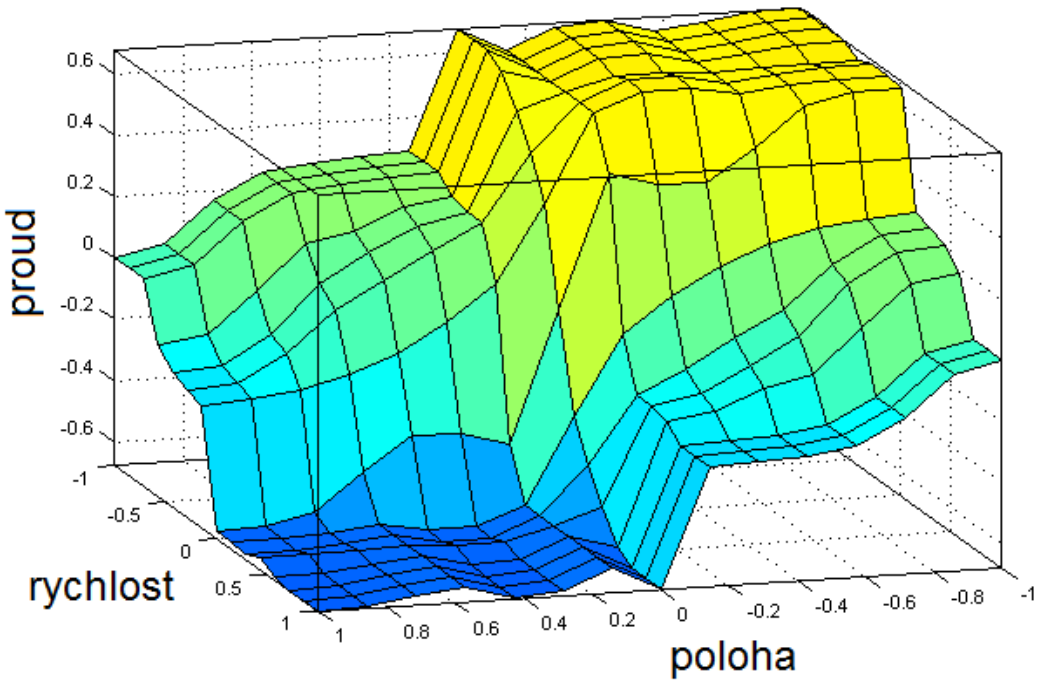
4.6.2 Funkce příslušnosti

Vstupem regulátoru bude poloha plazmatu a jeho rychlost, výstupem pak žádaná hodnota cívkového proudu. Na obr. 4.23 lze vidět funkce příslušnosti jednotlivých vstupů a výstupu.



Obrázek 4.23: Funkce příslušnosti vstupů a výstupu.

Na obr. 4.24 můžeme vidět regulační plochu fuzzy regulátoru.



Obrázek 4.24: Regulační plocha fuzzy regulátoru.

4.6.3 Báze pravidel

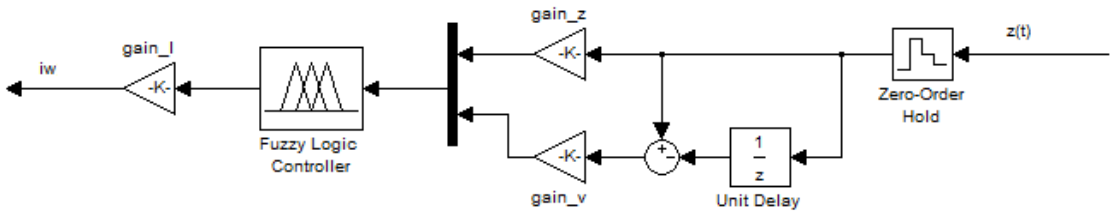
Pravidla regulátoru jsou formulována formou *Jestliže ... potom ...* . Příkladem může být pravidlo: *„Jestliže je poloha plazmatu nulová a jeho rychlost je malá kladná, pak napětí na zesilovači je záporné malé.“* Souhrn všech pravidel fuzzy regulátoru ukazuje tab. 4.1.

