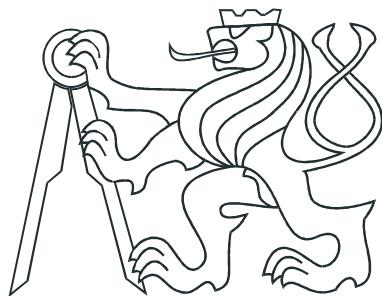


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ŘÍDICÍ TECHNIKY



DIPLOMOVÁ PRÁCE

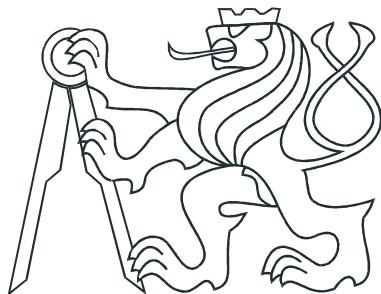
**Řízení technologického procesu
Clausovy jednotky
napájení kondenzátoru síry**

Praha, 2008

Bc. Miloslav Krajl

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ŘÍDICÍ TECHNIKY



**Řízení technologického procesu
Clausovy jednotky
napájení kondenzátoru síry**

Řešitel: Bc. Miloslav Krajl

Vedoucí práce: Doc. Ing. Kateřina Hyniová, CSc

Oponent: Ing. Vladimír Podhola

Diplomová práce v rámci prezenčního magisterského studia
na katedře Řídicí techniky, elektrotechnické fakulty,
Českého vysokého učení technického v Praze.

Studijní obor: MKM01 - Řídicí technika

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v přiloženém seznamu.

V Praze dne _____

podpis

Poděkování

Je mou milou povinností poděkovat lidem, bez nichž by tato diplomová práce nevznikla. Děkuji především vedoucí práce Doc. Ing. Katerině Hyniové, CSc. za cenné rady a konzultace. Dále Ing. Zdeňkovi Hurákovi, Ph.D, Ing. Petrovi Huškovi, Ph.D., a Ing. Jiřímu Roubalovi, Ph.D. za pomoc v oblasti teorii řízení. Společnosti PENTO spol. s r.o, za všeestrannou podporu a konzultace v oboru technologicko-chemickém. V neposlední řadě mé skvělé rodině a přítelkyni za plnou podporu během celého studia. Zvláštní poděkování patří MUDr. Daně Horákové.

Zadání

Abstrakt

Diplomová práce řeší regulaci tlaku vývinu nízkotlaké páry uvnitř kondenzátoru vyžívajícího odpadní teplo z technologického celku Clausovy jednotky. Spalováním Sulfanu stechiometricky potřebným množstvím vzduch vzniká reakční teplo, které je přiváděno na vstup trubkového svazku uvnitř kondenzátoru.

Probíhá ochlazení vstupního regeneračního plynu napájecí vodou a dochází ke kondenzaci reakčních zplodin, které se dále přivádí do katalyckých konvertorů, kde kondenzují na elementární síru. Vlivem předání energie do napájecí vody vzniká nízkotlaká pára, jejíž hodnota tlaku musí převyšovat hodnotu tlaku v závodní síti 250 kPa.

Převýšení tlaku uvnitř kondenzátoru je dosaženo pomocí dvou regulačních smyček hladiny napájecí vody uvnitř kondenzátoru a tlaku nízkotlaké páry, které regulují fuzzy PD regulátory.

Abstract

This master thesis solves a pressure regulation of low-pressure steam inside the waste heat boiler in technological unit of Claus sulfur recovery unit.

Sulphur is burning by stoichiometrical ratio of air a reaction heat that is conducted on the tube bundle entrance inside the boiler. Fall of temperature is in progress and condensation of reactive waste product that are brought into the catalytic converters is happening, where they capsule into element sulfur.

Due to the energy transfer to water supply rise the low-pressure saturated steam, its pressure value must exceed pressure up to 250 kPa.

Pressure exceeding inside the waste product boiler is being accomplished via two regulation loops of water supply inside the low-pressure exhalation boiler that regulates fuzzy PD regulators.

Obsah

Seznam obrázků	VII
Seznam tabulek	IX
Seznam zkratek	X
1 Úvod	1
2 Clausova jednotka	2
2.1 Popis technologického procesu	2
2.2 Technologická realizace	3
2.3 Standardní požadavky na regulaci	5
3 Model systému	6
3.1 Model kondenzátoru	7
3.2 Bilance kondenzátoru	8
3.2.1 Hmotnostní bilance	8
3.2.2 Entalpická bilance	9
3.3 Dynamika změny teploty v kondenzátoru	10
3.4 Vývoj tlaku v kondenzátoru	11
3.5 Vývoj hladiny v kondenzátoru	12
3.6 Nelineární model kondenzátoru	12
3.7 Stanovení provozních podmínek	12
3.7.1 Měrné tepelné kapacity	13
3.7.2 Hustoty médií	15
3.7.3 Tlak nasycené vodní páry	17
3.7.4 Souhrnné provozní podmínky	17
3.7.5 Ustálený stav kondenzátoru	19
3.8 Linearizovaný model	20
4 Fuzzy teorie	23
4.1 Fuzzy regulace	23
4.1.1 Fuzzifikace	24
4.1.2 Báze pravidel	30
4.1.3 Inferenční mechanizmus	30
4.1.4 Defuzzifikace	32

5 Návrh regulátorů	35
5.1 Fuzzy PD regulátor	35
5.2 Použité regulátory typu PD	35
5.2.1 Simulace - nelineární systém	37
5.2.2 Simulace - lineární systém	41
5.3 Srovnání regulátorů pro lineární a nelineární model	45
6 Implementace regulátorů do řídicího systému	47
7 Závěr	48
Literatura	49
Seznam příloh	50
Obsah přiloženého CD	63

Seznam obrázků

1	Blokové schéma Clausova procesu	2
2	Provedení kondenzátoru	3
3	Blokové schéma technologické realizace	4
4	Technologické schéma kondenzátoru Clausovy jednotky	7
5	Schéma modelu kondenzátoru	8
6	Měrná tepelná kapacita napájecí vody	13
7	Měrná tepelná kapacita NT páry	13
8	Měrná tepelná kapacita vstupního regeneračního plynu	14
9	Měrná tepelná kapacita výstupního regeneračního plynu	14
10	Hustota napájecí vody	15
11	Hustota NT páry při konstantní tlaku	15
12	Hustota vstupního regeneračního plynu za stálého tlaku	16
13	Hustota výstupního regeneračního plynu za stálého tlaku	16
14	Vývoj tlaku uvnitř kondenzátoru	17
15	Ustálený stav teplot T_{gi} a T_{go} uvnitř kondenzátoru	19
16	Ustálený stav tlaku p_c a hladiny l_c uvnitř kondenzátoru	19
17	Charakteristická funkce a funkce příslušnosti	23
18	Blokové schéma fuzzy regulátoru	24
19	Funkce příslušnosti $e(t)$ - nelineární model, smyčka tlaku	25
20	Funkce příslušnosti m_{st} - nelineární model, smyčka tlaku	26
21	Funkce příslušnosti $e(t)$ - nelineární model, smyčka hladiny	26
22	Funkce příslušnosti m_{st} - nelineární model, smyčka hladiny	27
23	Funkce příslušnosti $e(t)$ - lineární model, smyčka hladiny	28
24	Funkce příslušnosti $e(t)$ - lineární model, smyčka tlaku	28
25	Funkce příslušnosti $e(t)$ - lineární model, smyčka tlaku	29
26	Funkce příslušnosti m_{st} - lineární model, smyčka tlaku	29
27	Proces inference prostřednictvím Mamdaniho implikace	32
28	Metoda nejvýznamnějšího maxima a metoda těžiště	33
29	Metoda nejvýznamnějšího maxima	34
30	Struktura fuzzy PD regulátoru	35
31	Struktura fuzzy PD regulátoru – nastavování konstant	36
32	Teploty T_{go} a T_{st} , nelineární systém, nejistota vstupu m_{st}	37
33	Tlak p_c , hladina l_c , nelineární systém, nejistota vstupu m_{st}	37
34	Teploty T_{go} a T_{st} , nelineární systém, nejistota vstupu m_{wi}	38

35	Tlak p_c , hladina l_c , nelineární systém, nejistota vstupu m_{wi}	38
36	Teploty T_{go} a T_{st} , nelineární systém, nejistota vstupu m_{st}, m_{wi}	39
37	Tlak p_c , hladina l_c , nelineární systém, nejistota vstupu m_{st}, m_{wi}	39
38	Teploty T_{go} a T_{st} , nelineární systém, nejistota vstupu m_{st}, m_{wi}, T_{gi}	40
39	Tlak p_c , hladina l_c , nelineární systém, nejistota vstupu m_{st}, m_{wi}, T_{gi}	40
40	Teploty T_{go} a T_{st} , lineární systém, nejistota vstupu m_{st}	41
41	Tlak p_c , hladina l_c , lineární systém, nejistota vstupu m_{st}	41
42	Teploty T_{go} a T_{st} , lineární systém, nejistota vstupu m_{wi}	42
43	Tlak p_c , hladina l_c , lineární systém, nejistota vstupu m_{wi}	42
44	Teploty T_{go} a T_{st} , lineární systém, nejistota vstupu m_{st}, m_{wi}	43
45	Tlak p_c , hladina l_c , lineární systém, nejistota vstupu m_{st}, m_{wi}	43
46	Teploty T_{go} a T_{st} , lineární systém, nejistota vstupu m_{st}, m_{wi}, T_{gi}	44
47	Tlak p_c , hladina l_c , lineární systém, nejistota vstupu m_{st}, m_{wi}, T_{gi}	44
48	Srovnání modelů - tlak p_c , hladina l_c , nejistota m_{st}	45
49	Srovnání modelů - tlak p_c , hladina l_c , nejistota m_{wi}	45
50	Srovnání modelů - tlak p_c , hladina l_c , nejistota m_{st}, m_{wi}	46
51	Srovnání modelů - tlak p_c , hladina l_c , nejistota m_{st}, m_{wi}, T_{gi}	46
52	Srovnání pravdivostní funkce a funkce příslušnosti	47
53	Část teplené dynamiky regenečního plynu	51
54	Část teplené dynamiky nízkotlaké páry	52
55	Část teplené dynamiky regenečního plynu	53
56	Část teplené dynamiky regenečního plynu	53
57	Lineární model v ustáleném stavu	54
58	Nejistota na vstupu m_{wi}	55
59	Nejistota na vstupu m_{st}	56
60	Nejistota na vstupu m_{wi} a m_{st}	57
61	Nejistota na vstupu m_{wi} , m_{st} a vliv poruchy T_{gi}	58
62	Nejistota na vstupu m_{wi}	59
63	Nejistota na vstupu m_{st}	60
64	Nejistota na vstupu m_{wi} a m_{st}	61
65	Nejistota na vstupu m_{wi} , m_{st} a vliv poruchy T_{gi}	62

Seznam tabulek

1	Parametry kondenzátoru	17
2	Parametry regeneračního plynu	18
3	Parametry napájecí vody a páry	18
4	Funkce příslušnosti, nelineární model	25
5	Funkce příslušnosti, lineární model	27
6	Produkční pravidla regulátoru	31
7	Konstanty regulátorů pro nelineární systém	36
8	Konstanty regulátorů pro lineární systém	36

Seznam zkratek

Symbol	Význam	Jednotka
Matematicko-fyzikální model		
T_{gi}	vstupní teplota plynu	K
T_{go}	výstupní teplota plynu	K
T_{wi}	vstupní teplota napájecí vody	K
T_{st}	výstupní teplota nízkotlaké páry	K
m_{gi}	hmotnostní průtok vstupního plynu	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$
m_{go}	hmotnostní průtok výstupního plynu	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$
m_{wi}	hmotnostní průtok napájecí vody	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$
m_{wr}	hmotnostní průtok zádrže	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$
m_{st}	hmotnostní průtok nízkotlaké páry	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$
ρ_{gi}	hustota vstupního plynu	$\text{kg}\cdot\text{m}^3$
ρ_{go}	hustota výstupního plynu	$\text{kg}\cdot\text{m}^3$
ρ_{wi}	hustota napájecí vody	$\text{kg}\cdot\text{m}^3$
ρ_{st}	hustota nízkotlaké páry	$\text{kg}\cdot\text{m}^3$
c_{pgi}	měrná tepelná kapacita vstupního plynu	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
c_{pg0}	měrná tepelná kapacita výstupního plynu	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
c_{pwi}	měrná tepelná kapacita napájecí vody	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
c_{pst}	měrná tepelná kapacita nízkotlaké páry	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
C_h	objemová tepelná kapacita trubkového svazku	J
C_c	objemová tepelná kapacita kondenzátoru	J
V_h	objem trubkového svazku	m^3
V_c	objem kondenzátoru	m^3
K_{st}	teplosměnný koeficient	$\text{W}\text{m}^2\cdot\text{m}^2\cdot\text{K}^{-1}$
R	univerzální plynová konstanta	$\text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$
n	počet molů	mol
p_0	počáteční tlak uvnitř kondenzátoru	Pa
p_c	tlak uvnitř kondenzátoru	Pa
Δp	tlaková diference před a za ventilem	Pa

Symbol	Význam	Jednotka
l_0	počáteční hladina uvitř kondenzátoru	m
l_c	hladina uvitř kondenzátoru	m
λ	latenntí teplo při změně fázového skupenství	K
Q_h	tok energie do systému	$J \cdot s^{-1}$
α	teplotní součinitel přestupu tepla	$W m^2 \cdot K^{-1}$
H	entaplie	J
ΔH_{gi}	změna entalpie vstupního regeneračního plynu	J
ΔH_{go}	změna entalpie výstupního regeneračního plynu	J
ΔH_{wi}	změna entalpie napájecí vody	J
ΔH_{st}	změna entalpie nízkotlaké páry	J
Φ_{tr}	tepelný tok přestupu tepla	W
Φ_{wi}	tepelný tok napájecí vody	W
Φ_{st}	tepelný tok nízkotlaké páry	W
U	vnitřní energie	J
S	teplosměnná plocha	m^2
S_c	plocha vodní hladiny v kondenzátoru	m^2
K_v	konstanta ventilu (průtočný součinitel)	$m^3 \cdot h^{-1}$
z	zdvih ventilu	-
ΔV_{wi}	změna objemu napájecí vody v kondenzátoru	m^3

Poznámka: V modelu je počítáno s tepelnou jednotkou [K], výstup je pro názornost přepočten na [°C].

Stavový popis

A, B, C, D	stavové matice
Ā, Ě, Č, Ď	stavové matice odchylkového modelu
k	čas (diskrétní)
t	čas (spojitý)
u, x, y, z	vektor vstupní, stavový, výstupní, porucha

Symbol	Význam	Jednotka
--------	--------	----------

Fuzzy řízení

μ	funkce příslušnosti
α_k	stupeň příslušnosti k-tého termu
$e(t)$	regulační odchylka
$de(t)$	změna odchylky
$du(t)$	přírůstek akční veličiny
P	počet pravidel
f	průběh funkce příslušnosti příslušné plochy

1 Úvod

Diplomová práce řeší regulaci tlaku nízkotlaké páry uvnitř kondenzátoru využívající odpadní teplo z technologického celku Clausovy jednotky. Zde probíhá Clausův proces, kdy je do spalovací pece přiváděn regenerační plyn s obsahem oxidem uhličitého, sulfanu a malého množství uhlovodíků. Sulfan je zde spalován při optimálně, stechiometricky potřebném množství vzduchu. Vzniká reakční teplo, které je přiváděno na vstup trubkového svazku umístěného uvnitř kondenzátoru. Ochlazení probíhá napájecí vodou, která je regulována na požadované parametry. Reakční zplodiny kondenzují a přivádí se do katalytických konvertorů, kde při teplotě přibližně 250 °C reaguje H₂S a SO₂ na elementární síru.

Kondenzátor, jak již bylo zmíněno, je napájen napájecí vodou, které je prostřednictvím teplosměnné plochy trubkového svazku předána energie a vzniká nízkotlaká pára, odváděná do nízkotlaké sítě závodu.

Obecně má nízkotlaká pára svou nominální hodnotu. Aby ji bylo možné dodávat do závodní sítě, musí regulace zajistit, aby byl tlak uvnitř kondenzátoru vyšší než je tlak v závodní síti. Zajištění nastavení regulačních smyček, splňující tento požadavek je předmětem této diplomové práce.

Pro tento účel jsem vytvořil zjednodušený matematicko-fyzikální model kondenzátoru demonstrující dynamické chování systému. Výpočet všech parametrů uvedených v diferenciálních rovnicích resp. modelu byly určeny na základě reálných podkladů. Po otestování základních vlastností modelu, přistoupím k syntéze regulačních obvodů a provedu potřebné simulace. Výsledky práce jsou prezentovány simulacemi regulačních smyček v kapitolách 5.2.2, 5.2.1 a 5.3.

K výpočtům a simulacím jsem použil program *Matlab* verze R2007b společnosti *MathWorks*. Práce je napsána v typografickém systému L^AT_EX.

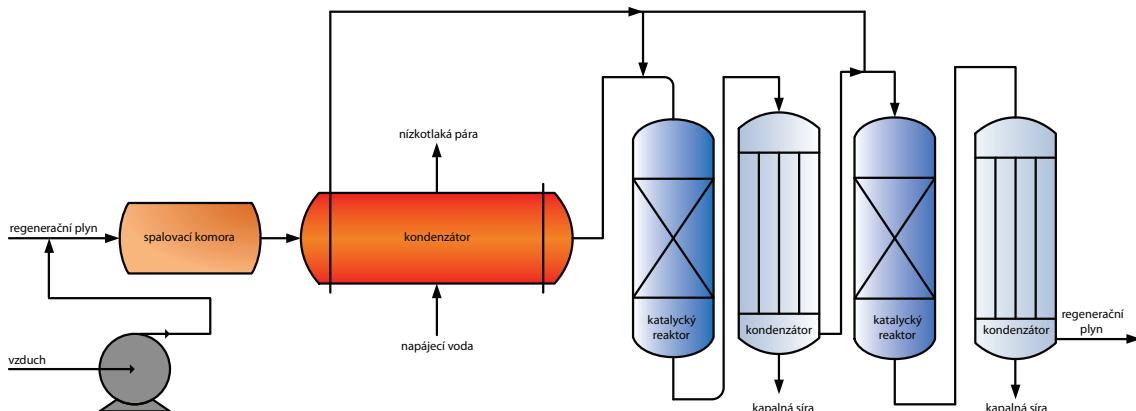
2 Clausova jednotka

Clausovou jednotkou se rozumí technologický proces, při kterém dochází k odsiřování regeneračního (kyselého) plynu, před emisí do ovzduší. Je explicitně svázána s chemickými provozy zpracovávající ropu a zemní plyn, jelikož sulfan je obsažen v řadě technických plynů (rafinérský, koksárenský, atd.). Již roku 1880 vytvořil chemik Carl Friedrich Claus [2] práci, která byla předložena patentovému úřadu v Anglii a roku 1883 patentována. Obsahem této převratné metody je chemická reakce, při které plynný sulfan konvertuje na elementární síru dle následujících reakcí [1]:



2.1 Popis technologického procesu

Na následujícím obrázku je naznačeno blokové schéma vícestupňového Clausova procesu:



Obrázek 1: Blokové schéma Clausova procesu

Clausův proces [1] můžeme rozdělit na dva kroky:

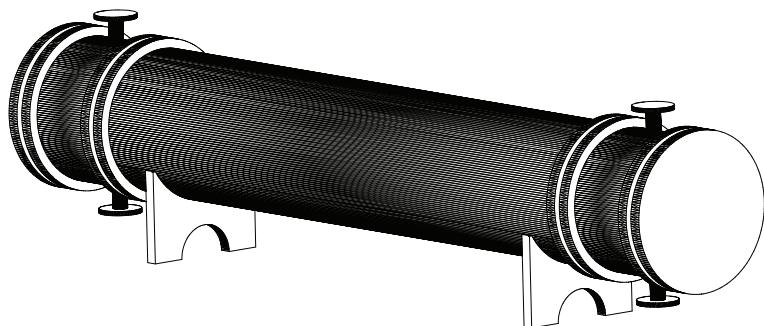
Teplený – V tepelném kroku vstupuje regenerační plyn obsahující sulfan, oxid uhličitý, a malé množství uhlovodíků do spalovací pece, ve které je spalován s jednou třetinou stechiometricky potřeného množství vzduchu při teplotě okolo $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ za vzniku reakčních zplodin. Odtud jsou odváděny zplodiny na vstup trubkového svazku umístěného v kondenzátoru, kam je přiváděna voda přesně definované jakosti a tlaku – napájecí voda. Prostřednictvím přivádění tepla přes teplosměnnou plochu dochází k fázové změně skupenství napájecí vody v nízkotlakou páru a ochlazení reakčních zplodin, obsahující síru ve formě H_2S a SO_2 . Menší část zplodin kondenzuje v kondenzátoru na elementární síru.