Tabulka 4.1: Báze pravidel fuzzy regulátoru

$\frac{dz(t)}{dt}$ \ z(t)	minus-velka	minus-mala	nula	plus-mala	plus-velka
plus-velka	nula	minus-malo	minus-hodne	minus-hodne	minus-hodne
plus-mala	plus-malo	nula	minus-malo	minus-hodne	minus-hodne
nula	plus-hodne	plus-malo	nula	minus-malo	minus-hodne
minus-mala	plus-hodne	plus-hodne	plus-malo	nula	minus-malo
minus-velka	plus-hodne	plus-hodne	plus-hodne	plus-malo	nula

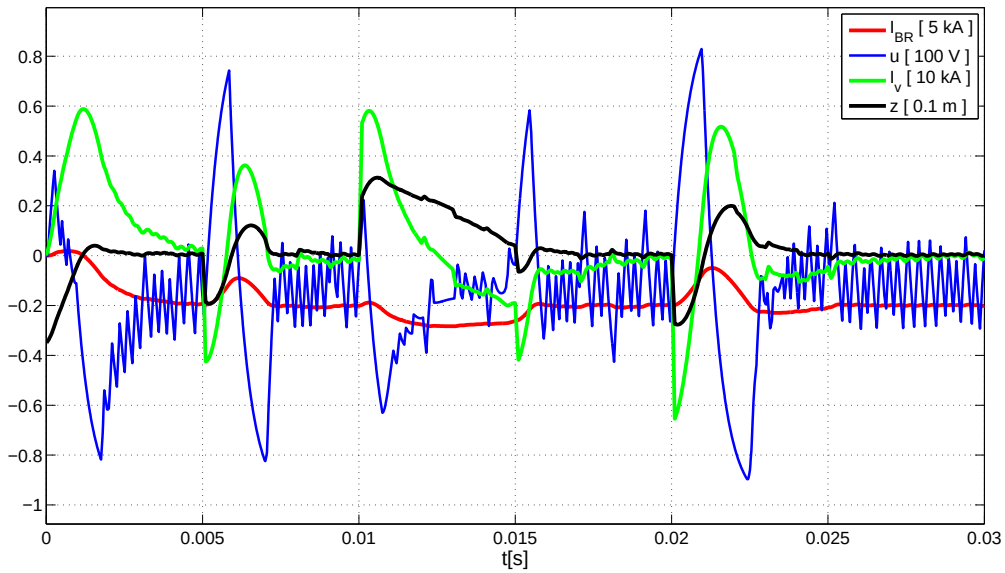
4.6.4 Výsledky regulace

Simulinkové schéma fuzzy PD regulátoru lze vidět na obr. 4.25. Příslušné konstanty zesílení jsou $gain_z = 30$, $gain_v = 400$ a $gain_I = 5 \cdot 10^3$, při vzorkování $T_{vz} = 50\ \mu s$.

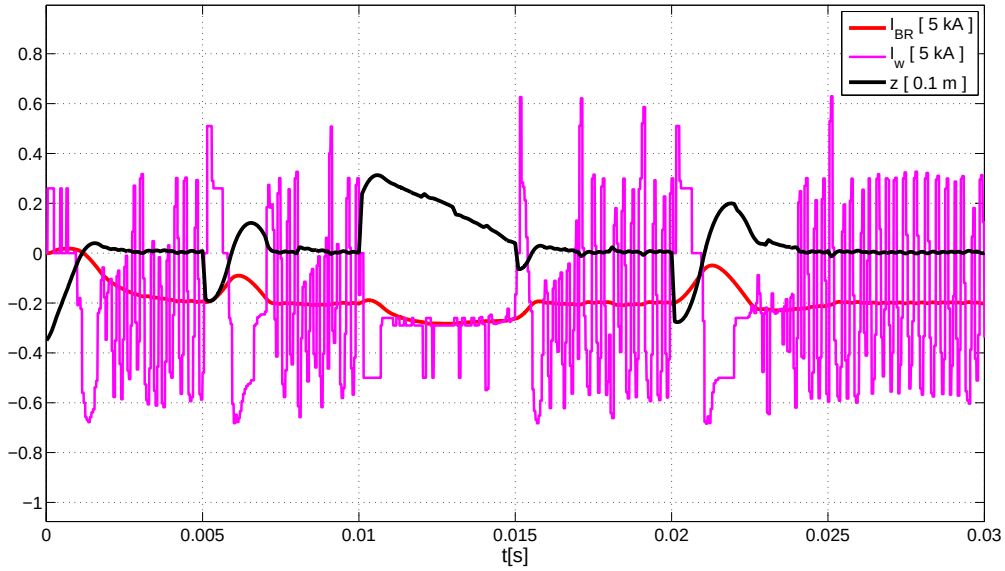


Obrázek 4.25: Struktura fuzzy PD regulátoru.

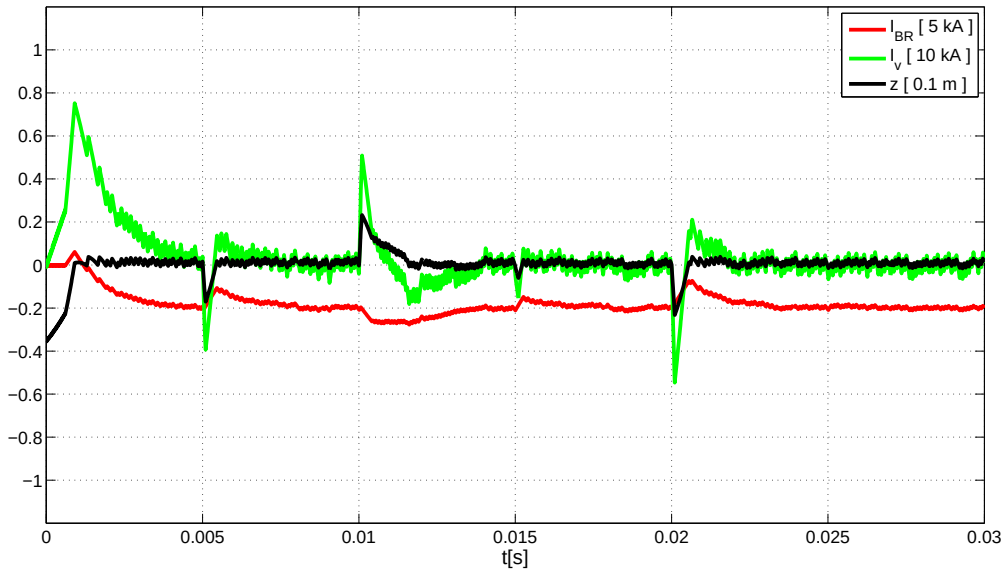
Výsledky regulace při použití regulátoru na nelineární simulinkový model při použití obou modelů zesilovačů lze najít na obr. 4.26 a obr. 4.28.



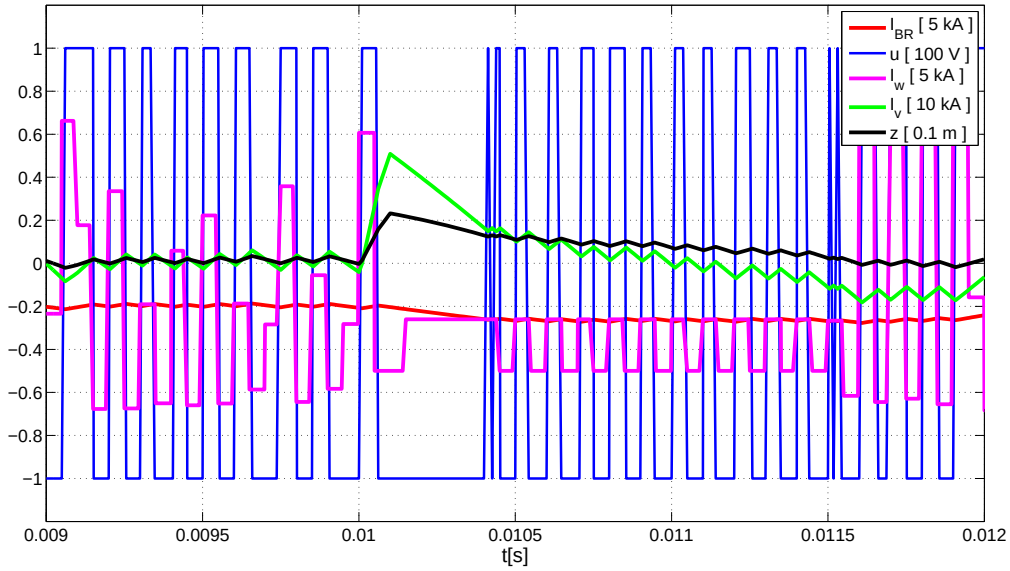
Obrázek 4.26: Výsledky fuzzy regulace při použití spojitého zesilovače.