Katalycký – Zbytek zplodin vstupuje do katalyckých konvertorů. Zde vzniká při teplotě cca $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ reakcí H_2S a SO_2 elementární síra. Konvertory jsou reaktory obsahující katalycké lože s katalyzátorem – nejčastěji se používá oxid hlinitý. Za konvertor je do série řazen sekundární kondenzátor, ve kterém probíhá odloučení kapalné síry. V této konfiguraci dochází k přibližně 85% konverze kapalné síry, proto se do série řadí další stupeň (konvertor – kondenzátor) ve kterém je celková konverze již 95%.

Při optimálním Clausově procesu musí být udrženy teploty výstupů médií ve fázi konverze nad rosným bodem síry cca. $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ a ve fázi kondenzace nad cca. $135\text{ }^{\circ}\text{C}$, aby nedocházelo k přeměně skupenské fáze na tuhou část.

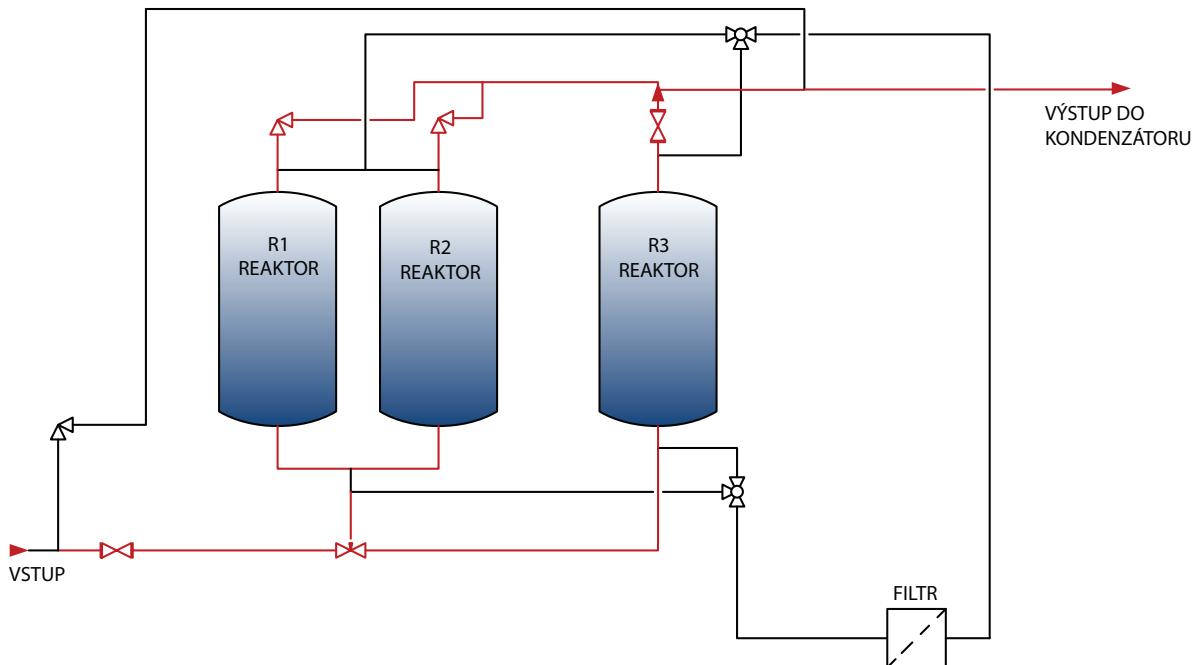
2.2 Technologická realizace

Clausův proces probíhá v párových reaktorech, ve kterých se periodicky střídají cykly: *absorbce*, *desorbce*, *přechlazení* a *dochlazení lože*. Na následujícím obrázku 2 je uvedené provedení kondenzátoru.



Obrázek 2: Provedení kondenzátoru

Jednotka, pro kterou jsem dostal podklady, pracuje dle následujícího blokového schématu



Obrázek 3: Blokové schéma technologické realizace

Cykly probíhající v reaktoru:

Absorpce – během absorpce vstupuje do reaktorů R1 a R2 regenerační plyn. Nastává Clausův proces a dochází k absorpci síry. Teplota regeneračního plynu na výstupu se postupně snižuje.

Desorpce – během desorpce v reaktoru R3 odchází z reaktoru kapalná síra. Poté následuje fáze předchlazení, kdy je použit regenerační plyn pro ochlazení katalytického lože. V závěrečné fázi dochlazení je přiváděn procesní plyn vystupující z reaktoru. Fyzikální vlastnosti tohoto plynu jsou prakticky shodné s fyzikálním vlastnostmi regeneračního plynu.

Obě fáze trvají stejný časový interval. Po ukončení jednoho cyklu dojde k výměně funkce reaktorů.

2.3 Standardní požadavky na regulaci

Ve standardní konfiguraci regulačních smyček je problém převýšení tlaku a stabilizace na nominální hodnotě uvnitř kondenzátoru řešen následovně. Napájecí voda je regulována kaskádním řazením dvou regulačních ventilů na vstupu do kondenzátoru a jednoho regulačního ventila na výstupu regulujícího nízkotlakou páru

- RV1 – regulační obvod reguluje tlak v přívodu napájecí vody na konstantní hladinu,
- RV2 – regulační obvod reguluje hladinu v kondenzátoru na žádanou hladinu,
- RV3 – regulační obvod reguluje množství vyvinuté páry v závislosti na změřeném diferenčním tlaku.

Teplota regeneračního plynu vstupujícího do trubkového svazku uvnitř kondenzátoru se mění v dynamickém rozsahu (320°C - 220°C). Napájecí voda má v síti ustálené parametry (97°C - 105°C) při (2,8 MPa - 3,6 MPa). Proto je nutné zajistit, aby při nižších teplotách vstupního plynu nedošlo k poklesu tlaku uvnitř kondenzátoru pod kritickou hranici 250 kPa odpovídající 127°C nasycené páry. Tím by nastala nežádoucí situace, kdy by došlo k vyrovnání tlaků a v horším případě by došlo k nestabilitě celého procesu.

3 Model systému

Při hledání matematického modelu popisující dynamiku kondenzátoru je možné postupovat několika způsoby. Dříve než jsem přistoupil k samotné tvorbě modelu, provedl jsem rešerší dostupných metod. Jako vhodná metoda by se zdála identifikace systému. Problém ale nastává ve skutečnosti, že systém je v provozu a odstávka za účelem identifikačního experimentu není reálná. Dále klasické metody identifikace tzv. *step-testy*, se zde nedají použít s ohledem na bezpečnost provozu. Díky vícerozměrnosti systému, by mohlo dojít ke kritické situaci a nestabilitě reaktoru.

Jedno z možných řešení prezentuje [10] pomocí identifikace v uzavřené smyčce prostřednictvím tzv. *sub-space metod* [12]. Tato metoda je pomocí algoritmů schopná identifikovat systém zatížený regulací ale i zde jsou jistá omezení. Hlavní faktor zde sehrává kvalita regulačního pochodu resp. seřízení regulačních smyček. Pokud se jedná jen o velmi malé změny a malé akční zásahy, je tato metoda málo přesná. Není tedy příliš vhodná pro málo buzené systémy. Ve stávající konfiguraci bohužel tuto metodu nemohu použít, jelikož v systému se vyskytnul problém s výstupní regulací tlaku, kdy výstupní regulační smyčka je rozpojena a ventil je manuálně plně otevřen. Upuštěním od identifikačních metod jsem přistoupil k tradičním metodám matematického modelování pomocí diferenciálních rovnic.

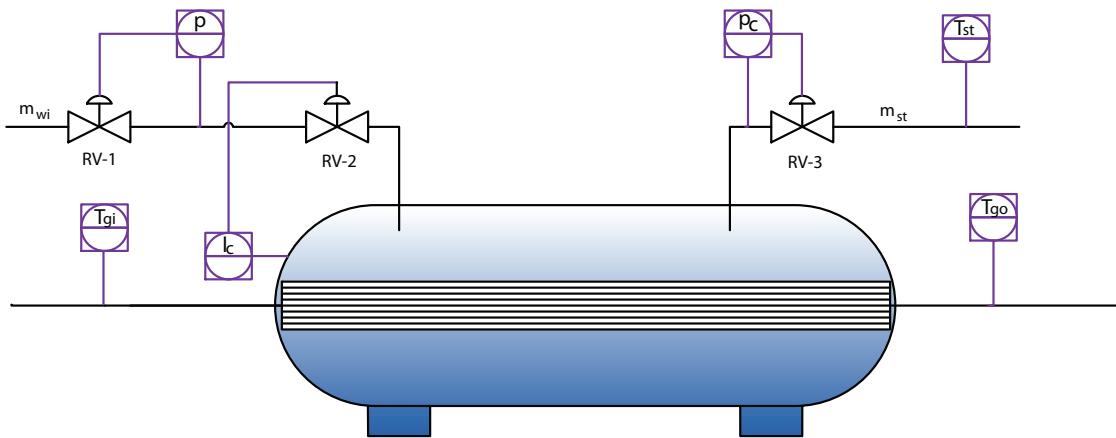
Na internetu např. [11] jsou dostupné chemické modely popisující termodynamické a kinetické změny. Složitost těchto modelů je pro potřeby regulace nadbytečná (parciální diferenciální rovnice) a zjednodušení modelu by při nejmenším vyžadovalo více práce než vytvořit vlastní model. Model popisující základní dynamiku pro potřeby regulace je možné sestavit na základě termodynamických zákonů. Názorné příklady jsou uvedeny v publikaci [5]. Způsobů jak převést dynamiku systému do diferenciálních rovnic je více. Například metoda výkonových grafů [8].

Pro můj model kondenzátoru jsem zvolil metodu vycházející ze základních *energetických bilancí*¹ [4] a [5] popisujících teplenou dynamiku procesu. Vývoj tlaku uvnitř kondenzátoru [6] je založen na úpravě *stavové rovnice* a pro vývoj hladiny je použito *rozdílu objemových průtoků* [5].

¹Energetické bilance je často v literatuře nazývána jako Entalpicá bilance, jelikož jednotlivé členy v bilanci jsou dány součinem entalpie a hmotnostního průtoku.

3.1 Model kondenzátoru

Při tvorbě modelu hraje klíčovou roli určení základních parametrů systému a to počet řídicích veličin (vstupů), externích poruchových veličin (poruch) a řízených veličin (výstupů). Poté je možné začít s návrhem modelu. Na následujícím obrázku 4 je uvedeno zjednodušené technologické schéma kondenzátoru.



Obrázek 4: Technologické schéma kondenzátoru Clausovy jednotky

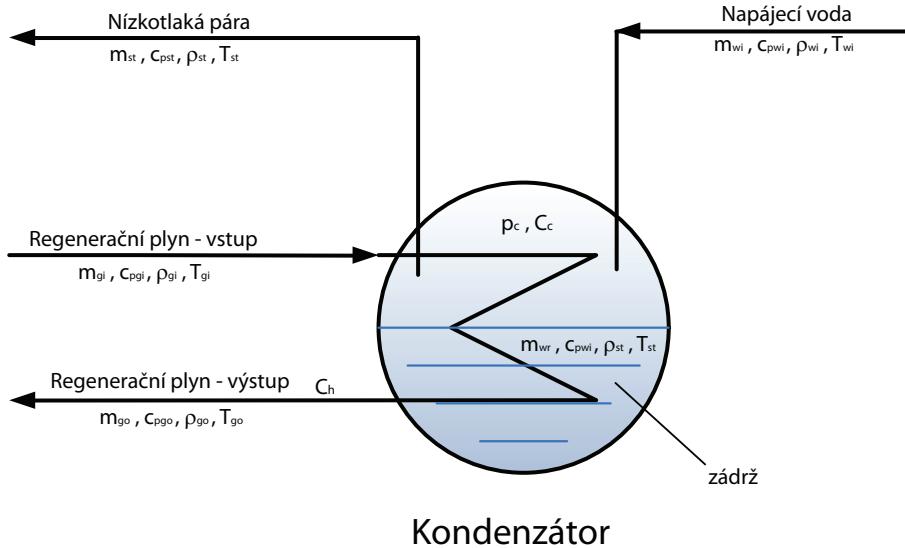
Nyní je nutné si zvolit parametry modelu:

- Řiditelné veličiny (vstupy) – m_{wi}, m_{st}
- Externí poruchové veličiny – T_{gi}
- Řízené veličiny (výstupy) – p_c, l_c
- Stavy systému - T_{go}, T_{st}, p_c, l_c

Nyní je již možné psát bilanční rovnice, abychom získali poměry vstupních a výstupních proudů systému. Proudem se rozumí tok (energie, hmoty) do systému.

3.2 Bilance kondenzátoru

Bilanční rovnice je možné napsat v ustáleném stavu, kdy nedochází k akumulaci energie a hmoty. Na následujícím obrázku jsou uvedeny vstupní a výstupní proudy



Obrázek 5: Schéma modelu kondenzátoru

Nyní již lze přistoupit k samotnému sestavení důležitých bilančních rovnic.

3.2.1 Hmotnostní bilance

Udává vztah mezi proudy vstupujících do procesu resp. vystupujících z procesu. Obecně je možné zapsat jako:

$$množství hmoty vstupující - množství hmoty vystupující = akumulované množství$$

Celková hmotová bilance uvnitř kondenzátoru

$$m_{wi} = m_{st} + m_{wr}. \quad (3)$$

Hmotostní průtok napájecí vody je tedy roven hmotostnímu průtoku nízkotlaké páry vzniklé fázovou přeměnou a současně hmotostnímu průtoku zádrže napájecí vody, která je ovšem v ustáleném stavu konstantní.

Celková hmotová bilance regeneračního plynu

$$m_{gi} = m_{go}. \quad (4)$$

Hmotostní průtok vstupního regeneračního plynu roven hmotostnímu průtoku výstupnímu regeneračnímu plynu.

3.2.2 Entalpická bilance

Důležitá bilanční rovnice vycházející z prvního termodynamického zákona resp. ze zákona zachování energie. Tedy energie nemůže nikde vzniknout, ani zaniknout, jedině může být přeměněna z jedné na druhou. Entalpická bilance udává vztah mezi energetickými proudy vstupujících do procesu resp. vystupujících z procesu. Entalpie je pojem vyjadřující vnitřní energii uloženou v jednotkovém množství látky. Je to extenzivní termodynamická veličina závislá na velikosti systému. Nemá definovanou absolutní hodnotu a je vztažená k standardnímu stavu, definována jako

$$H = U + pV \quad (5)$$

Obecně je možné entalpickou bilanci zapsat jako:

$$\text{množství energie vstupující} - \text{množství energie vystupující} = \text{akumulovaná energie}$$

Celková entalpická bilance uvnitř kondenzátoru

$$m_{wi} \cdot \Delta H_{wi} + Q_h = m_{st} \cdot \Delta H_{st} + m_{wr} \cdot \Delta H_{wr}. \quad (6)$$

Energie vzniklé nízkotlaké páry by byla rovna energii napájecí vody pouze za předpokladu, že je do ní dodávána energie prostřednictvím regeneračního plynu Q_h a v kondenzátoru nastává akumulace energie. Jelikož zde dochází ke změně skupenské fáze, musí být rovnice (6) doplněna o člen popisující tuto změnu. Teplo, které se předává regeneračním plynem prostřednictvím teplosměnné plochy napájecí vodě, je dvojího typu a to citelné a latentní teplo.

Teplo média, které způsobí změnu teploty druhého média, se nazývá citelné teplo. Jelikož dochází ke změně skupenství, pak je nutné hovořit o teplu latentním. Nicméně toto teplo nezvyšuje teplotu média, jelikož se jeho energie spotřebovává na tuto fázovou přeměnu. Výsledná bilanční rovnice má tvar

$$m_{wi} \cdot \Delta H_{wi} + Q_h = m_{st} \lambda + m_{st} \cdot \Delta H_{st} + m_{wr} \cdot \Delta H_{wr}. \quad (7)$$

Celková entalpická bilance regeneračního plynu

$$m_{gi} \cdot \Delta H_{gi} - Q_h = m_{go} \cdot \Delta H_{go}. \quad (8)$$

Zde již nedochází k akumulaci energie, jelikož hmotnostní průtoky regeneračního plynu jsou si na vstupu i výstupu rovny. Bilanční rovnice slouží k tomu, aby bylo možné modelovat dynamiku teplených procesů.

3.3 Dynamika změny teploty v kondenzátoru

Teplo lze považovat za jistý druh energie, který je dán následujícím vztahem

$$Q = m\Delta H = mc\Delta T. \quad (9)$$

U kapalin a plynů je teplo sdíleno makroskopickým pohybem. Nejčastějším případem sdílení tepla je přestup ze stěny do tekutiny a naopak. Časová změna teploty se nazývá teplený tok a je definována jako:

$$\frac{dQ}{dt} = \Phi = \alpha S \Delta T. \quad (10)$$

Dále je nutné si zavést následující veličiny, aby bylo možné sestavit diferenciální rovnice, popisující dynamické tepelné změny.

Měrná tepelná kapacita – je množství tepla, které je nutné přivést látce o hmotnosti 1 kg, aby se ohřála o 1 °C resp. 1 K

$$c_p = \frac{\sum_{i=1}^n m_i c_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (11)$$

Objemová tepelná kapacita – je množství tepla, které je spotřebováno na ohřátí 1 m³ látky o 1 °C resp. 1 K

$$C = \rho c_p V \quad (12)$$

Dynamika změny teploty je popsána následující diferenciální rovnicí:

$$C \frac{dT}{dt} = \sum_{i=1}^n \Phi_i \quad (13)$$

Kondenzátor lze popsat jako výměník tepla, což je zařízení, ve kterém látka s vyšší teplotou předává prostřednictvím teplosměnné plochy teplo látce s nižší teplotou.

Výstupní teplota regeneračního plynu

$$C_h \frac{dT_{go}}{dt} = \Phi_{gi} - \Phi_{go} - \Phi_{tr} \quad (14)$$

Výstupní teplota nízkotlaké páry

$$C_c \frac{dT_{st}}{dt} = \Phi_{wi} - \Phi_{st} + \Phi_{tr} \quad (15)$$

S využitím vzorců lze psát následující rovnice:

$$\frac{dT_{go}}{dt} = \frac{m_{gi} c_{pgi} T_{gi}}{C_h} - \frac{m_{go} c_{pgi} T_{go}}{C_h} - \frac{K_{st}(T_{go} - T_{st})}{C_h} \quad (16)$$

$$\frac{dT_{st}}{dt} = \frac{m_{wi} c_{pwi} T_{wi}}{C_c} - \frac{m_{st} c_{pst} T_{st}}{C_c} + \frac{K_{st}(T_{go} - T_{st})}{C_c} \quad (17)$$

V rovnici popisující vývoj teploty uvnitř kondenzátoru je nezbytné ještě upravit člen

$$\frac{m_{st}c_{pst}T_{st}}{C_c}, \quad (18)$$

jelikož v kondenzátoru dochází k fázové změně skupenství napájecí vody následovně

$$\frac{dT_{st}}{dt} = \frac{m_{wi}c_{pwi}T_{wi}}{C_c} - \frac{m_{st}c_{pst}T_{st}}{C_c} - \frac{m_{wr}c_{pwi}T_{st}}{C_c} + \frac{K_{st}(T_{go} - T_{st})}{C_c}. \quad (19)$$

Množství zádrže v kondenzátoru na odpadní teplo je dáno následujícím rozdílem

$$m_{wr} = m_{wi} - m_{st}. \quad (20)$$

Z rovnice je vidět, že parametry nízkotlaké páry jsou závislé na tepelné kapacitě c_{pst} (pára), kdežto parametry zádrže jsou závislé na parametru c_{pwi} (napájecí voda). Teplota je ale u obou shodná T_{st} . Zádrž má tedy parametry nasycené páry ale vlivem člena tepelné kapacity c_{pwi} se jedná ještě o kapalinu. Oproti bilanční rovnici (6), kde figuruje člen obsahující latentní teplo, se tento člen v rovnicích popisující tepelnou dynamiku již nevyskytuje. Tento jev je dán tím, že latentní teplo se spotřebuje na fázovou změnu skupenství a tudíž nepřispívá do tepelné dynamiky. Jeho vliv se ovšem odrazil ve členu teplené kapacity, jak již bylo zmíněno.