Obrázek 4.27: Výsledky fuzzy regulace při použití spojitého zesilovače - akční zásah regulátoru.



Obrázek 4.28: Výsledky fuzzy regulace při použití dvoupolohového zesilovače.



Obrázek 4.29: Výsledky fuzzy regulace při použití dvoupolohového zesilovače. (detail)

Z výsledků regulace lze usuzovat, že fuzzy regulátor funguje dobře i při větších poruchách polohy plazmatu. Jedinou překážkou v jeho nasazení tak může být poněkud složitější implementace v jazyku C.

4.7 Úvodní experimenty při sestavování zpětné vazby

Nelze předpokládat, že po sestavení rychlého zesilovače a po zapojení celkového systému zpětnovazebního řízení vertikální polohy plazmatu bude vytvořený model a na něm navržené regulátory přesně odpovídat reálné soustavě. První experimenty s reálnou soustavou musí vést ke sladění modelu s realitou. Vzhledem ke stavbě systému bude výhodné identifikovat systém po částech - nejdříve provést identifikaci napěťového zesilovače spolu s BR obvody, posléze pak systém působení BR obvodů na polohu plazmatu (z/I_{BR}).

K systémům rychlého napěťového zesilovače a BR obvodů lze díky fyzikální analýze najít velmi dobře tvary odpovídajících přenosů či stavového popisu. Je tedy možné volit jednodušší metody identifikace, jako např. vyhodnocování přechodových nebo frekvenčních charakteristik.

Pro stanovení modelu nestabilní soustavy vertikální polohy plazmatu lze využít metod

identifikace pomocí ARX modelu [15] nebo metody vícenásobné integrace popsané v [16] a [17].

V tab. 4.2 můžeme vidět výsledky identifikace přenosu soustavy, která probíhala na nelineárním simulinkovém modelu. Budicím signálem soustavy byl proud zesilovače, výstupem pak poloha plazmatu, která byla zašuměna bílým šumem. Soustava byla identifikována jako přenos prvního řádu s jednou nulou.

Tabulka 4.2: Porovnání identifikace nestabilní soustavy

-	model	Vícenásobná integrace	ARX
nula	-982	-924	-3840
pól	529	533	544

Po sestavení adekvátního modelu soustavy lze pokračovat v návrhu regulátorů v souladu s popsanou metodikou v kapitole č.4.