3.4 Vývoj tlaku v kondenzátoru

Tlak uvnitř kondenzátoru je odvozen ze stavové rovnice [6]. Nasycená pára má velmi blízko k ideálnímu plynu, jelikož se v modelu pracuje s relativně nízkými tlaky a vyššími teplotami, lze stavovou rovnici, z kvalitativního hlediska, využít s ohledem na dostatečnou přesnost. Jelikož se jedná o uzavřenou nádobu, pak tlak uvnitř kondenzátoru je definován jako rozdíl integrálu mezi hmotnonstním průtokem vyprodukované nízkotlaké páry a napájecí vody.

Množství vyvinuté nízkotlaké páry je možné určit z následující rovnice

$$m_{st} = \alpha S \frac{T_{wi} - T_{st}}{\Delta H_{wi} - \Delta H_{st}} \quad (21)$$

Tuto rovnici je možné využít ke kontrole vyvinutého množství. V praxi se měří množství vyvinuté páry přímo na výstupu z kondenzátoru. Využívá se k tomu tlakové diference před a za regulačním ventilem s ohledem na konstantu ventilu [14], dle následujícího vzorce

$$m_{st} = 0,1 \cdot K_v \cdot z \sqrt{\Delta p}. \quad (22)$$

Výsledná diferenciální rovnice, popisující změnu tlaku v kondenzátoru má tvar

$$\frac{dp_c}{dt} = \frac{nRT_{st}}{V_c} (m_{wi} - m_{st}). \quad (23)$$

3.5 Vývoj hladiny v kondenzátoru

Hladina uvnitř kondenzátoru je závislá na rozdílu objemu napájecí vody a nízkotlaké páry v kondenzátoru.

$$l_c = \frac{1}{S_c} \int_0^t (\Delta V_{wi}) d\tau \quad (24)$$

Jelikož je v modelu počítáno s hmotnostními průtoky, je nutná následující úprava. Hladina napájecí vody v kondenzátoru je dána rozdílem hmotnostních průtoků, tedy objem je závislý množství napájecí vody. Výsledný vztah lze psát ve tvaru

$$\frac{dl_c}{dt} = \frac{1}{S_c} \left(\frac{m_{wi} - m_{st}}{\rho_{wi}} \right). \quad (25)$$

3.6 Nelineární model kondenzátoru

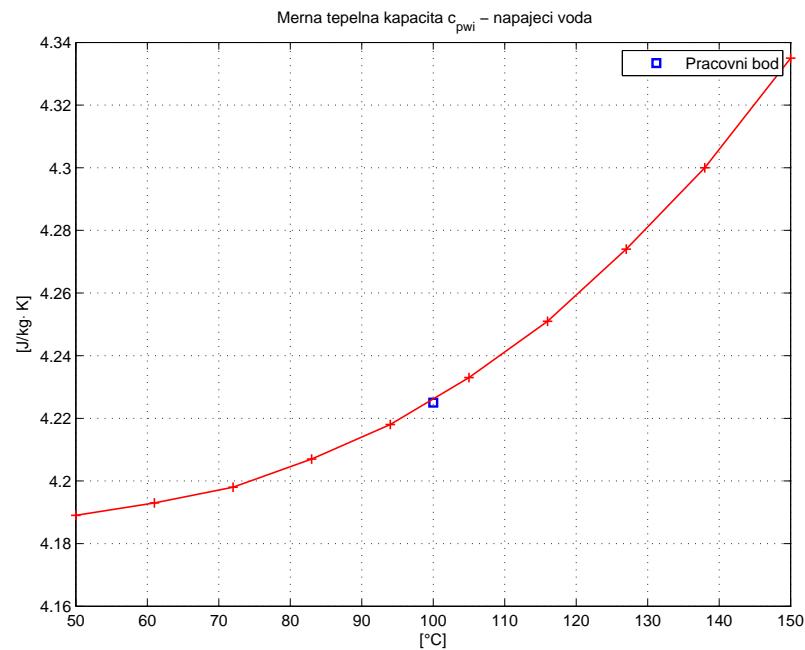
Následující diferenciální rovnice popisují vývoj teplot, tlaku a hladiny v modelu kondenzátoru a tímto tvoří kompletní model approximující chování kondenzátoru.

$$\begin{aligned} \frac{dT_{go}}{dt} &= \frac{m_{gi}c_{pgi}T_{gi}}{C_h} - \frac{m_{go}c_{pgi}T_{go}}{C_h} - \frac{K_{st}(T_{go} - T_{st})}{C_h} \\ \frac{dT_{st}}{dt} &= \frac{m_{wi}c_{pwi}T_{wi}}{C_c} - \frac{m_{st}c_{pst}T_{st}}{C_c} - \frac{m_{wr}c_{pwi}T_{st}}{C_c} + \frac{K_{st}(T_{go} - T_{st})}{C_c} \\ \frac{dp_c}{dt} &= \frac{nRT_{st}}{V_c} (m_{wi} - m_{st}) \\ \frac{dl_c}{dt} &= \frac{1}{S_c} \left(\frac{m_{wi} - m_{st}}{\rho_{wi}} \right) \end{aligned} \quad (26)$$

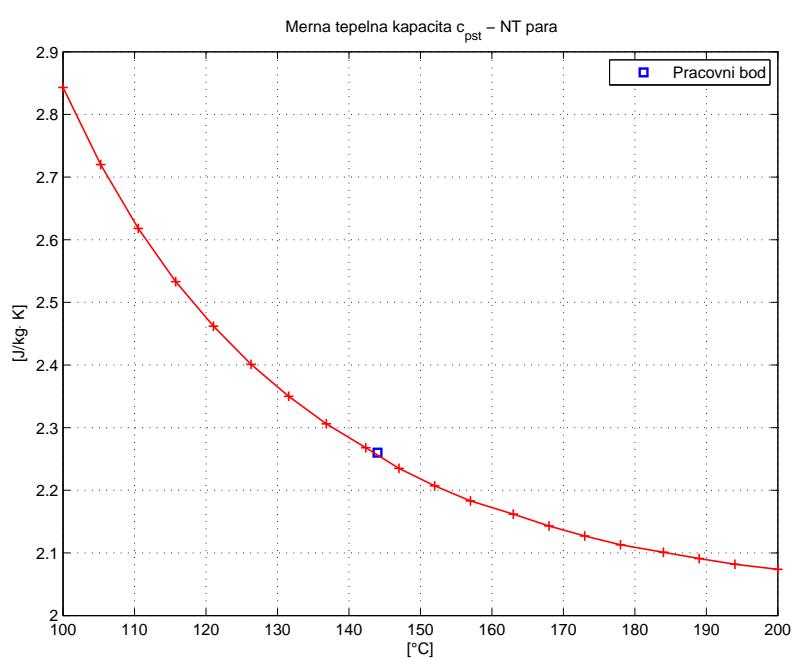
3.7 Stanovení provozních podmínek

Při stanovení provozních podmínek bylo vycházeno z podkladů poskytnutých společnosti PENTO spol. s r.o. od dodavatele technologie. Potřebné konstanty byly přepočítány s využitím webové aplikace [15]. Podklady vycházejí z National Institute of Standards and Technology [16].

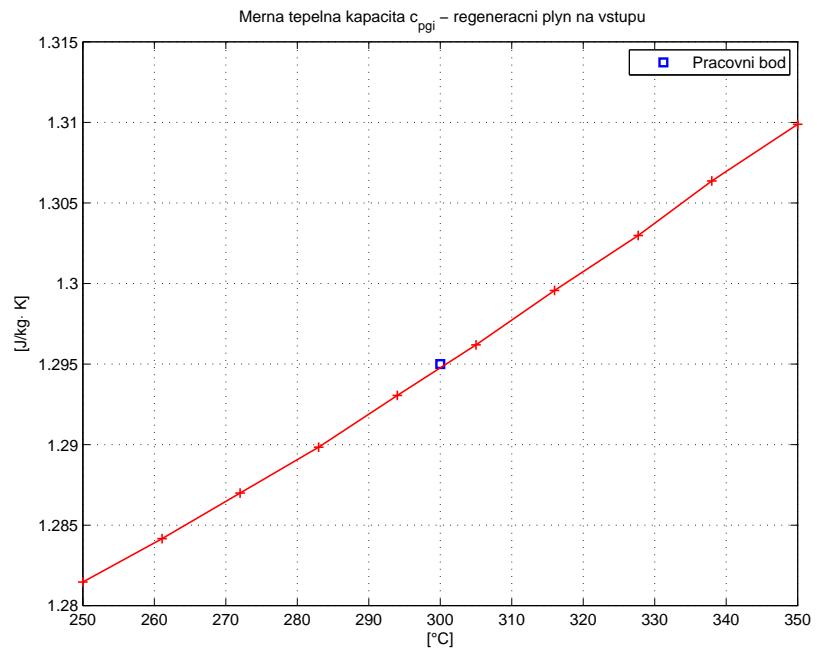
3.7.1 Měrné tepelné kapacity



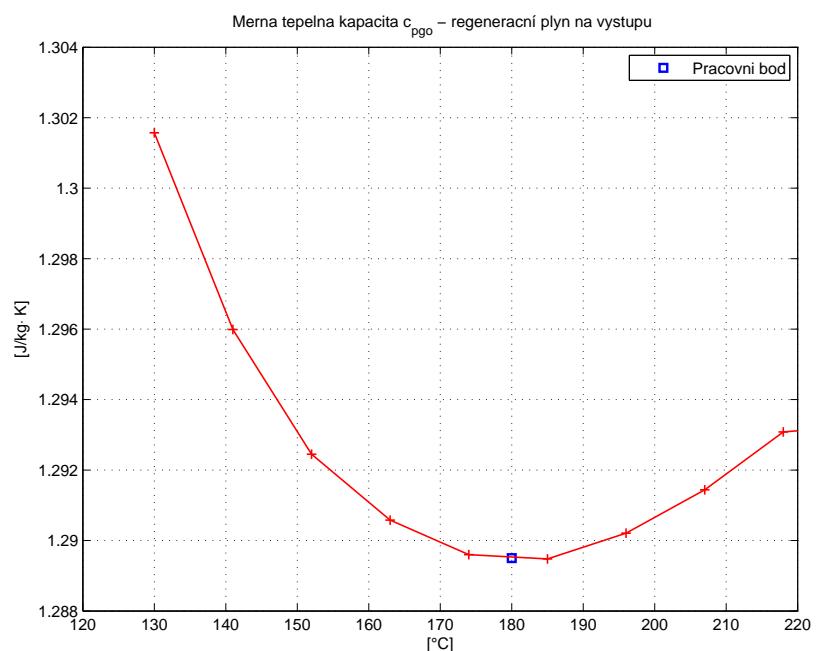
Obrázek 6: Měrná tepelná kapacita napájecí vody



Obrázek 7: Měrná tepelná kapacita NT páry

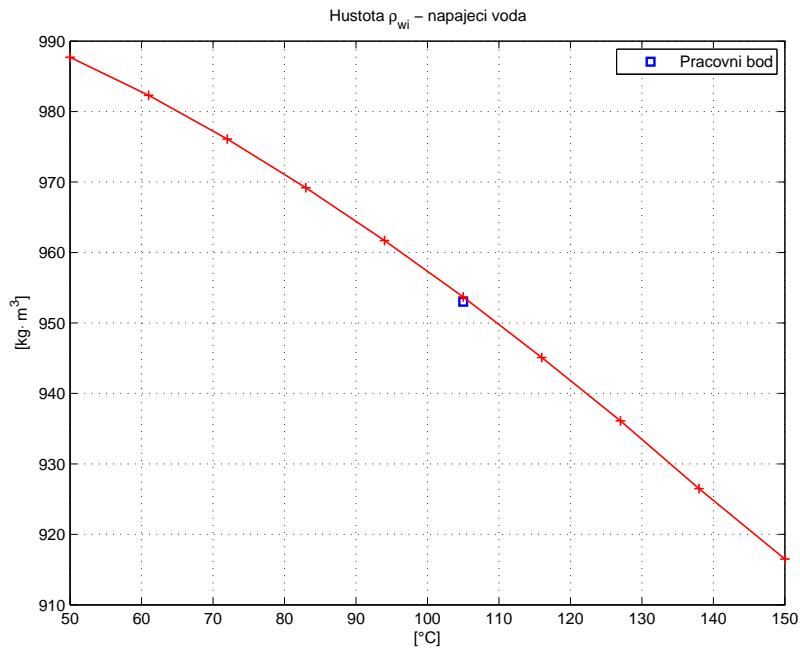


Obrázek 8: Měrná tepelná kapacita vstupního regeneračního plynu

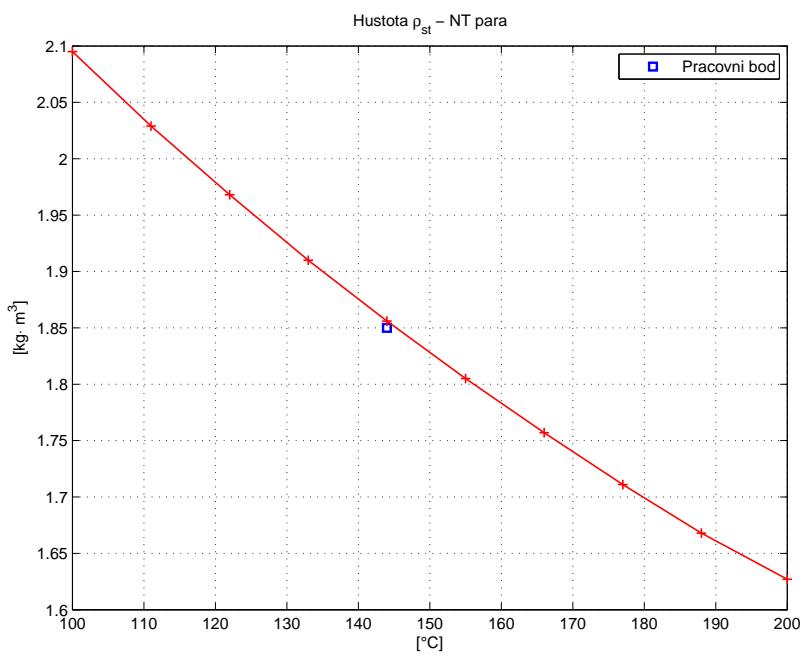


Obrázek 9: Měrná tepelná kapacita výstupního regeneračního plynu

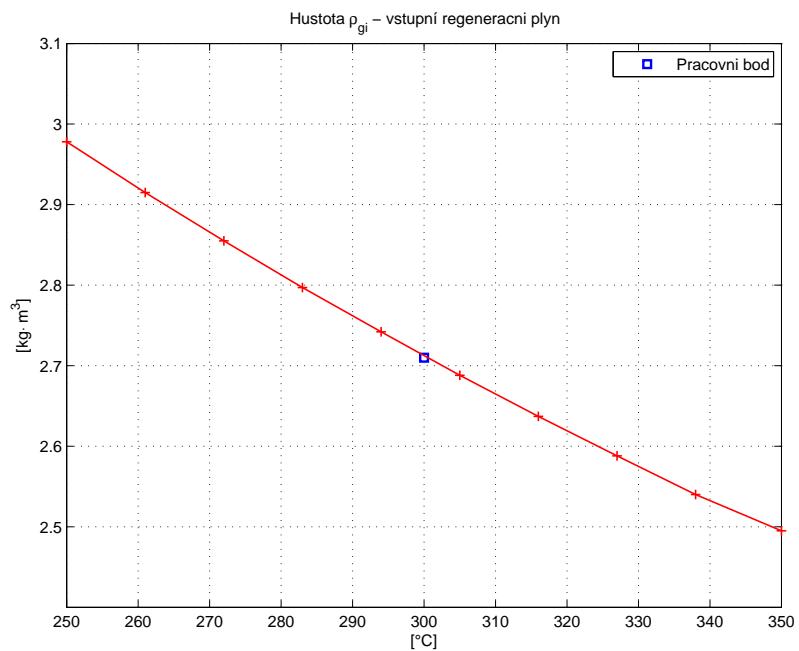
3.7.2 Hustoty médií



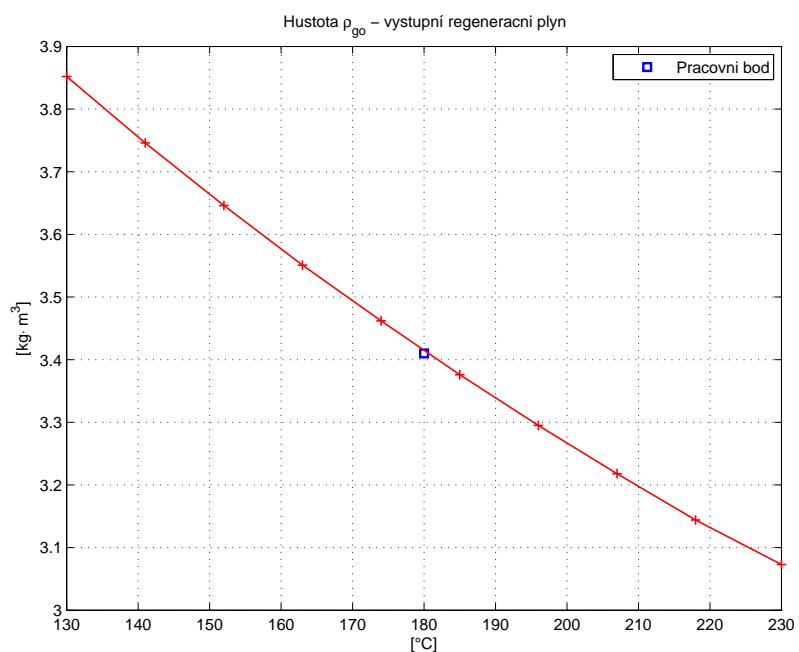
Obrázek 10: Hustota napájecí vody



Obrázek 11: Hustota NT páry při konstantní tlaku

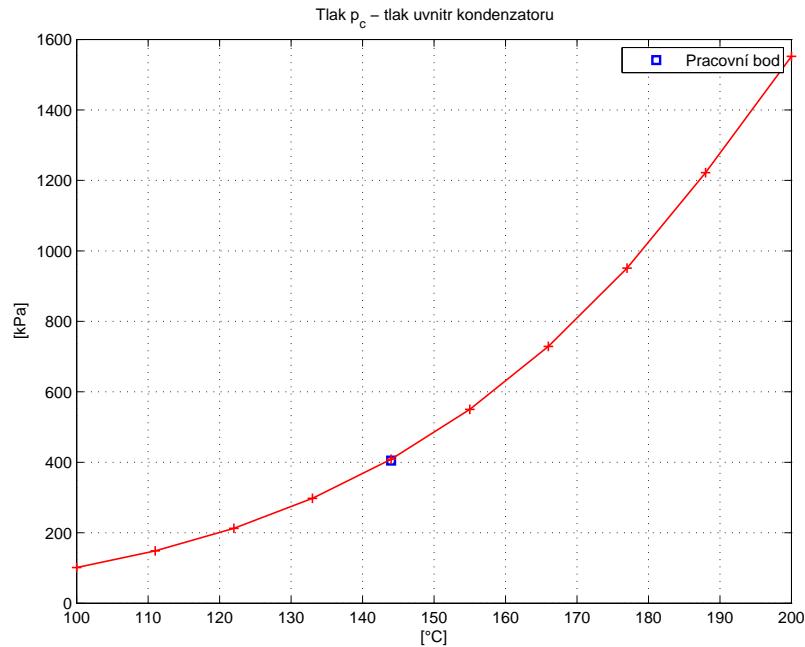


Obrázek 12: Hustota vstupního regeneračního plynu za stálého tlaku



Obrázek 13: Hustota výstupního regeneračního plynu za stálého tlaku

3.7.3 Tlak nasycené vodní páry



Obrázek 14: Vývoj tlaku uvnitř kondenzátoru

3.7.4 Souhrnné provozní podmínky

Kondenzátor je provozován při následujících provozních podmírkách odpovídající ustálenému stavu.