Kapitola 5

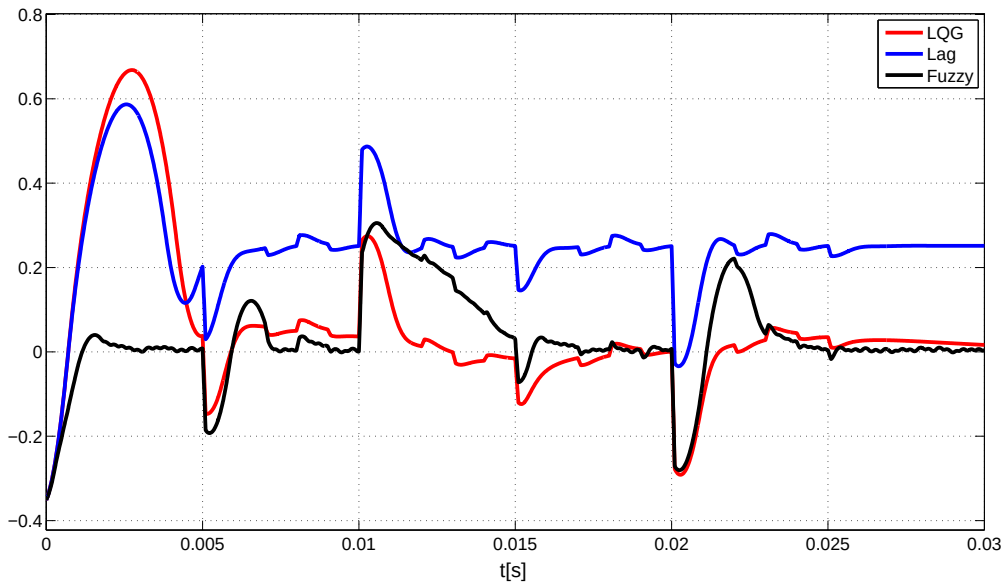
Závěr

V rámci této diplomové práce byl sestaven matematický model systému řízení vertikální polohy plazmatu v tokamaku COMPASS. Tento model vychází z rovnice pro rovnováhu silového působení vnějších poloidálních polí. Po doplnění modelu o děje probíhající v komoře tokamaku byly provedeny úvodní simulace, které prokázaly možnost zjednodušení modelu soustavy - hmotnost plazmatu lze prohlásit za nulovou a tím odstranit nežádoucí kmity soustavy na frekvenci přibližně pětkrát vyšší, než je vzorkovací frekvence měření výstupu.
K řízení vertikální polohy plazmatu je použito rychlého napěťového zesilovače, který se díky vnitřní zpětné vazbě od proudu řídicí cívky chová jako proudový zesilovač. Byly provedeny celkem dva návrhy napěťového zesilovače - spojitý zesilovač a zesilovač s dvoustavovou hodnotou napětí. Vnitřní zpětná vazba spojitého zesilovače byla dále upravena Lead regulátorem, čímž bylo dosaženo šestinásobně rychlejší odezvy výstupu zesilovače při snížení kmitání soustavy. Celkový lineární model soustavy doprovází nelineární Simulinkové schéma, na kterém byly testovány všechny navržené regulátory vnější smyčky.

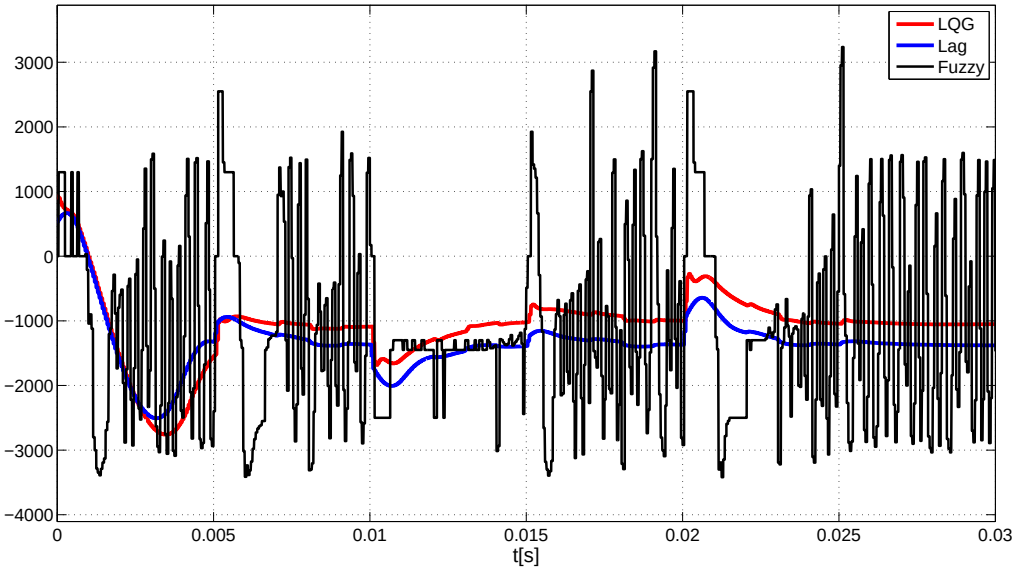
Na lineárním modelu soustavy byly navrženy regulátory pomocí metody geometrického místa kořenů, LQG regulátor a fuzzy regulátor. Výsledky regulace soustavy a akční zásahy vybraných regulátorů lze vidět na obr. 5.1 a obr. 5.2. Referenčním signálem všech regulátorů byla osa tokamaku ($z_{ref} = 0$ m), počáteční hodnota polohy plazmatu pak $z_0 = -0.0352$ m. Vzhledem k rovnovážné poloze polí SFPS a EFPS ($z_{0stab} = -0.0697$ m) se jedná o odezvu na skokovou změnu veličiny.
Nejlépe z regulátorů navržených klasickými metodami dopadl Lag regulátor, který dokázal velmi dobře zvládnout úvodní přechodový děj a posléze i velmi rychle zatlumit poruchy polohy plazmatu. Jeho bezespornou výhodou oproti LQG a fuzzy regulátoru je

též jednoduchost v seřizování a následné implementaci. Jedinou nevýhodou Lag regulátoru zůstává nenulová regulační odchylka, kterou lze odstranit vhodnou volbou reference. Na diskrétním stavovém popisu soustavy byl navržen LQG regulátor. Jelikož je jediným měřeným výstupem soustavy poloha plazmatu, byl pro soustavu navržen Kalmanův filtr, který optimálně odhaduje stavový vektor soustavy. Tento stavový vektor je pak vstupem LQ regulátoru, který byl pro potřeby regulace doplněn o generátor reference a sumátor regulačních odchylek. Díky tomu dokáže LQ regulátor asymptoticky sledovat požadovaný referenční signál. Výsledný LQG regulátor dokázal nejlépe ze všech tří regulátorů řídit nestabilní polohu plazmatu. Počáteční přechodový děj je sice srovnatelný s Lag regulátorem, ale následné tlumení poruch soustavy je nejrychlejší v rámci vybraných regulátorů při vhodné velikosti akčního zásahu.

Pomocí zkušeností získaných při sestavování modelu vertikální polohy plazmatu bylo možno navrhnout fuzzy regulátor. Ten byl navržen ve formě fuzzy PD regulátoru na základě empirických pravidel. Takto navržený regulátor velmi dobře zvládá i větší poruchy polohy plazmatu. Nevýhodou je však delší odeznívání poruchy a velmi vysoké akční zásahy regulátoru. Dalším nedostatkem může být i větší náročnost v rámci implementace fuzzy regulátoru. Jeho velkou výhodou však stále zůstává možnost seřízení na základě reálných zkušeností se soustavou.



Obrázek 5.1: Srovnání kvality regulace vybraných druhů regulátorů.



Obrázek 5.2: Srovnání akčních zásahů vybraných regulátorů.

Porovnáme-li všechny navržené regulátory a všechny výsledky simulací, zjistíme, že nejlépe dokázal soustavu řídit LQG regulátor.
Dále se ukazuje, že pokud chceme plazmatický sloupec stabilizovat v jiné než astabilní poloze (z_{0stab}), je vhodné před počátkem regulace nastavit proud v BR obvodech na takovou hladinu, která vyrovnává destabilizační účinky pole SFPS. Tím zabráníme velkému překmitu při počátečním přechodovém ději. Po stabilizaci lze řídit plazmatický sloupec do požadované polohy například pomocí signálu - rampy ze stejných důvodů.

Díky nedostatečné připravenosti systému zpětnovazebního řízení vertikální polohy plazmatu na Ústavu fyziky plazmatu nebylo možné provést úvodní experimenty se soustavou. Po sestavení celkového systému lze seřizovat regulátory systému pomocí metod navržených v této diplomové práci.

Literatura

[1] J. Wesson. *Tokamaks*. ISBN: 0-19-850922-7. Clarendon Press , Oxford, 2004.

[2] COMPASS team. *Application for Preferential Support for Enabling a programme of ITER relevant plasma studies by transferring and installing COMPASS-D to the Institute of Plasma Physics AS CR, Association EURATOM-IPP.CR. Phase I*. Institute of Plasma Physics, Prague, Czech Republic, Association EURATOM/IPP.CR, 2005.

[3] COMPASS team. *Application for Preferential Support for Enabling a programme of ITER relevant plasma studies by transferring and installing COMPASS-D to the Institute of Plasma Physics AS CR, Association EURATOM-IPP.CR. Phase II*. Institute of Plasma Physics, Prague, Czech Republic, Association EURATOM/IPP.CR, 2006.