Veličina	Hodnota	Jednotka
Objem trubkového svazku	4,420	[m ³]
Objem vnitřního prostoru kondenzátoru	6,197	[m ³]
Objemová tepelná kapacita trubkového svazku	19663	[J]
Objemová tepelná kapacita kondenzátoru	25795	[J]
Teplosměnný koeficient	13050	[Wm ² ·m ² ·K ⁻¹]
Teplosměnná plocha	290	[m ²]
Plocha vodní hladiny v kondenzátoru	10,4	[m ²]
Počáteční tlak uvnitř kondenzátoru	500	[kPa]
Počáteční hladina uvnitř kondenzátoru	0,7	[m]

Tabulka 1: Parametry kondenzátoru

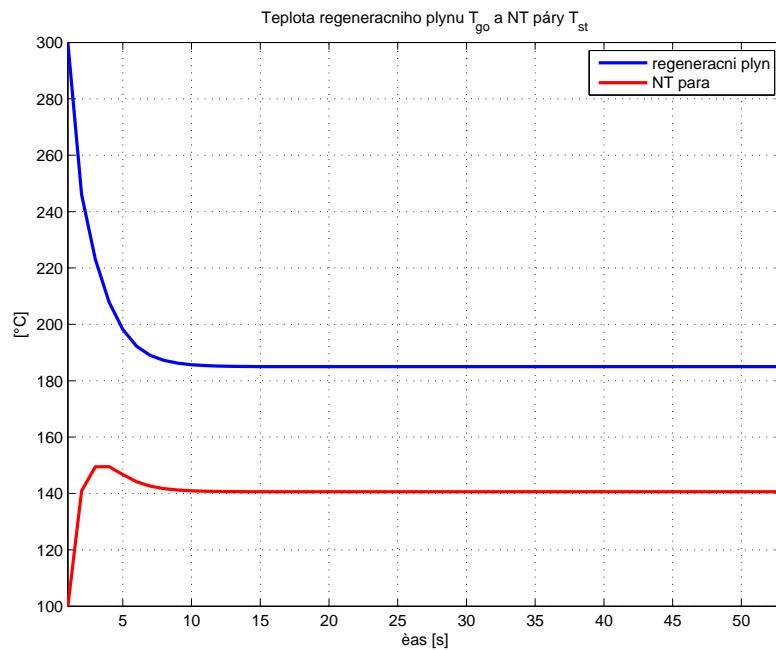
Veličina	Hodnota	Jednotka
Vstupní teplota regeneračního plynu	320	[°C]
Výstupní teplota regeneračního plynu	180	[°C]
Hmotnostní průtok vstupního regeneračního plynu	3,817	[kg·s ⁻¹]
Hmotnostní průtok výstupního regeneračního plynu	3,817	[kg·s ⁻¹]
Tepelná kapacita vstupního regeneračního plynu	1295	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
Tepelná kapacita výstupního regeneračního plynu	1289	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
Hustota vstupního regeneračního plynu	2,710	[kg·m ³]
Hustota výstupního regeneračního plynu	3,410	[kg·m ³]

Tabulka 2: Parametry regeneračního plynu

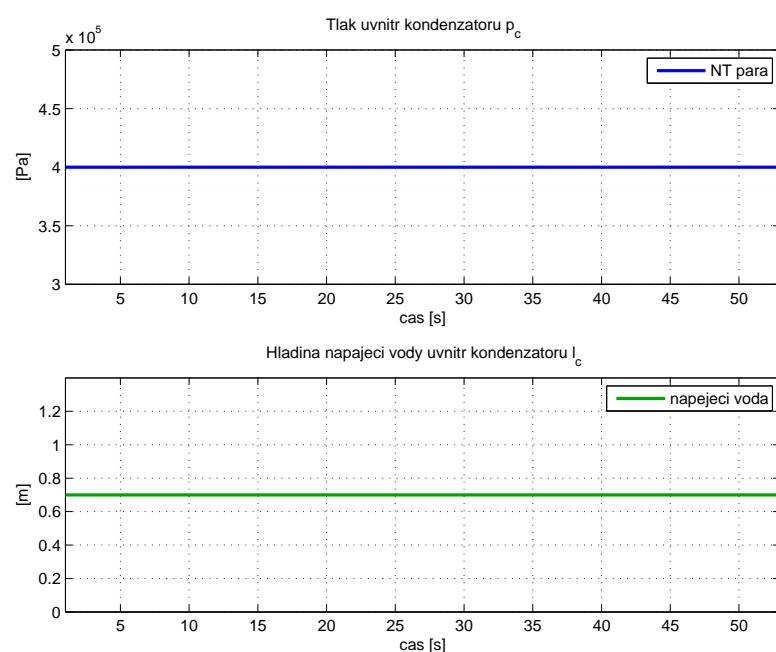
Veličina	Hodnota	Jednotka
Teplota napájecí vody	100	[°C]
Teplota zádrže	150	[°C]
Teplota nízkotlaké páry	150	[°C]
Hmotnostní průtok napájecí vody	7	[kg·s ⁻¹]
Hmotnostní průtok zádrže	2.9	[kg·s ⁻¹]
Hmotnostní průtok nízkotlaké páry	7	[kg·s ⁻¹]
Tepelná kapacita napájecí vody	4225	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
Tepelná kapacita nízkotlaké páry	2260	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
Hustota napájecí vody	953	[kg·m ³]
Hustota nízkotlaké páry	1,85	[kg·m ³]

Tabulka 3: Parametry napájecí vody a páry

3.7.5 Ustálený stav kondenzátoru



Obrázek 15: Ustálený stav teplot T_{gi} a T_{go} uvnitř kondenzátoru



Obrázek 16: Ustálený stav tlaku p_c a hladiny l_c uvnitř kondenzátoru

3.8 Linearizovaný model

Soustavu lineárních diferenciálních rovnic prvního řádu, popisující chování dynamického systému lze přímo přepsat do stavového popisu. Každá ze stavových veličin představuje konkrétní fyzikální veličinu a struktura diferenciálních rovnic nám popisuje vzájemné interakce mezi stavů.

Vhodnou volbou stavových proměnných lze psát stavový vektor v následujícím tvaru

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} T_{go} \\ T_{st} \\ p_c \\ l_c \end{bmatrix} \quad (27)$$

Budu uvažovat stavový popis v rozšířeném tvaru, kdy jsou rozděleny řídicí a poruchové vstupy. Poruchový vstup je takový, který není možné přímo ovlivnit - je neředitelný, ale musím jej uvažovat, jelikož vstupuje do systému.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} + \mathbf{B}_d\mathbf{u} \quad (28)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{Cx} + \mathbf{Du} \quad (29)$$

Musím dbát na to, že model je vzhledem k součinu vstup-stav nelineární. Nelineární vektorovou funkci f mohu approximovat [13] funkcí lineární pomocí Taylorova rozvoje prvního řádu dle následujícího vztahu

$$f_i(x(t), u(t)) \approx f_i(x_0, u_0) + \sum_{k=1}^{n_x} \frac{\partial f_i}{\partial x_k} \Big|_{x_0, u_0} \cdot \bar{x} + \sum_{k=1}^{n_x} \frac{\partial f_i}{\partial u_k} \Big|_{x_0, u_0} \cdot \bar{u}. \quad (30)$$

Aplikací vztahu (30) na soustavu rovnic (26) získávám následující linearizované rovnice

$$\begin{aligned} \frac{dT_{go}}{dt} &= \frac{m_{gi}c_{pgi}T_{gi}}{C_h} - \frac{m_{go}c_{pgi}}{C_h}\bar{T}_{go} - \frac{c_{pgi}T_{go}}{C_h}\bar{m}_{go} - \frac{K_{st}(T_{go} - T_{st})}{C_h} \\ \frac{dT_{st}}{dt} &= \frac{m_{wi}c_{pwi}T_{wi}}{C_c} - \frac{m_{st}c_{pst}}{C_c}\bar{T}_{st} - \frac{c_{pst}T_{st}}{C_c}\bar{m}_{st} - \frac{m_{wr}c_{pwi}T_{st}}{C_c} + \frac{K_{st}(T_{go} - T_{st})}{C_c} \\ \frac{dp_c}{dt} &= \left[\frac{nRm_{wi}}{V_c} - \frac{nRm_{ws}}{V_c} \right] \bar{T}_{st} + \frac{nRT_{st}}{V_c}\bar{m}_{wi} + \frac{nRT_{st}}{V_c}\bar{m}_{st} \\ \frac{dl_c}{dt} &= \frac{1}{S_c} \left(\frac{m_{wi} - m_{st}}{\rho_{wi}} \right) \end{aligned} \quad (31)$$

Proto zavádíme lineární odchylkový model, když jsou derivace vnitřních stavů nulové, a model je v okolí pracovního bodu approximován pomocí Taylorovy řady. Pro odchylkový model zavádíme následující značení

$$\dot{\bar{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}\bar{\mathbf{x}} + \mathbf{B}\bar{\mathbf{u}} + \mathbf{B}_d\bar{\mathbf{u}} \quad (32)$$

$$\bar{y} = \mathbf{C}\bar{\mathbf{x}} + \mathbf{D}\bar{\mathbf{u}}. \quad (33)$$

Z diferenciálních rovnic (31) lze jednoduše psát stavové rovnice

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} -\frac{m_{go}c_{pg0}}{C_h} - \frac{K_{st}}{C_h} & \frac{K_{st}}{C_h} & 0 & 0 \\ \frac{K_{st}}{C_c} & -\frac{m_{st}c_{pst}}{C_c} - \frac{m_{wr}c_{pwi}}{C_c} - \frac{K_{st}}{C_c} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{nRm_{wi}}{V_c} - \frac{nRm_{st}}{V_c} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{B} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{c_{pwi}T_{wi}}{C_c} & -\frac{c_{pst}T_{st}}{C_c} \\ \frac{nRT_{st}}{V_c} & -\frac{nRT_{st}}{V_c} \\ \frac{1}{S_c\rho_{wi}} & -\frac{1}{S_c\rho_{wi}} \end{bmatrix}, \\ \mathbf{B}_d &= \begin{bmatrix} \frac{c_{pgi}m_{gi}}{C_h} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Jelikož chci na výstup zobrazit stavy, pak výstupní matice \mathbf{C} bude jednotková s rozdílem dimenze systému a výstupní matice \mathbf{D} nulová, jelikož se v systému nevyskytují žádné dopředné smyčky resp. systém je kauzální. Kompletní stavový popis linearizovaného systému má následující tvar:

Stavová rovnice

$$\begin{aligned}
\dot{\bar{x}} = & \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{m_{go}c_{pg0}}{C_h} - \frac{K_{st}}{C_h} & \frac{K_{st}}{C_h} & 0 & 0 \\ \frac{K_{st}}{C_c} & -\frac{m_{st}c_{pst}}{C_c} - \frac{m_{wr}c_{pwi}}{C_c} - \frac{K_{st}}{C_c} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{nRm_{wi}}{V_c} - \frac{nRm_{st}}{V_c} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{A}} \underbrace{\begin{bmatrix} T_{go} \\ T_{st} \\ p_c \\ l_c \end{bmatrix}}_{\bar{x}} + \\
& + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{c_{pwi}T_{wi}}{C_c} - \frac{c_{pst}T_{st}}{C_c} & 0 \\ 0 & \frac{nRT_{st}}{V_c} - \frac{nRT_{st}}{V_c} & 0 \\ 0 & \frac{1}{S_c\rho_{wi}} - \frac{1}{S_c\rho_{wi}} & 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{B}} \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ m_{wi} \\ m_{st} \end{bmatrix}}_{\bar{u}} + \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{c_{pgi}T_{gi}}{C_h} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{B}_d} \underbrace{\begin{bmatrix} m_{gi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}}_{\bar{u}_d} \quad (34)
\end{aligned}$$

Výstupní rovnice

$$\dot{\bar{y}} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_{\mathbf{C}} \underbrace{\begin{bmatrix} T_{go} \\ T_{st} \\ p_c \\ l_c \end{bmatrix}}_{\bar{x}} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{D}} \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\bar{u}} \quad (35)$$

4 Fuzzy teorie

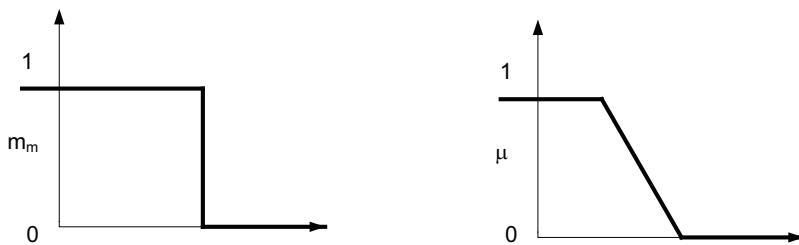
V současné době se v praxi již běžně setkáváme s fuzzy regulací. Ta je založena na fuzzy teorii, která je souhrnně označována jako disciplína zvaná softcomputing. Základy tvoří fuzzy logika, které spočívá v rozšíření Booleovských operátorů na tzv. fuzzy množiny. Již pojem fuzzy znamená neostrý a nejasný. Tato interpretace ovšem není něco nejasného ale naopak rozšiřuje možnosti popisu daného problému. V klasické Booleově algebře nastávají dva případy - objekt do množiny patří či nikoliv. Oproti tomu ve fuzzy množině může prvek nabývat hodnot v intervalu $\langle 0, 1 \rangle$. Je již přirozené, že tuto možnost, lze velmi vhodně aplikovat jak při návrhu regulátoru, tak i při návrhu modelu systému. O fuzzy teorii a množinách pojednává například [9].

Na úvod je nutné zavést základní pojmy z oblasti fuzzy množin, se kterými dále pracuji.

Lingvistická proměnná (term), univerzum – lingvistická proměnná též term, je proměnná, jejíž hodnota je výraz určitého jazyka. Množina termů je definována na univerzální množině – univerzu.

Charakteristická funkce m_m – funkce popisující množinu. Ve standardní Booleovské množině udává zda-li prvek do množiny patří anebo nepatří.

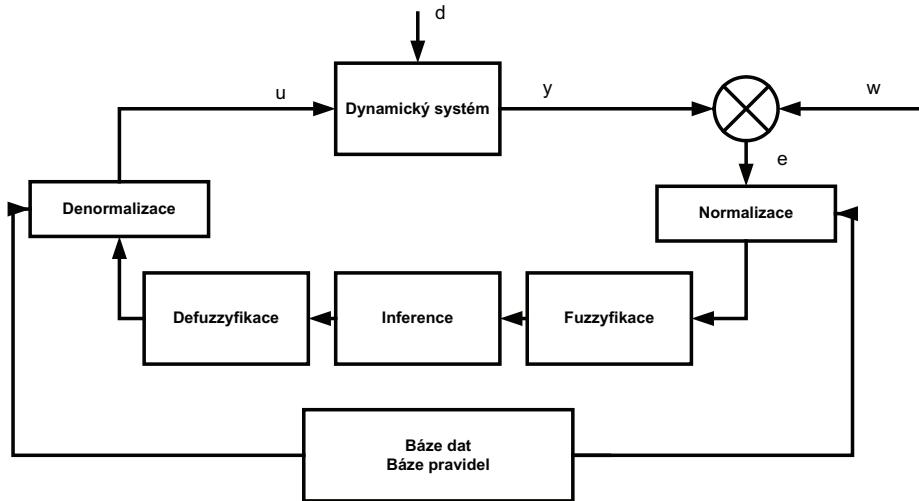
Funkce příslušnosti μ – u fuzzy množin se jedná o charakteristickou funkci, jejíž hodnota charakterizuje stupeň s jakým prvek do množiny patří resp. nepatří. Na následujícím obrázku je uveden rozdíl mezi charakteristickou funkcí ostré Booleovy množiny a neostré Fuzzy množiny.



Obrázek 17: Charakteristická funkce a funkce příslušnosti

4.1 Fuzzy regulace

Nyní, po zavedení pojmu, je již možné věnovat se regulaci. Na následujícím obrázku je uvedeno blokové schéma fuzzy regulátoru.



Obrázek 18: Blokové schéma fuzzy regulátoru

Princip je následující; ostrá vstupní data jsou v bloku fuzzifikace převedeny na fuzzy data. Následně vstupují do inferenčního mechanismu, který na základě báze dat vyhodnotí výsledek a v následném bloku defuzzifikace dochází k převodu fuzzy dat zpět na ostrá data.

4.1.1 Fuzzifikace

Na vstup fuzzy regulátoru jsou přivedena změřená data v podobě ostrých hodnot. Tyto hodnoty jsou normovány v bloku normalizace, kde dochází ke změně pravcovního rozsahu do zvoleného univerza. Takto normalizovaná data dále vstupují do bloku fuzzifikace, kdy dochází prostřednictvím funkce příslušnosti k přiřazení vstupních hodnot do fuzzy množin.

Pro návrh regulátoru jsem si zvolil vstupní a výstupní veličiny. Jako vstupní veličiny jsem pro regulátor hladiny i tlaku zvolil regulační odchylku $e(t)$ a její derivaci $de(t)$, jelikož charakterizují proces a jsou měřitelné. Výstupními veličinami z regulátorů jsou příslušné akční zásahy, odpovídají průtokům médií regulačními ventily. V dalším kroku jsem musel zvolit funkce příslušnosti.

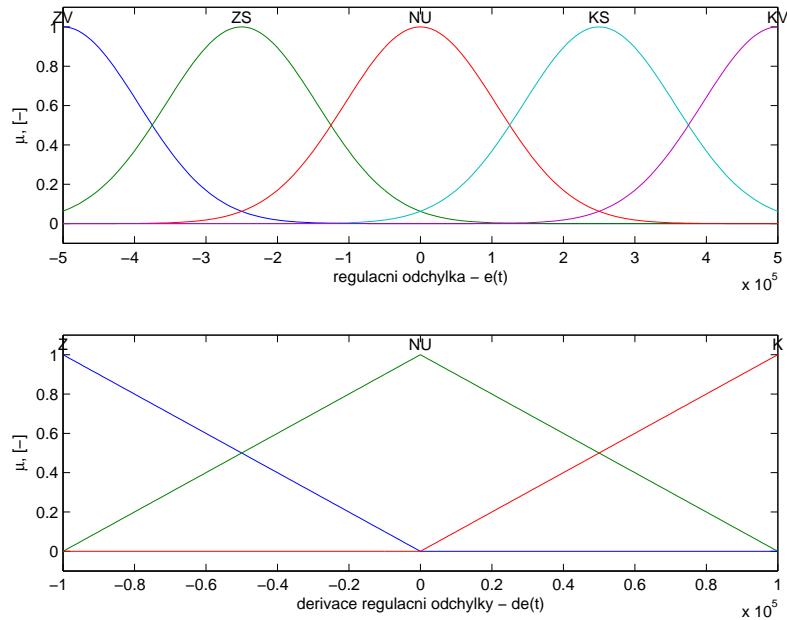
Funkce příslušnosti pro nelineární model:

Pro nelineární model jsem experimentálně volil Gaussovské funkce příslušnosti, jelikož vykazovali nejlepších výsledků. Rozsahy funkcí příslušnosti jsou uvedeny v následující tabulce

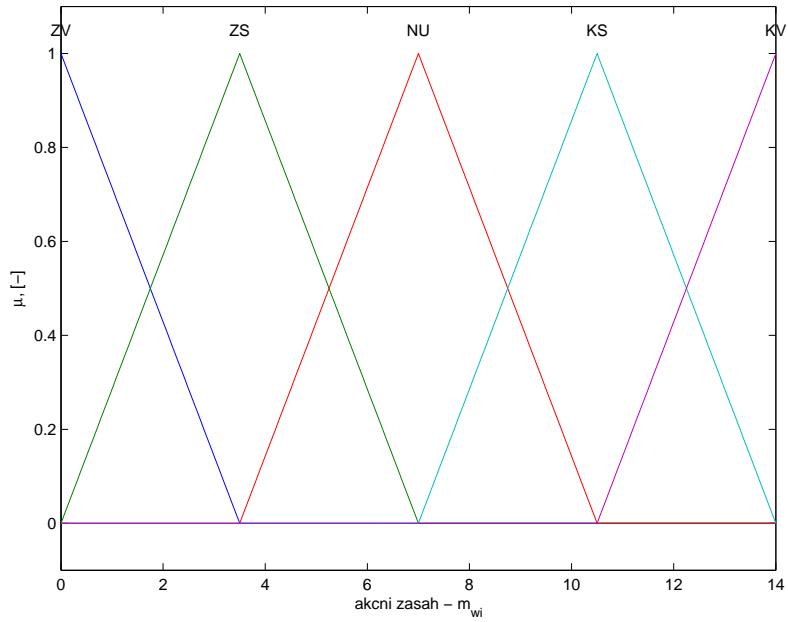
Smyčka	Rozsah – $e(t)$	Rozsah – $de(t)$	Rozsah – $du(t)$
Tlak	$\langle -500000, +500000 \rangle$	$\langle -100000, +100000 \rangle$	$\langle 0, 14 \rangle$
Hladina	$\langle -2, +2 \rangle$	$\langle -1, +1 \rangle$	$\langle 0, 14 \rangle$

Tabulka 4: Rozsahy funkcí příslušnosti regulátorů hladiny a tlaku pro nelineární model

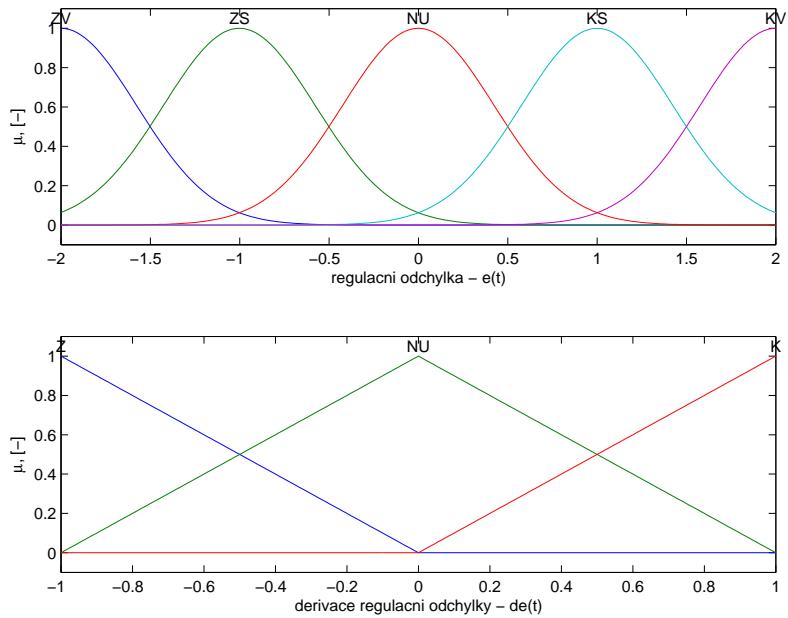
Při návrhu rozsahu funkcí příslušnosti lze postupovat dvěma základními postupy. V prvním případě se rozsahy pohybují v rozsahu provozních hodnot (například odchylka od žádané hodnoty $\pm 500\text{kPa}$) případě z hodnot získané testovacími signály. Druhým způsobem je normování univerza, kdy rozsahy funkcí příslušnosti nabývají pouze hodnot v intervalu $\langle 0, 1 \rangle$ případně $\langle -1, +1 \rangle$ a rozsah se dále upravuje vhodnými konstantami na vstupních a výstupních veličinách stejně jako u klasického regulátoru typu PID. Použil jsem kombinaci obou těchto metod a dosáhl jsem uspokojivých výsledků.



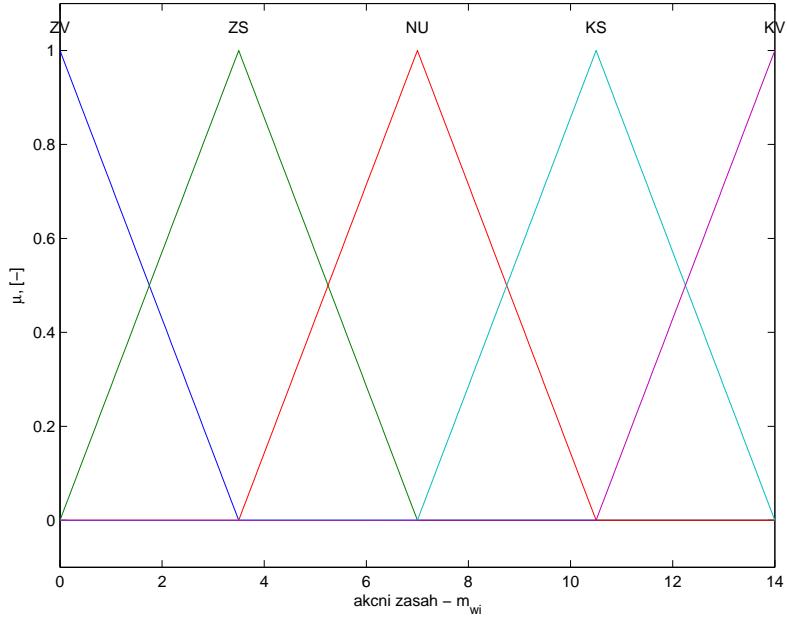
Obrázek 19: Funkce příslušnosti regulační odchylky, smyčka tlaku



Obrázek 20: Funkce příslušnosti akčního zásahu - m_{st} , smyčka tlaku



Obrázek 21: Funkce příslušnosti regulační odchylky, smyčka hladiny



Obrázek 22: Funkce příslušnosti akčního zásahu - m_{st} , smyčka hladiny

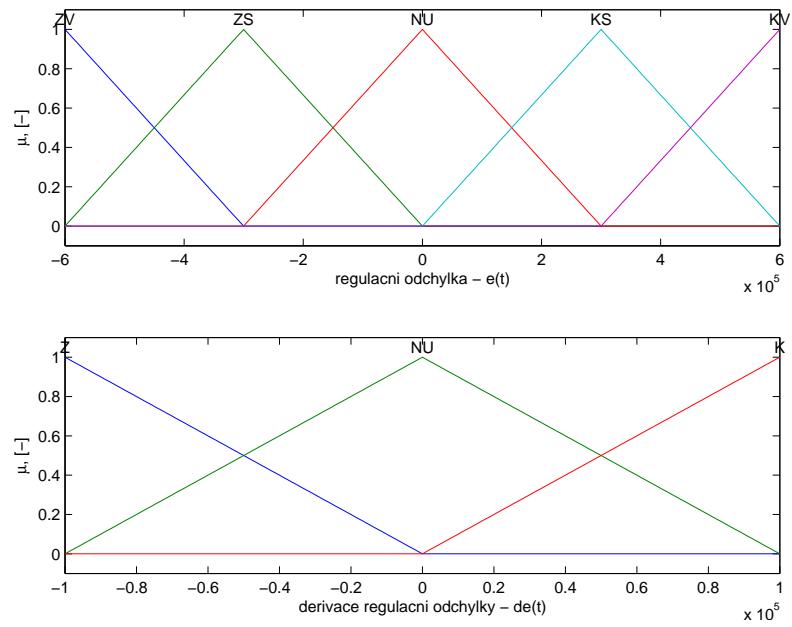
Funkce příslušnosti pro lineární model:

Pro lineární model jsem volil trojúhelníkové funkce příslušnosti, jelikož pro lineární systém vykazovali nejlepších výsledků. Rozsahy funkcí příslušnosti jsou uvedeny v následující tabulce

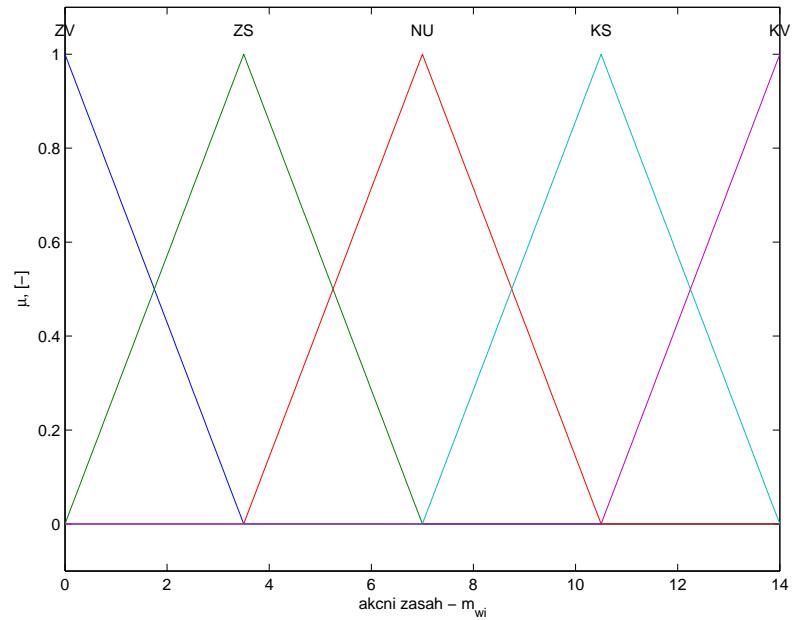
Smyčka	Rozsah - $e(t)$	Rozsah - $de(t)$	Rozsah - $du(t)$
Tlak	$\langle -600000, +600000 \rangle$	$\langle -100000, +100000 \rangle$	$\langle 0, 14 \rangle$
Hladina	$\langle -1, +1 \rangle$	$\langle -1, +1 \rangle$	$\langle 0, 14 \rangle$

Tabulka 5: Rozsahy funkcí příslušností regulátorů hladiny a tlaku pro lineární model

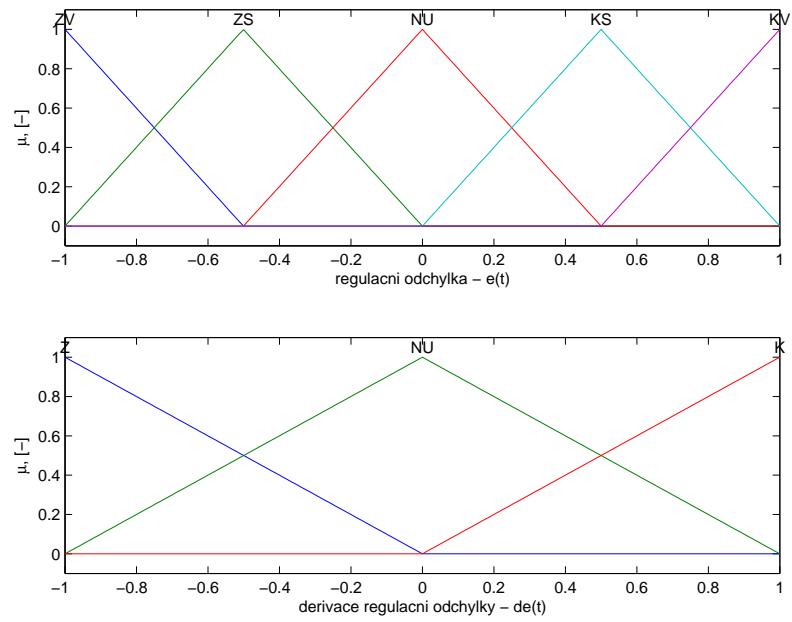
Při návrhu rozsahu funkcí příslušnosti jsem opět postupoval kombinací obou možných postupů pro dosažení optimálních výsledků.



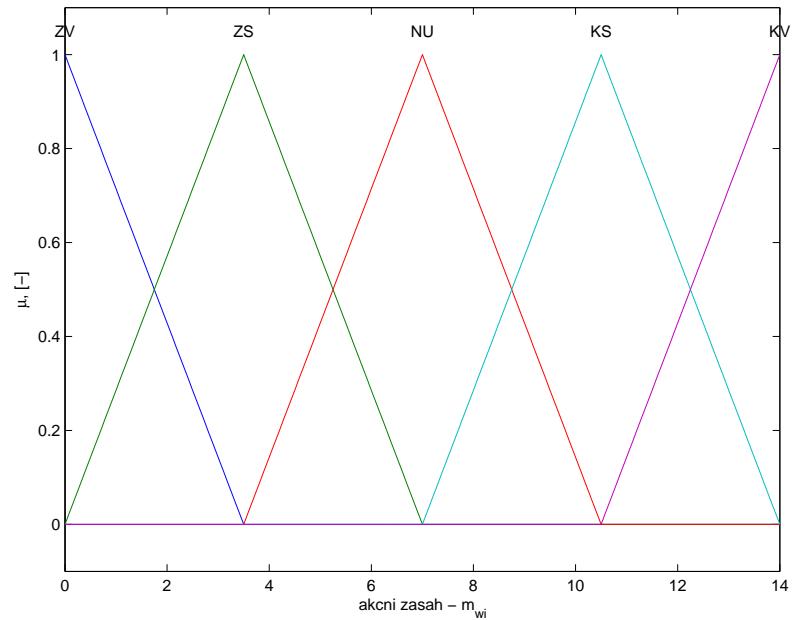
Obrázek 23: Funkce příslušnosti regulační odchylky, smyčka tlaku



Obrázek 24: Funkce příslušnosti akčního zásahu - m_{st} , smyčka tlaku



Obrázek 25: Funkce příslušnosti regulační odchylky, smyčka hladiny



Obrázek 26: Funkce příslušnosti akčního zásahu - m_{wi} , smyčka hladiny

4.1.2 Báze pravidel

Obecně je rozhodovací pravidlo tvořeno na základě vyhodnocení

IF ... THEN

Fuzzy inferenční mechanizmus je založen na podmínce vyjádřené implikací

IF (jestliže) [fuzzy výrok1] THEN (pak) [fuzzy výrok2],

Kdy první fuzzy výrok je nazýván antecedent, zpravidla spojený logickými spojkami a druhý fuzzy výrok konsekvent vyjadřující určitou činnost. Souhrnně se podmínka nazývá produkční pravidlo. Použil jsem standardní označení hodnot lingvistických proměnných. Pro jemnější rozlišení regulační odchylky jsem použil pět termů.

- ZV – hodnota záporná velká
- ZS – hodnota střední záporná
- NU – hodnota nulová
- KS – hodnota střední kladná
- KV – hodnota kladná velká

U derivace odchylky stačí znát jen její velikost, zde jsem vystačil se třemi termy.

- Z – hodnota záporná
- NU – hodnota nulová
- K – hodnota kladná

Počet pravidel pro regulátor zpracovávající regulační odchylku a její derivaci se určí následovně. Regulační odchylka je fuzzifikována pěti termů a derivace regulační odchylky třemi termy pak počet pravidel $P = 3 \cdot 5 = 15$. Pravidla jsou následující:

4.1.3 Inferenční mechanizmus

Aby bylo možné stanovit výstupní fuzzy množinu pro danou vstupní fuzzy množinu, je třeba určit postup jak zpracovat produkční pravidla. Tento postup zajišťuje právě inferenční mechanizmus založený na implikaci jednorozměrné závislosti. Pro případ, kdy vstupují do regulátoru dva vstupy, je třeba zobecnit na implikaci dvourozměrné závislosti s jedním pravidlem pomocí Mamdaniho implikace. Na jednoduchém případě lze demonstrovat princip následujícím způsobem. Pro regulátor s trojúhelníkovými funkcemi příslušnosti 23 vezmu dvě libovolná pravidla

IF [e(t)=ZV] AND [de(t)=Z] THEN [du(t)=ZV]
IF [e(t)=ZV] AND [de(t)=NU] THEN [du(t)=ZV]
IF [e(t)=ZV] AND [de(t)=K] THEN [du(t)=ZS]
IF [e(t)=ZS] AND [de(t)=Z] THEN [du(t)=ZV]
IF [e(t)=ZS] AND [de(t)=NU] THEN [du(t)=ZS]
IF [e(t)=ZS] AND [de(t)=K] THEN [du(t)=NU]
IF [e(t)=NU] AND [de(t)=Z] THEN [du(t)=ZS]
IF [e(t)=NU] AND [de(t)=NU] THEN [du(t)=NU]
IF [e(t)=NU] AND [de(t)=K] THEN [du(t)=KS]
IF [e(t)=KS] AND [de(t)=Z] THEN [du(t)=NU]
IF [e(t)=KS] AND [de(t)=NU] THEN [du(t)=KS]
IF [e(t)=KS] AND [de(t)=K] THEN [du(t)=KV]
IF [e(t)=KV] AND [de(t)=Z] THEN [du(t)=KS]
IF [e(t)=KV] AND [de(t)=NU] THEN [du(t)=KV]
IF [e(t)=KV] AND [de(t)=K] THEN [du(t)=KV]

Tabulka 6: Příklad produkčních pravidel pro fuzzy regulátor

IF [e(t)=ZV] AND [de(t)=Z] THEN [du(t)=ZV]
 IF [e(t)=ZV] AND [de(t)=NU] THEN [du(t)=ZV]

Inferenční mechanizmus porovná oba vstupy a vybere pro všechna pravidla nejmenší² hodnoty funkce příslušnosti fuzzifikovaných vstupů. Proces inference probíhá následovně

$$\alpha_1 = \min \left\{ \mu_{ZV_{e(t)}}, \mu_{Z_{de(t)}} \right\}, \quad (36)$$

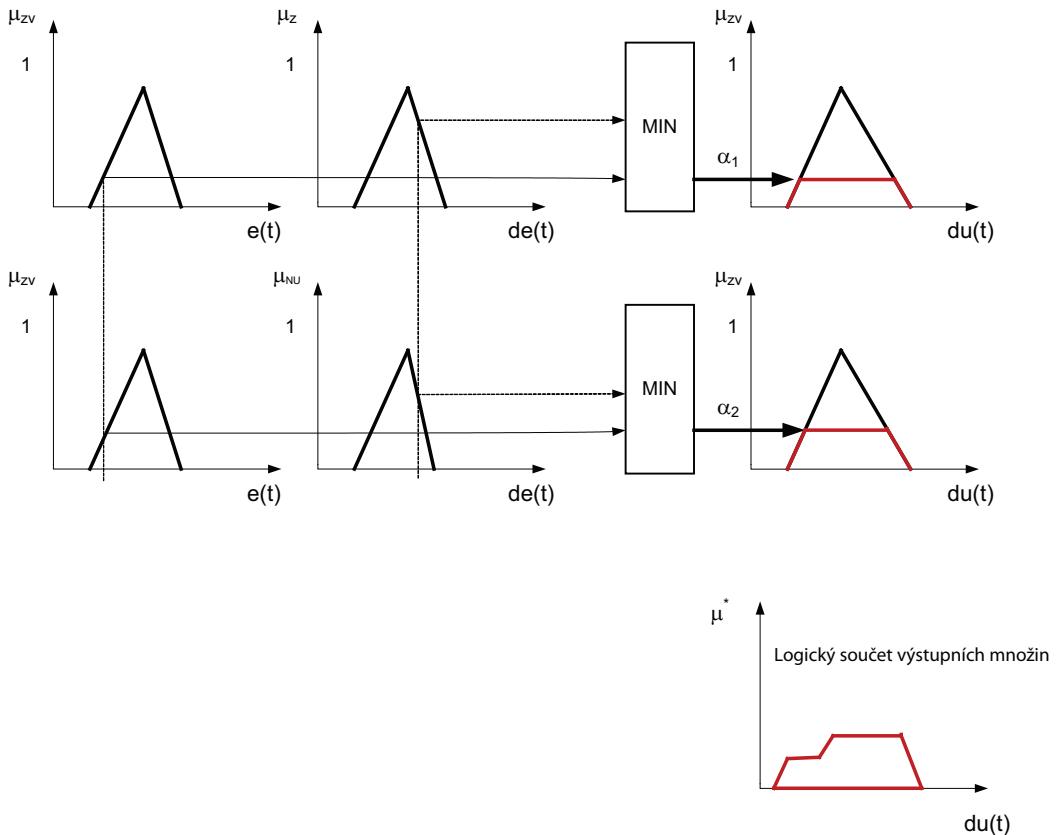
$$\alpha_2 = \min \left\{ \mu_{ZV_{e(t)}}, \mu_{NU_{de(t)}} \right\}. \quad (37)$$

Zbývá nalézt výstupní množinu funkce příslušnosti. Použitím Mamdaniho implikace je získána funkce příslušnosti konsekventu jako minimum z antecedentu a projekce Mamdaniho relace do osy funkce příslušnosti. Toto prakticky znamená oříznutí funkce příslušnosti konsekventu na hladině α odpovídající minimu ze stupňů příslušnosti pro obě hodnoty. Tento proces se nazývá defuzzifikace a pojednává o něm následující odstavec.

$$\mu^* = \max \left\{ \min \left\{ \alpha_1, \mu_{ZV} \right\}, \min \left\{ \alpha_2, \mu_{ZV} \right\} \right\}. \quad (38)$$

²Jelikož je v pravidlech logická spojka AND, pokud by byla uvedena spojka OR, pak bere největší hodnotu.