[4] R. Beňo, J. John. Modelování zpětnovazebního řízení polohy plazmatu v tokamaku COMPASS. *Československý časopis pro fyziku*, **59**:242–245, 2009.

[5] P. Vyas. *Plasma Vertical Position Control in the COMPASS-D Tokamak*. PhD thesis, University of Oxford, England, 1996.

[6] K. Kamiya, N. Asakura, J. Boedo, and coll. Edge localized modes: recent experimental findings and related issues. **49**:S43–S46, 2007.

[7] Pánek R., O. Bilyková, V. Fuchs, M. Hron, P. Chráska, P. Pavlo, et al. Reinstallation of the COMPASS-D tokamak in IPP ASCR. *Czechoslovak Journal of Physics*, **56**:B125–B137, 2006.

[8] D. F. Valcárcel et al. An ATCA Embedded Data Acquisition and Control System for the Compass tokamak. *Fusion Engineering and Design*, **84**:1901–1904, 2009.

[9] R. Beňo. *Modelovaní systému řízení polohy plazmatu v tokamaku COMPASS*. ČVUT v Praze, Czech Republic, 2008.

[10] J. Horacek, J. Havlicek, D. Varcarcel, R. Beno, V. Weinzettl, F. Janky, M. Hron, R. Panek, I. S. Carvalho, J. Stockel, and O. Kudlacek. Design of plasma position feedback system on tokamak COMPASS, based on basic physics principles. *Fusion Eng. Des.*, **XX**:XX–XX, 2011.

[11] J. Havlicek, J. Horacek, V. Weinzettl, M. Hron, R. Panek, I. Duran, J. Stockel, and O. Hronova. Evaluation of real-time plasma position and vertical magnetics forces on tokamak COMPASS. **XX**:XX–XX, 2011.

[12] J. John, R. Beňo. Modelování regulace vertikální polohy plazmatu v tokamaku COMPASS. *Automa*, **12**:36–40, 2010.

[13] Havlíček J., Horáček J. Modelling of COMPASS tokamak PF coils magnetic fields. *Europhysics Conference Abstracts*, **32D**:P4.080–P4.080., 2008.

[14] F. Janky, J. Havlicek, D. Varcárcel, M. Hron, J. Horacek, O.Kudlacek, R. Panek, and B. B. Carvalho. Determination of the plasma position for its real-time control in the COMPASS tokamak. *Fusion Eng. Des.*, **XX**:XX–XX, 2011.

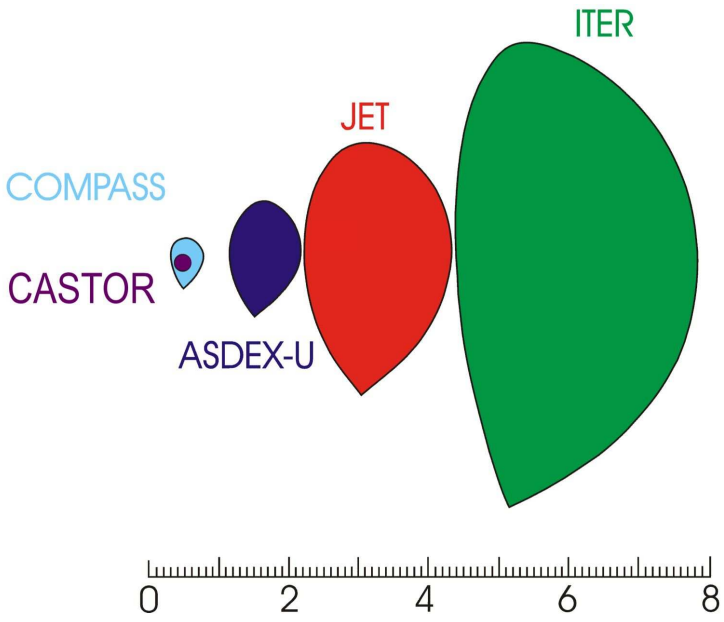
[15] Havlena V. *Moderní teorie řízení.* Nakladatelství ČVUT, Praha, 2006.