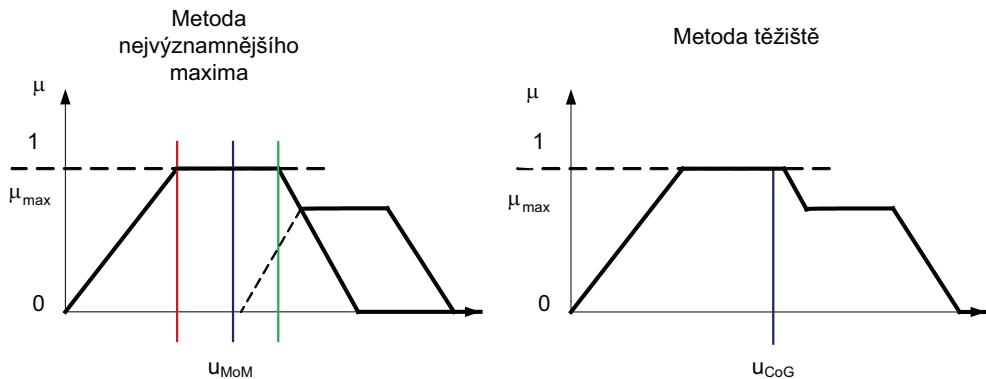
Proces inference je možné, pro lepší orientaci, znázornit graficky:



Obrázek 27: Proces inference prostřednictvím Mamdaniho implikace

4.1.4 Defuzzifikace

Funkce příslušnosti výstupní množiny je získaná sjednocením oříznutím (Mamdaniho implikace) funkcí příslušnosti. Pro praktické provedení akčního zásahu je ale zapotřebí převést ostrá data na konkrétní ostrou hodnotu v přípustném rozsahu. Tento proces nazývaný jako approximace neostrých termů ostrou hodnotou se nazývá deffuzifikace. Existuje několik metod ať empirických tak heuristických. Při volbě metody defuzzifikace je možné volit metodu hledající hodnotu akčního zásahu dle kompromisu tzv. metoda težiště nebo metodu hledající přijatelné řešení tzv. metoda nejvýznamnějšího maxima viz následující obrázek.



Obrázek 28: Metoda nejvýznamnějšího maxima a metoda těžiště

Metoda nejvýznamnějšího maxima:

Zde se hledá nějaké přijatelné řešení vyhovující podmínkám vyplývající z inferenčních pravidel. Vybere se term s největší hodnotou funkce příslušnosti a hledá se maximální hodnota funkce příslušnosti. Takto nalezená maximální hodnota, dána projekcí vodorovnou osou, určuje ostrou hodnotu. Tato metoda má více modifikací.

Metoda středu maxima MoM (Mean of Maximum) – výsledek je dán aritmetickým průměrem dvou maxim

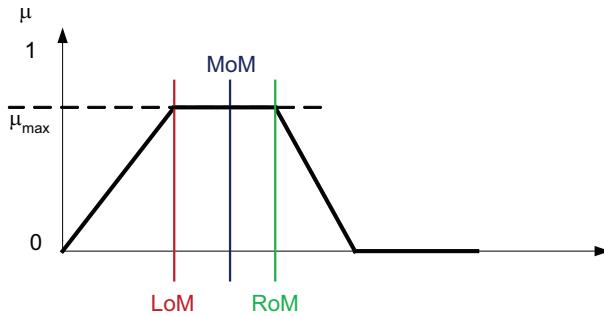
$$u_{MoM} = \frac{u_L + u_R}{2}. \quad (39)$$

Metoda levého maxima LoM (Left of Maximum) – modifikace předchozí metody, kdy se bere jako maximum levé

$$u_{LoM} = u_L. \quad (40)$$

Metoda pravého maxima RoM (Right of Maximum) – opět modifikace předchozí metody, s rozdílem, že se jako maximum bere pravé

$$u_{RoM} = u_R. \quad (41)$$



Obrázek 29: Metoda nejvýznamnějšího maxima

Tyto metody mají výhodu, že jsou rychle zpracovány, jelikož je hledáno pouze maximum funkce a akční veličina se může měnit i nespojitě.

Metoda těžiště:

Tato metoda je založena na výpočtu těžiště resp. ostré hodnoty ve výstupní množině. Opět existují modifikace a to

Těžiště singlonů (Center of Maximum) – funkční závislost jednotlivých termů je nahrazena funkcemi approximující funkci příslušnosti. Nejčastěji se používá Diracův impulz jehož poloha udává těžiště dílčí funkce příslušnosti (trojúhelník, Gauss, atp.) Například se umísťuje do vrcholu trojúhelníkové funkce a tím nám dává informaci o jeho maximu. Výpočet těžiště se provádí dle následujícího vztahu

$$u_{CoM} = \frac{\sum_{k=1}^i \alpha_k \cdot u_k}{\sum_{k=1}^i \alpha_k} \quad (42)$$

Těžiště plochy (Center of Gravity) – těžiště je přímo hledáno z plochy výstupní funkce příslušnosti. Výsledná hodnota akční veličiny je dána hodnotou těžiště plochy vzniklé sjednocením dílčích ploch f ohraničenou funkcí výstupních termů.

$$u_{CoG} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} f \cdot u \, du}{\int_{-\infty}^{\infty} f \, du} \quad (43)$$

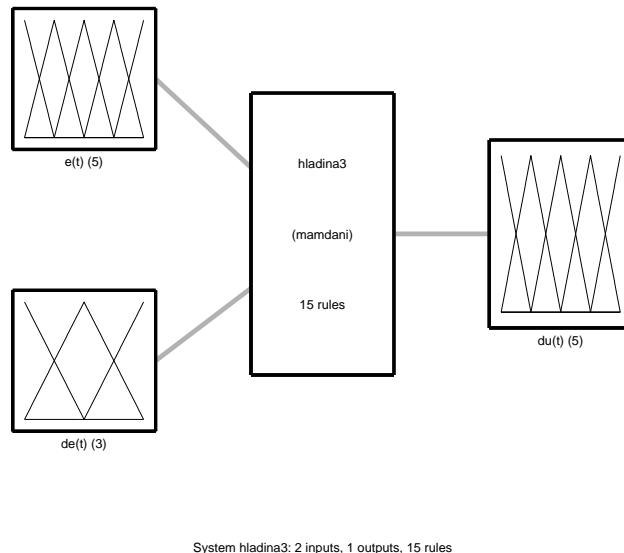
Každá metoda poskytuje odlišné výsledky a proto je na nutné zvážit volbu s ohledem na konkrétní aplikaci. Použil jsem Fuzzy Control Toolbox, který umožňuje použít řadu metod defuzzifikace. Pro výpočty jsem zvolil metodu Těžiště singlonů, která je méně časově náročná než metoda Těžiště plochy.

5 Návrh regulátorů

Nyní jsou již zavedeny funkce příslušnosti viz kapitola 4.1.1, báze dat viz tabulka 4 a 5, produkční pravidla viz tabulka 6 a je tedy možné přistoupit k syntéze regulátorů. Pro systém popisující kondenzátor jsem zvolil jednoduchý fuzzy PID regulátor typu Mamdani. Při navrhování regulátorů jsem dospěl k závěru, že nejlepších výsledků bylo dosaženo při použití PD regulátoru. Navržený model má totiž integrační charakter a přidání integrační složky regulátoru působí nepříznivě. Systém je pak velmi citlivý na změnu zesílení, ztrácí stabilitu a návrh regulátoru je velmi obtížný.

5.1 Fuzzy PD regulátor

Struktura PD regulátoru je následující



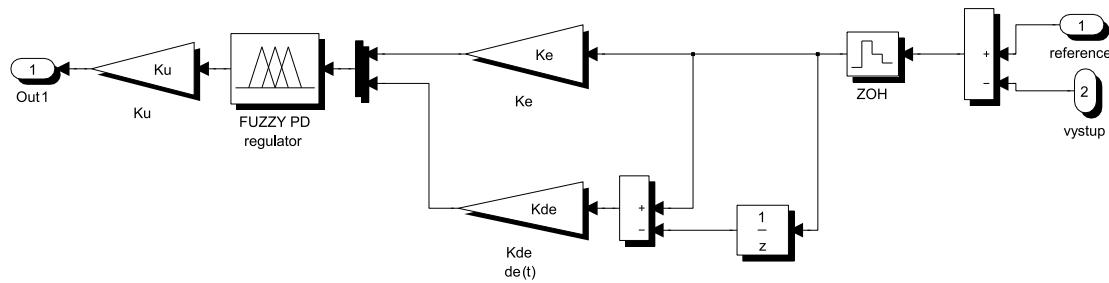
Obrázek 30: Struktura fuzzy PD regulátoru

Jelikož struktura regulátoru tlaku i hladiny je shodná stačí demonstrovat pouze regulátor hladiny. Výstup PD příručkového regulátoru je dán následujícím vztahem

$$u(t) = K_e \cdot e(t) + K_{de} \cdot de(t). \quad (44)$$

5.2 Použité regulátory typu PD

Pro lineární i nelineární systém jsem použil shodně PD regulátor. Veškeré parametry fuzzy regulátoru jsou odvozeny v předešlé kapitole 4.1. Nyní se zabývám nastavováním konstant resp. normováním univerza regulátorů.



Obrázek 31: Struktura fuzzy PD regulátoru – nastavování konstant

V následující tabulce jsou uvedeny konstanty Ke , Kde pomocí níž je měněno měřítko univerza vstupů a Ku pomocí níž je měněno měřítko univerza výstupu regulátorů pro nelineární systém.

Smyčka	Ke	Kde	Ku
Tlak	20	1	1
Hladina	2000	1	1

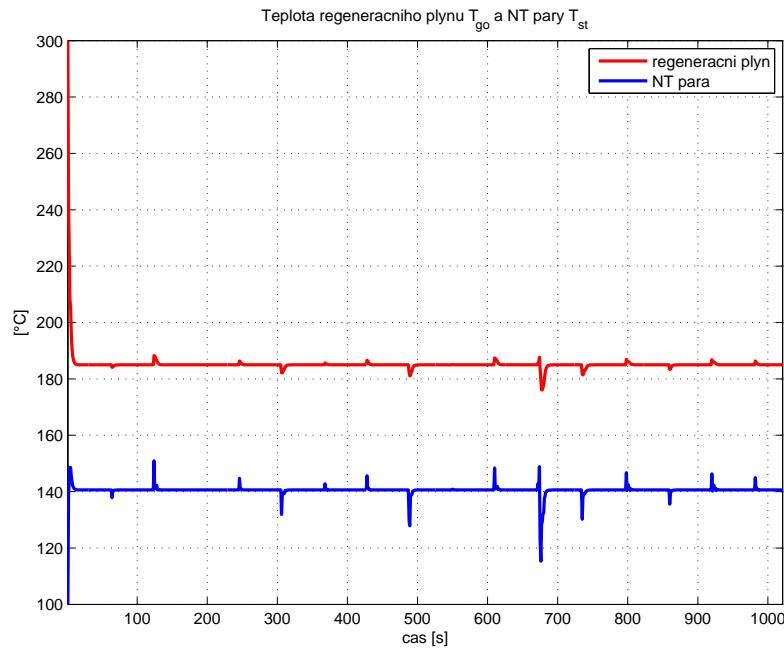
Tabulka 7: Konstanty použitých regulátorů pro nelineární model

Smyčka	Ke	Kde	Ku
Tlak	1	1	0,7
Hladina	1	1	0,7

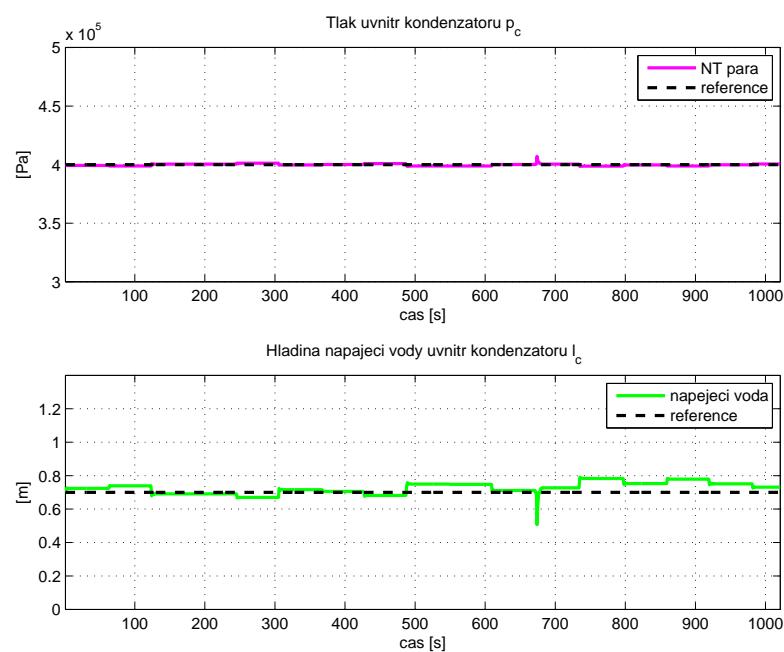
Tabulka 8: Konstanty použitých regulátorů pro lineární model

Nyní jsou již navrženy regulátory pro smyčky tlaku a hladiny a to jak pro lineární i nelineární systém. Je tedy možné přistoupit k simulacím. V simulacích je simulována nejistota na vstupu m_{wi} , výstupu m_{st} , kombinovaná m_{wi}, m_{st} a mezní situace, kdy k nejistotám působí zároveň poruchová veličina m_{wi}, m_{st}, T_{gi} . Tyto stavy odpovídají kolísání tlaku v síti napájecí vody, nízkotlaké páry a provoznímu rozsahu tepelného kroku Clausovy jednotky. Nejistoty a poruchy jsou simulovány obdélníkovými signály v rozmezí 15% resp. $\pm 50^\circ\text{C}$

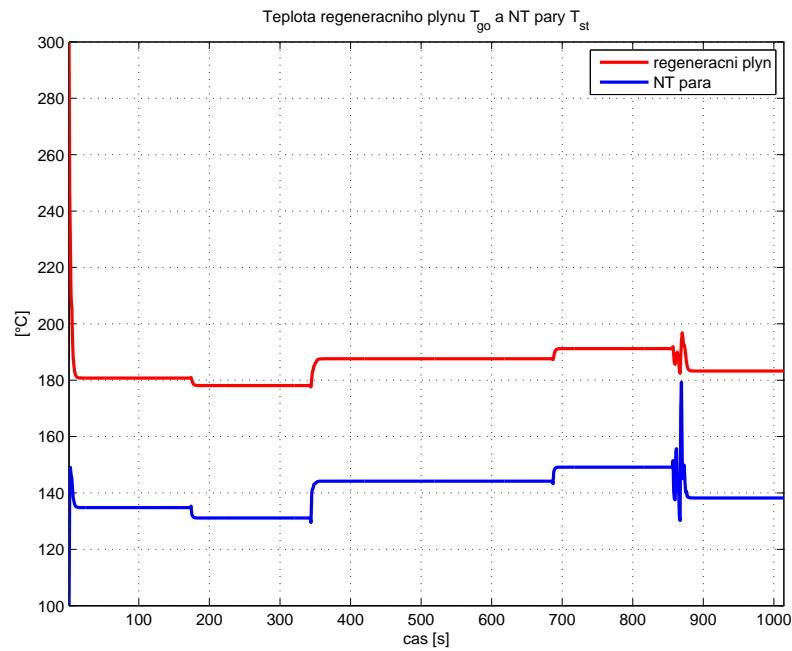
5.2.1 Simulace - nelineární systém



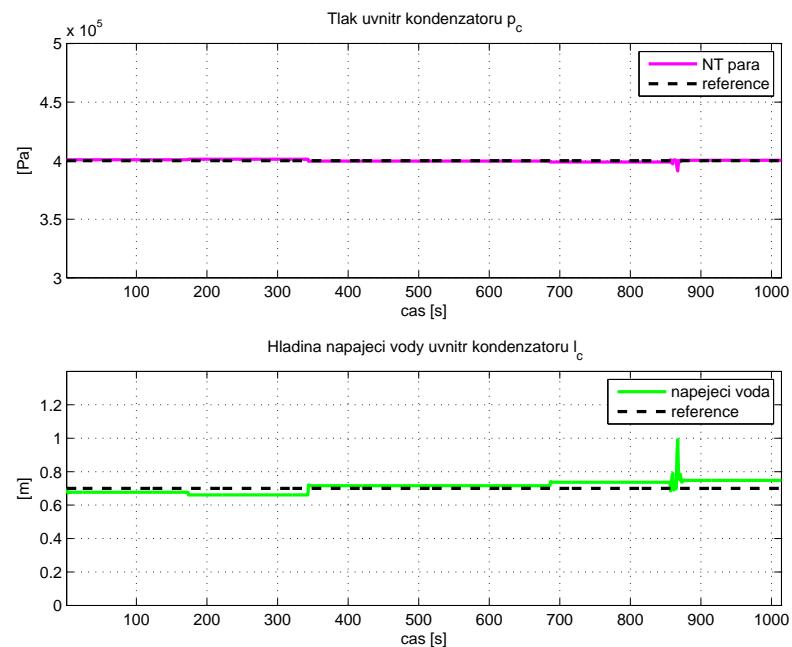
Obrázek 32: Průběh teplot T_{go} a T_{st} – nelineární systém, nejistota vstupu $m_{st} = 15\%$



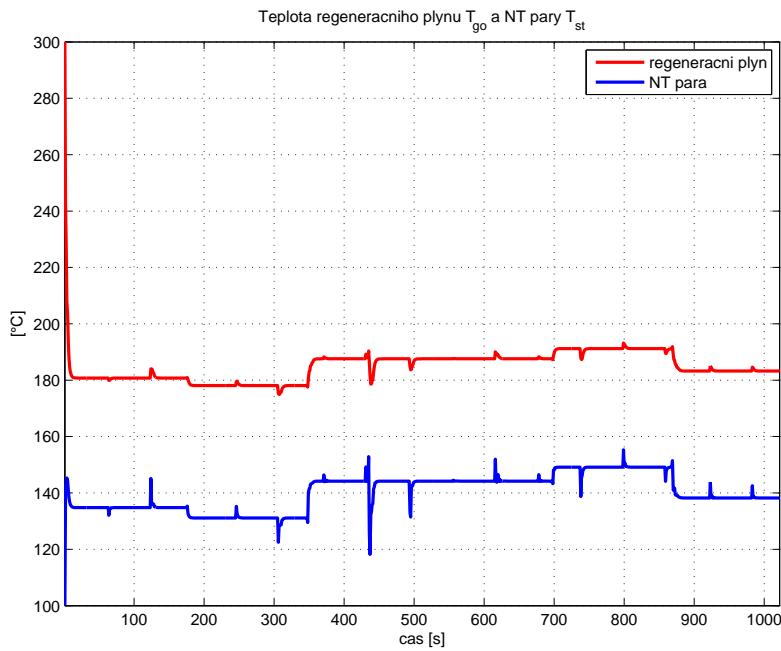
Obrázek 33: Průběh tlaku p_c a hladiny l_c – nelineární systém, nejistota vstupu $m_{st} = 15\%$



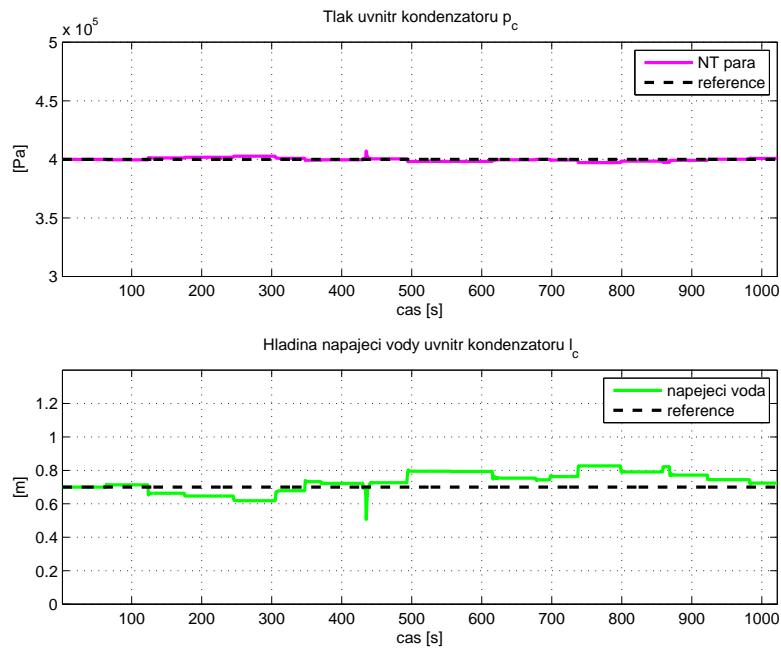
Obrázek 34: Průběh teplot T_{go} a T_{st} – nelineární systém, nejistota vstupu $m_{wi} - 15\%$



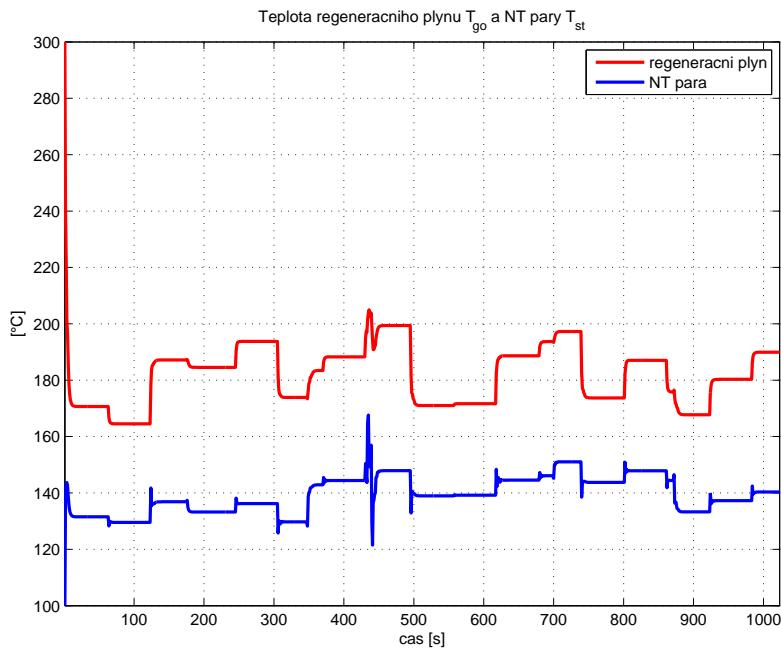
Obrázek 35: Průběh tlaku p_c a hladiny l_c – nelineární systém, nejistota vstupu $m_{wi} - 15\%$



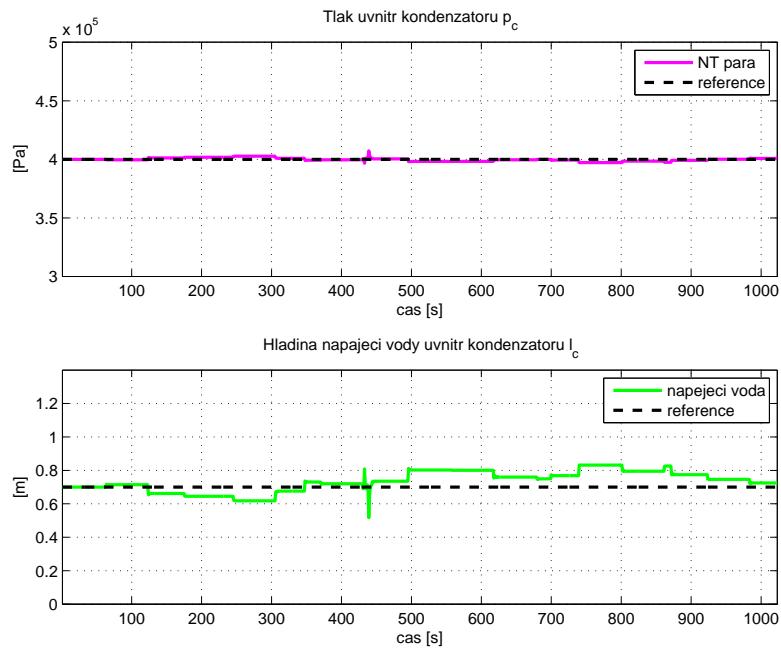
Obrázek 36: Průběh teplot T_{go} a T_{st} – nelineární systém, nejistota vstupů m_{st} a m_{wi} – 15%



Obrázek 37: Průběh tlaku p_c a hladiny l_c – nelineární systém, nejistota vstupů m_{st} a m_{wi} – 15%

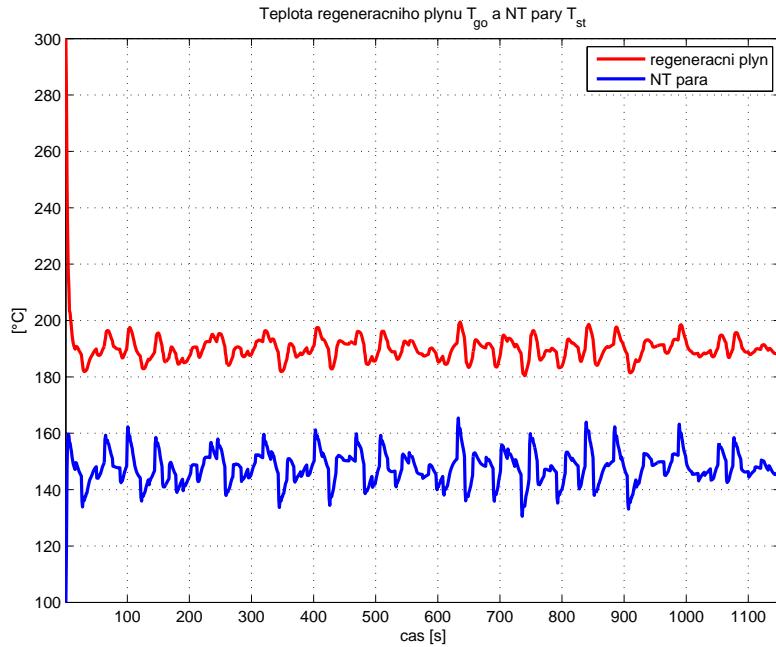


Obrázek 38: Průběh teplot T_{go} a T_{st} – nelineární systém, nejistota vstupů m_{st} a m_{wi} – 15%, současně vliv poruchy $T_{gi} \pm 50^\circ\text{C}$

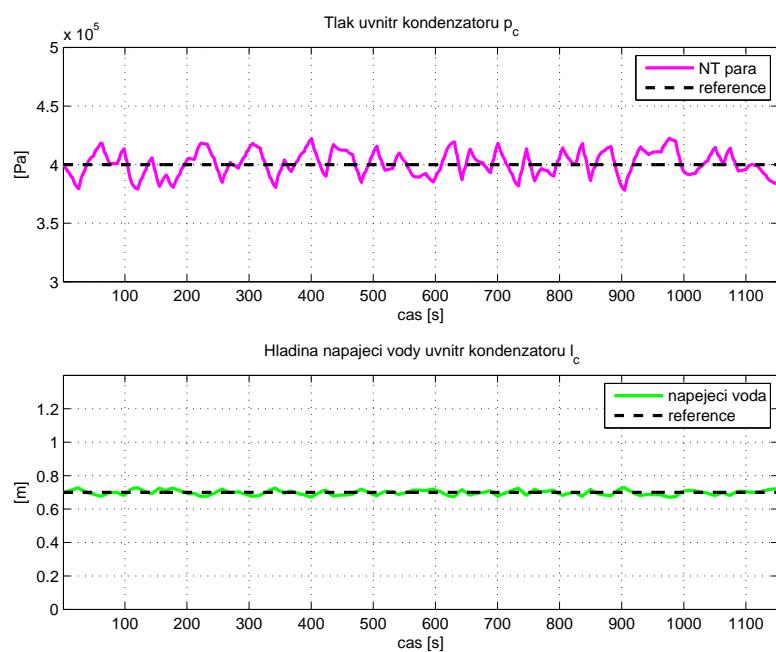


Obrázek 39: Průběh tlaku p_c a hladiny l_c – nelineární systém, nejistota vstupů m_{st} a m_{wi} – 15%, současně vliv poruchy $T_{gi} \pm 50^\circ\text{C}$

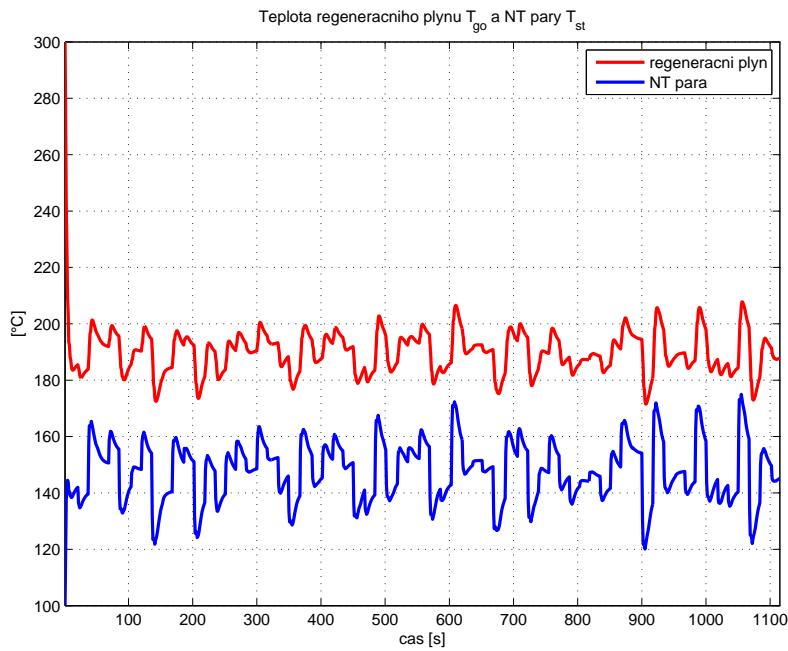
5.2.2 Simulace - lineární systém



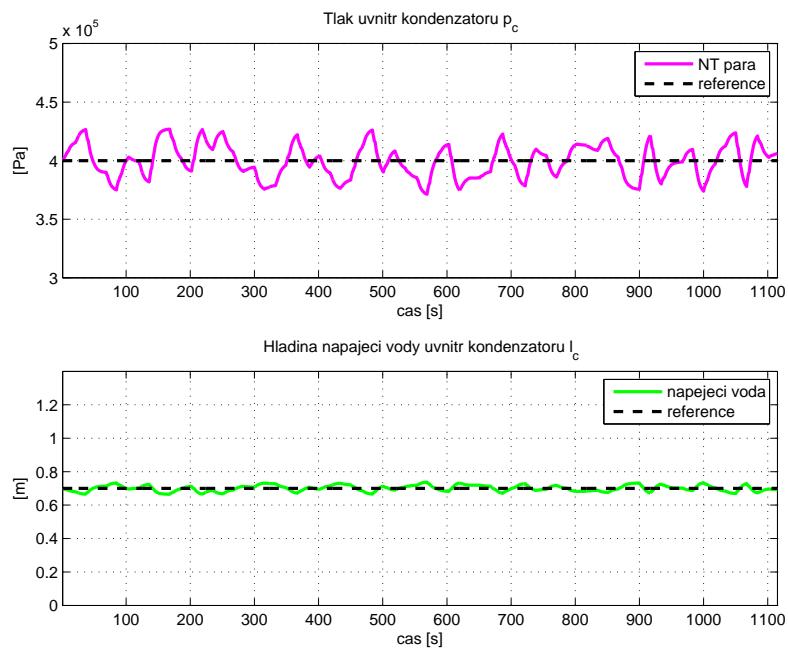
Obrázek 40: Průběh teplot T_{go} a T_{st} – lineární systém, nejistota vstupu $m_{st} = 15\%$



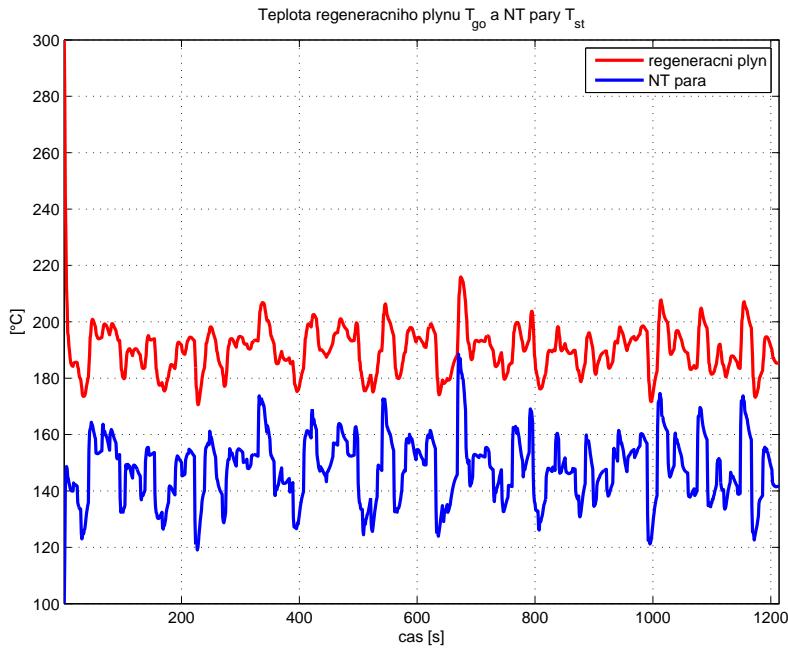
Obrázek 41: Průběh tlaku p_c a hladiny l_c – lineární systém, nejistota vstupu $m_{st} = 15\%$



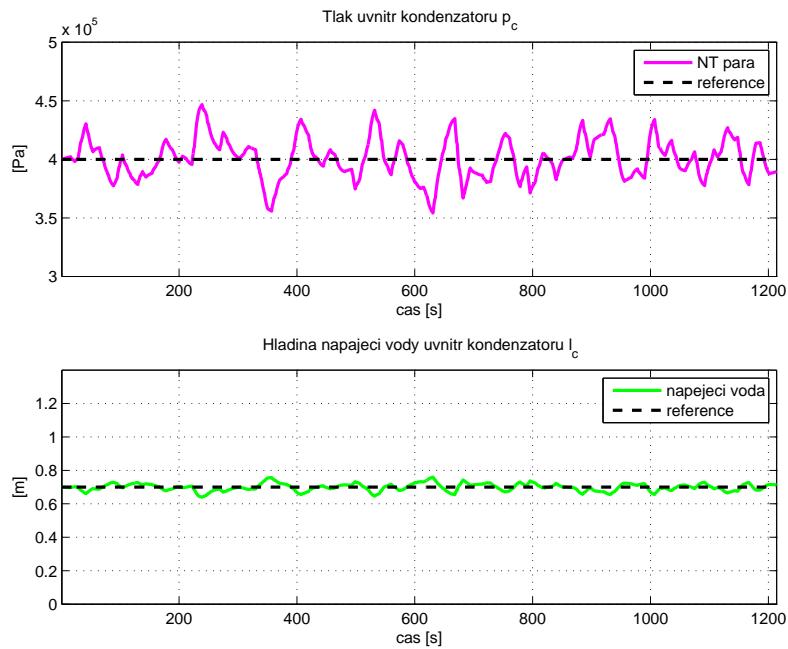
Obrázek 42: Průběh teplot T_{go} a T_{st} – lineární systém, nejistota vstupu $m_{wi} = 15\%$



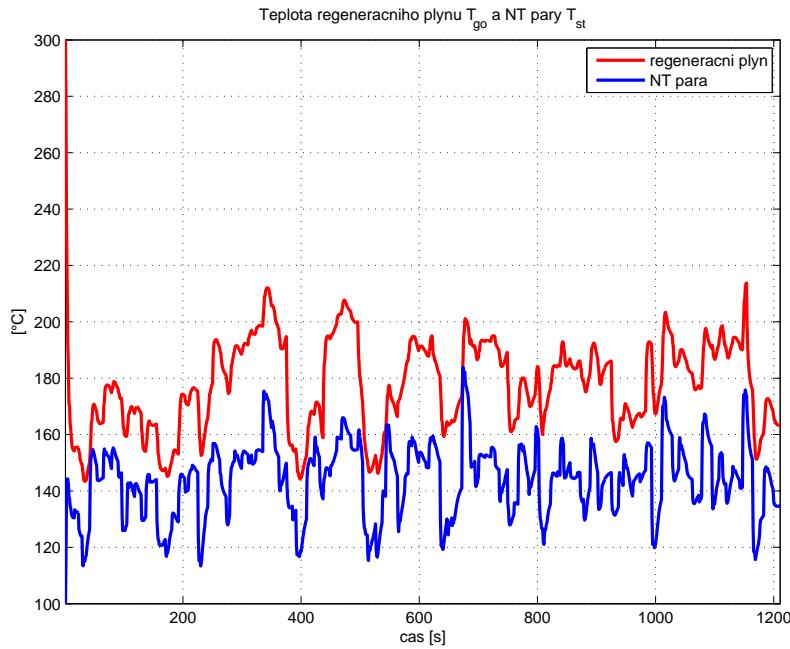
Obrázek 43: Průběh tlaku p_c a hladiny l_c – lineární systém, nejistota vstupu $m_{wi} = 15\%$



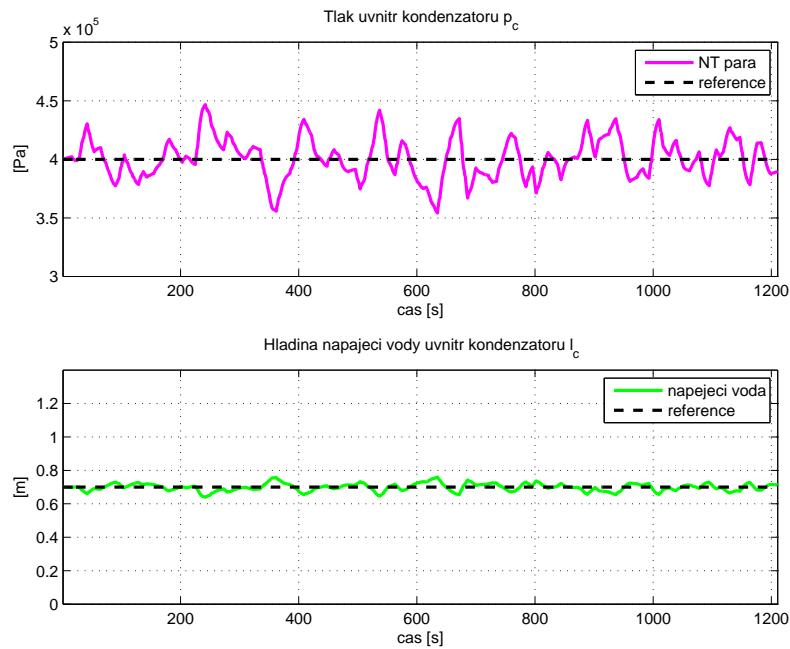
Obrázek 44: Průběh teplot T_{go} a T_{st} – lineární systém, nejistota vstupů m_{st} a m_{wi} – 15%