[16] J. John. Metoda vícenásobné integrace pro identifikaci nelineárních systémů. http://dce.felk.cvut.cz/sri2/micz/micz.htm.

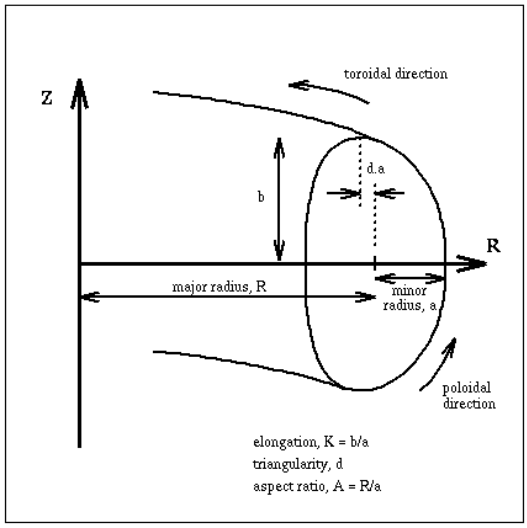
[17] J. John and V. Rauch. Nonlinear continuous system identification by means of multiple integration. *Acta Polytechnica*, **39**:55–62, 1999.

Příloha A

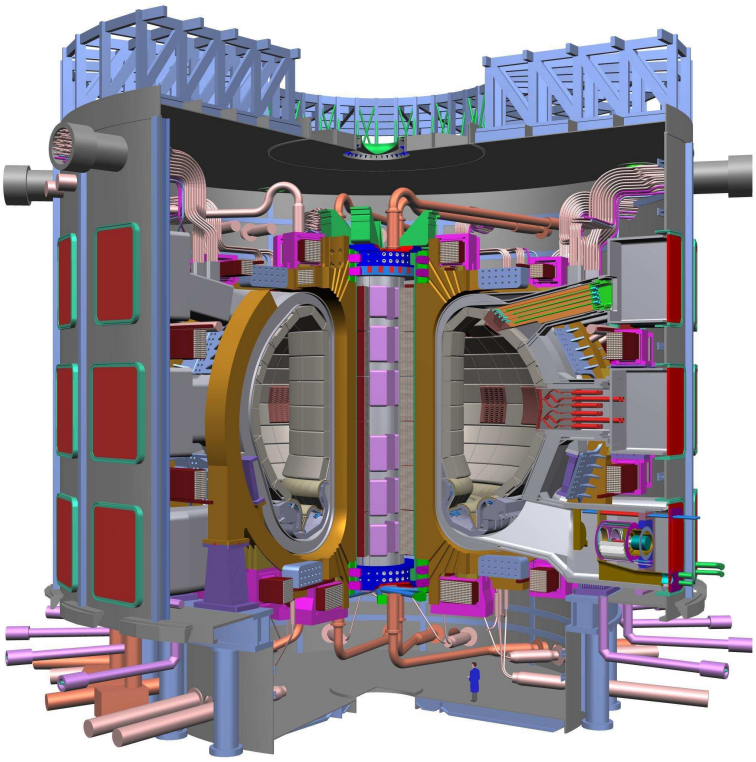
Obrázková příloha diplomové práce



Obrázek A.1: Srovnání velikosti plazmatu v tokamacích s D tvarem komory



Obrázek A.2: Obecná geometrie tokamaku.



Obrázek A.3: Tokamak ITER

Příloha B

Obsah přiloženého CD

K této práci je přiloženo CD, na kterém jsou uloženy zdrojové kódy.

- **DP** : V tomto adresáři je uložena veškerá dokumentace diplomové práce (zdrojové kódy programu LaTeX) včetně obrázků.
- **Matlab** : V tomto adresáři se nachází veškeré zdrojové kódy programu Matlab použité při návrhu regulátorů. Pro načtení konstant modelů a výpočet stavového popisu a přenosových funkcí je potřeba nejdříve spustit soubor `beno.m`. Poté lze pokračovat výběrem Simulinkového modelu. Pro návrh regulátoru LQG je možno použít funkce `stavova.m`.
- **Sri2** : V tomto adresáři jsou uloženy volně přístupné programy, z nichž některé byly použity v této diplomové práci.