Obrázek 45: Průběh tlaku p_c a hladiny l_c – lineární systém, nejistota vstupů m_{st} a m_{wi} – 15%

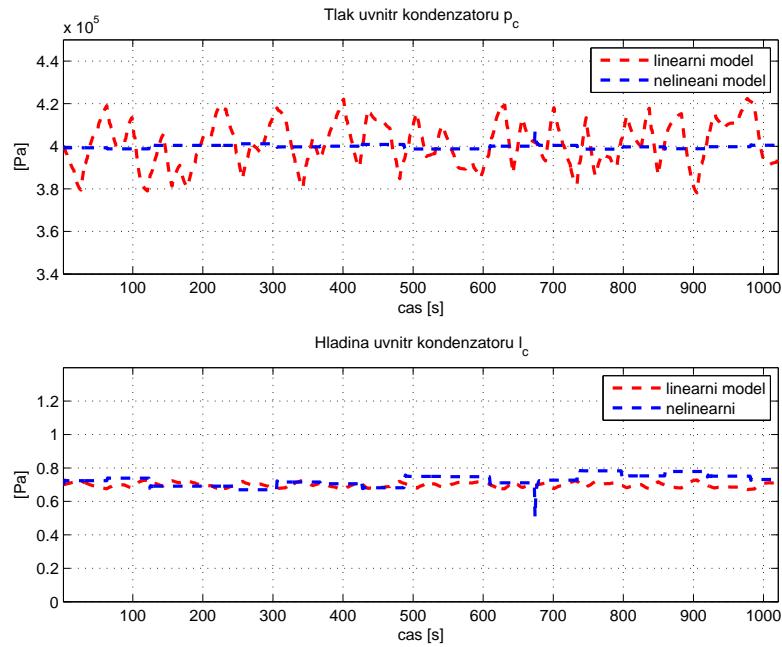


Obrázek 46: Průběh teplot T_{go} a T_{st} – lineární systém, nejistota vstupů m_{st} a m_{wi} – 15%, sočasně vliv poruchy $T_{gi} \pm 50^\circ\text{C}$

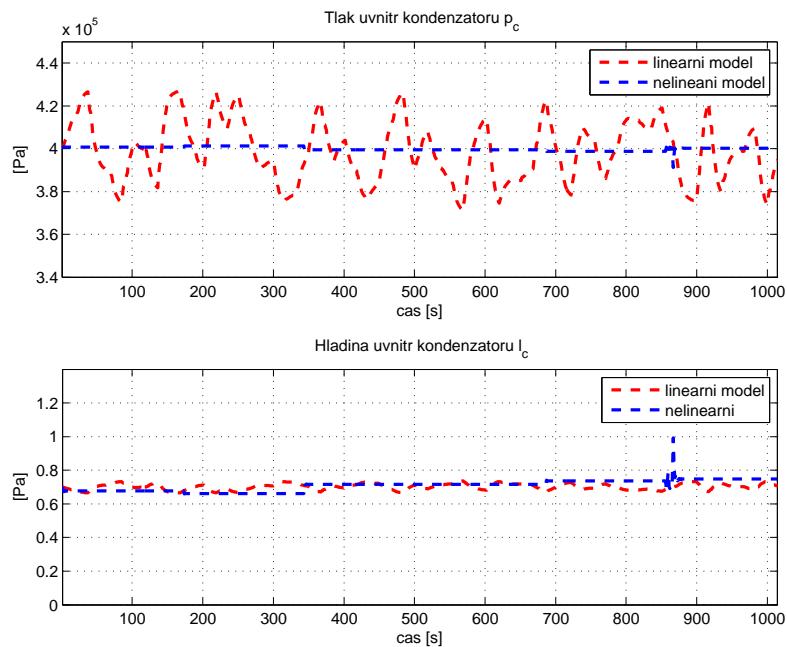


Obrázek 47: Průběh tlaku p_c a hladiny l_c – lineární systém, nejistota vstupů m_{st} a m_{wi} – 15%, sočasně vliv poruchy $T_{gi} \pm 50^\circ\text{C}$

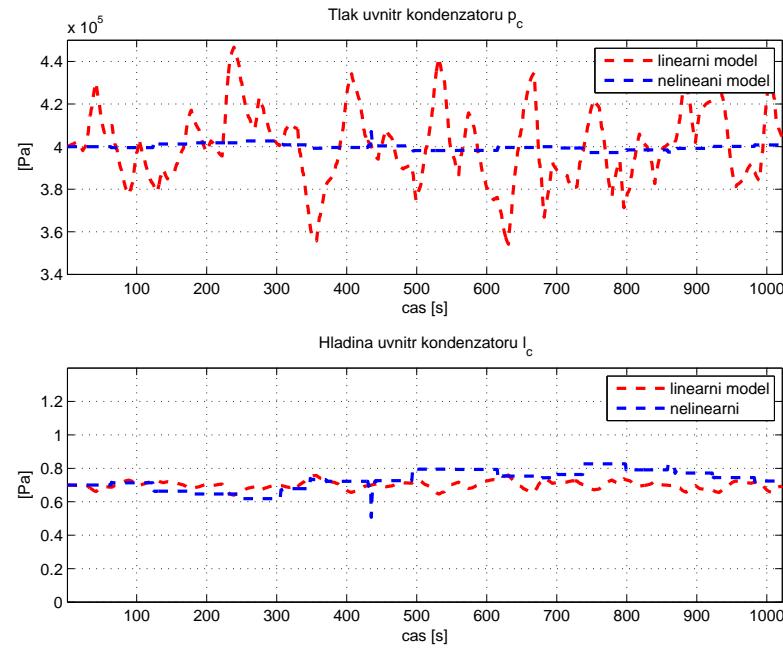
5.3 Srovnání regulátorů pro lineární a nelineární model



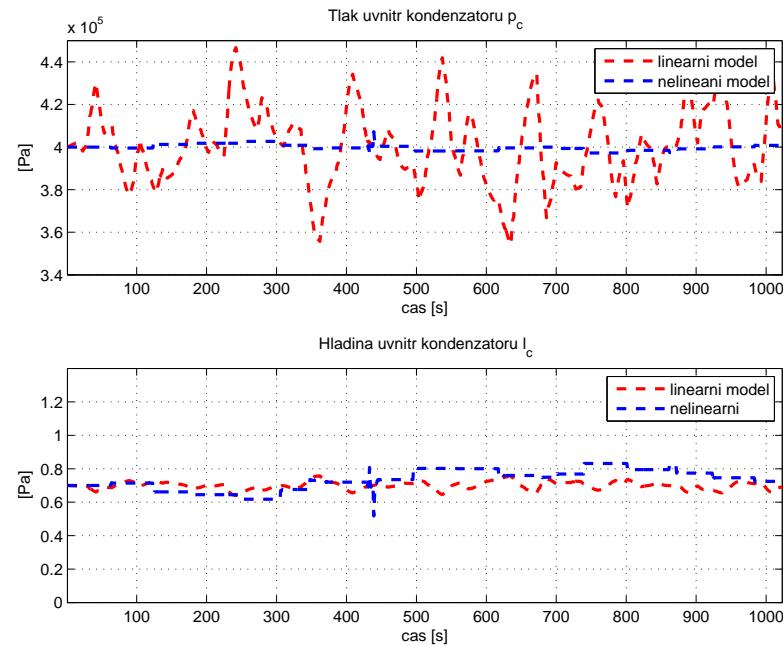
Obrázek 48: Průběh tlaku p_c a hladiny l_c – srovnání modelů, nejistota výstup $m_{st} = 15\%$



Obrázek 49: Průběh teplot T_{go} a T_{st} – srovnání modelů, nejistota vstupu $m_{wi} = 15\%$



Obrázek 50: Průběh teplot T_{go} a T_{st} – srovnání modelů, nejistota vstupů m_{st} a m_{wi} – 15%



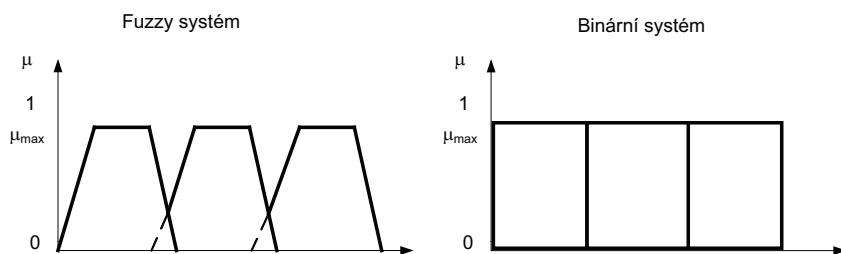
Obrázek 51: Průběh tlaku p_c a hladiny l_c – srovnání modelů, nejistota vstupů m_{st} a m_{wi} – 15%, současně vliv poruchy $T_{gi} \pm 50^\circ\text{C}$

6 Implementace regulátorů do řídicího systému

Implementace fuzzy regulátorů do řídicího systému může být dvojího způsobu. První způsob je přímá implementace, v případě, že řídicí systém obsahuje bloky zpracovávající fuzzy logiku. Příklad výrobců fuzzy řídicích systémů společnosti **Invensys, Teco a.s.** a další.

Druhým způsobem [7] je implementace do řídicího systému zpracovávající booleovskou logiku, která je nejčastěji popisována logickými výrazy popřípadě pravdivostními tabulkami a mapami. Rozšíření booleovské logiky na vícehodnotovou po-případně fuzzy logiku se ovšem děje na programátorské úrovni. V takovém případě operandy nabývají v intervalu $\langle 0, 1 \rangle$ více hodnot pravdivosti. Interval hodnot zde již nepracuje s klasickým booleovským typem, ale s reálnými čísly. Takovýto systém zpracovávající vícehodnotovou logiku, lze považovat za zvláštní případ fuzzy logiky a lze na něj aplikovat stejné principy.

Pro použití fuzzy řízení, při zpracování booleovskou logikou, je třeba zajistit proces fuzzifikace, inference a defuzzifikace. Proces fuzzifikace je zde nazván jako binarizace. Nejdříve se o fuzzifikaci v pravém slova smyslu, ale o vytvoření číslicově-logického rozhraní mezi vstupní částí systému a inferenčním mechanizmem zde zvaným logickým jádrem. To transformuje pravdivostní hodnoty vstupních termů na pravdivost výstupních termů. Blok defuzzifikace hledá jednoznačné rozhraní mezi logickou a číslicovou částí. Pro názornost uvádíme příklad pravdivostní funkce a funkce příslušnosti [7]



Obrázek 52: Srovnání booleovské pravdivostní funkce a fuzzy funkce příslušnosti

7 Závěr

Cílem mé diplomové práce bylo vytvořit model popisující kondenzátor využívající odpadní teplo. To vyžadovalo nastudovat technologický proces, provést rešerši dostupných metod návrhu modelu a zvolit vhodnou metodu. Poté jsem mohl přistoupit k řízení. Jako vhodnou metodu jsem zvolil fuzzy řízení. Vedle mě k tomu převážně tři hlavní důvody. První je využití znalostí o technologii a procesních dat k návrhu regulátoru.

Druhý důvod je možná implementace do řídicího systému ze strany provozovatele.

Třetí důvod je, že fuzzy regulátor lze provozovat na nelineárním modelu.

Primární úlohou bylo stabilizovat tlak uvnitř kondenzátoru na konkrétní hodnotě. Bylo použito dvou stabilizačních smyček tlaku a hladiny. **Simulace dokazují, že fuzzy regulátor pro nelineární model dosahuje lepších výsledku při simulacích nejistot a poruchy smyčky tlaku než lineární model.** Je to dáno tím, že lineární model dobře pracuje pouze v okolí svého pracovního bodu.

Nelineární model

Ze simulací je patrné, že stabilizace tlaku při různých provozních podmínkách je kvalitní. Rozkmit tlaků se v mezním případě pohybuje ± 5 kPa. Na druhou stranu stabilizace hladiny je uspokojivá, ale oproti lineárnímu modelu dosahuje vyššího rozkmitu $\pm 0,5$ m. viz obr. 51. Při tomto typu regulace nesmí docházet k obnažení trubkového svazku v kondenzátoru a tím ke změně teplosměnné plochy. Tento závěr je ovšem přirozený, není možné stabilizovat zároveň obě veličiny, i zde platí že regulace jedné veličiny je na úkor druhé veličiny.

Lineární model

Simulace lineárního modelu ukazují také uspokojivé výsledky. Tlak je stabilizován v rozmezí ± 40 kPa a jak již bylo zmíněno, hladina se mění v rozmezí $\pm 0,2$ m. viz obr. 51.

Při návrhu regulátorů záleží primárně na zákazníkových požadavcích na kvalitu stabilizace jednotlivých smyček. Oproti stávající situaci, kdy v provozu funguje stabilizace tlaku nepřímo regulací hladiny s využitím PID regulátoru, je rozkmit tlaku je i ± 150 kPa. **Dosažené výsledky v této diplomové práci prezentované simulacemi vykazují výrazné zlepšení.**

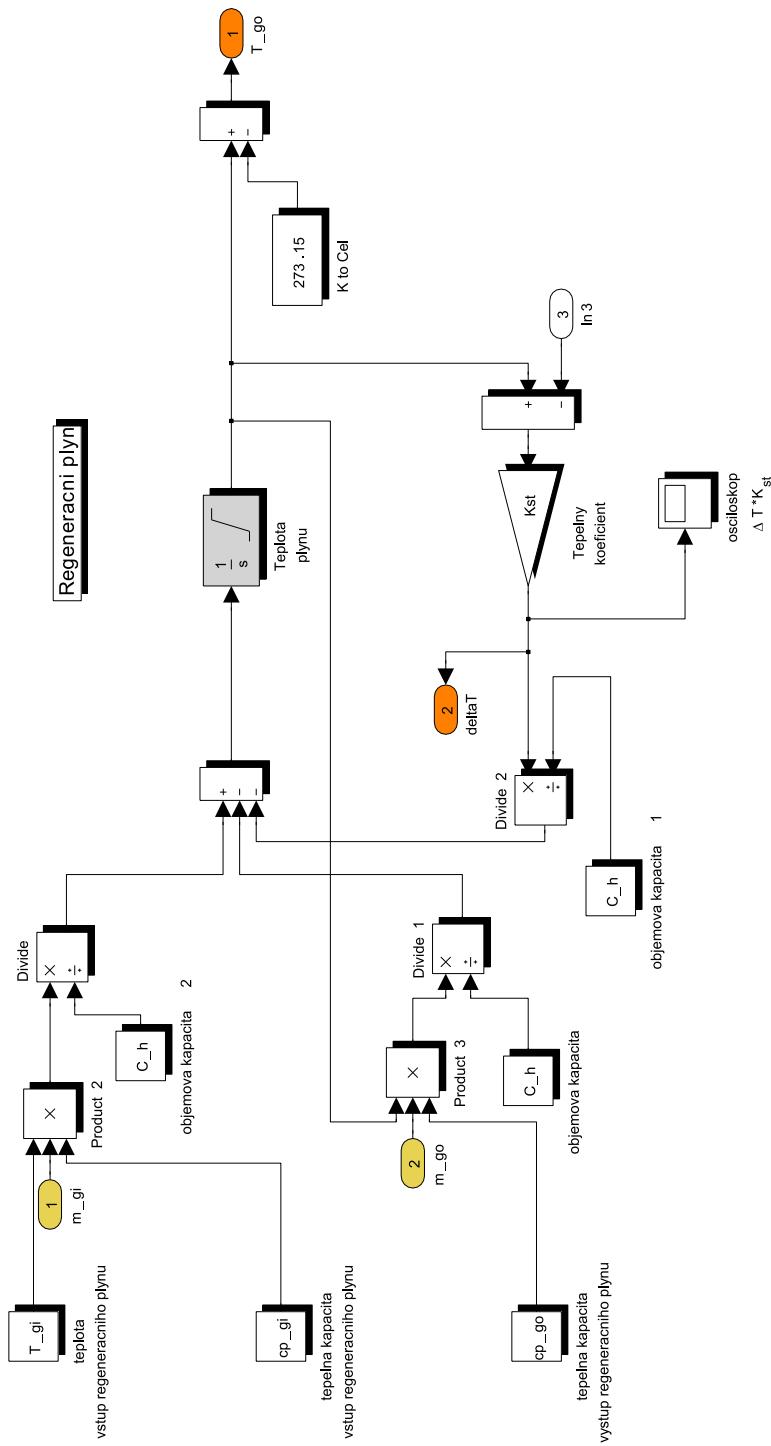
Literatura

- [1] BLAŽEK, J., RÁBL, V. (2006). *Základy zpracování a využitíropy – 2. vydání.* Vydavatelství VŠCHT, Praha. ISBN: 80-7080-619-2
- [2] WIKIPEDIA.ORG (2008). *Claus process.* Categories: Chemical engineering <http://en.wikipedia.org/wiki/Claus_process>
- [3] SKOGESTAD, S., POSTLETHWAITE, I. (2005). *Multivariable Feedback Control – Analysis and Design.* WILEY - John Wiley and Sons, Ltd. ISBN: 13 978-0-470-01167-6(HB)
- [4] CORRIPIO, ARMANDO B. (1998). *Design and Application of Process Control Systems.* ISA – international society for measurement and control. ISBN: 1-55617-639-2
- [5] NOSKIEVIČ, P. (2007). *Modelování a identifikace systémů.* Montanex. ISBN: 80-7225-030-2
- [6] CEPÁK, M., HAVLENA, V. (2006). *Vývoj modelu parního kondenzátoru pro simulační provozu kondenzačních turbín.* Časopis Automatizace, ročník 49, číslo 5, strana 324 <<http://www.automatizace.cz/>>
- [7] ŠMEJKAL, L., URBAN, L. (2004). *Když se řekne Fuzzy logika (I).* Časopis Automatizace, ročník 47, číslo 6, strana 421 <<http://www.automatizace.cz/>>
- [8] HORÁČEK, P. (2000). *Systémy a modely - skriptum.* Vydavatelství ČVUT, Praha.
- [9] MODRLÁK, O. (2005). *Fuzzy řízení a regulace.* Teorie automatického řízení II., Technická univerzita v Liberci, Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií
- [10] ZHU, Y., PAUL, P.J. (2000). *Optimal closed-loop identification test design for internal model control.* Automatica 36 (2000) 1237-1241 <<http://www.elsevier.com/locate/automatica>>
- [11] ZAGORUIKO, A.N., MATROS, YU.SH. (2002). *Mathematical modelling of Claus reactors undergoing sulfur condensation and evaporation.* Chemical Engineering Journal 87 (2002) 73–88 <<http://www.elsevier.com/locate/cej>>

- [12] LJUNG, L. (2000). *System Identification Toolbox - User's Guide*. The Math-Works, Inc. <<http://www.mathworks.com/>>
- [13] ROUBAL, J., HUŠEK, P. (2008). *Základy regulační techniky*. <<http://dce.felk.cvut.cz/roubal>>
- [14] KADLEC, K., KMÍNEK, M. (2005). *Měřicí a řídicí technika*. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, fakulta chemicko-inženýrská
- [15] NIST STANDARD REFERENCE DATABASE NUMBER 69 (2005). *NIST Web-Book Chemie*. <<http://webbook.nist.gov/>>
- [16] STANDARD REFERENCE DATA (SRD) (2008). *National Institute of Standards and Technology*. <<http://www.nist.gov/srd/>>

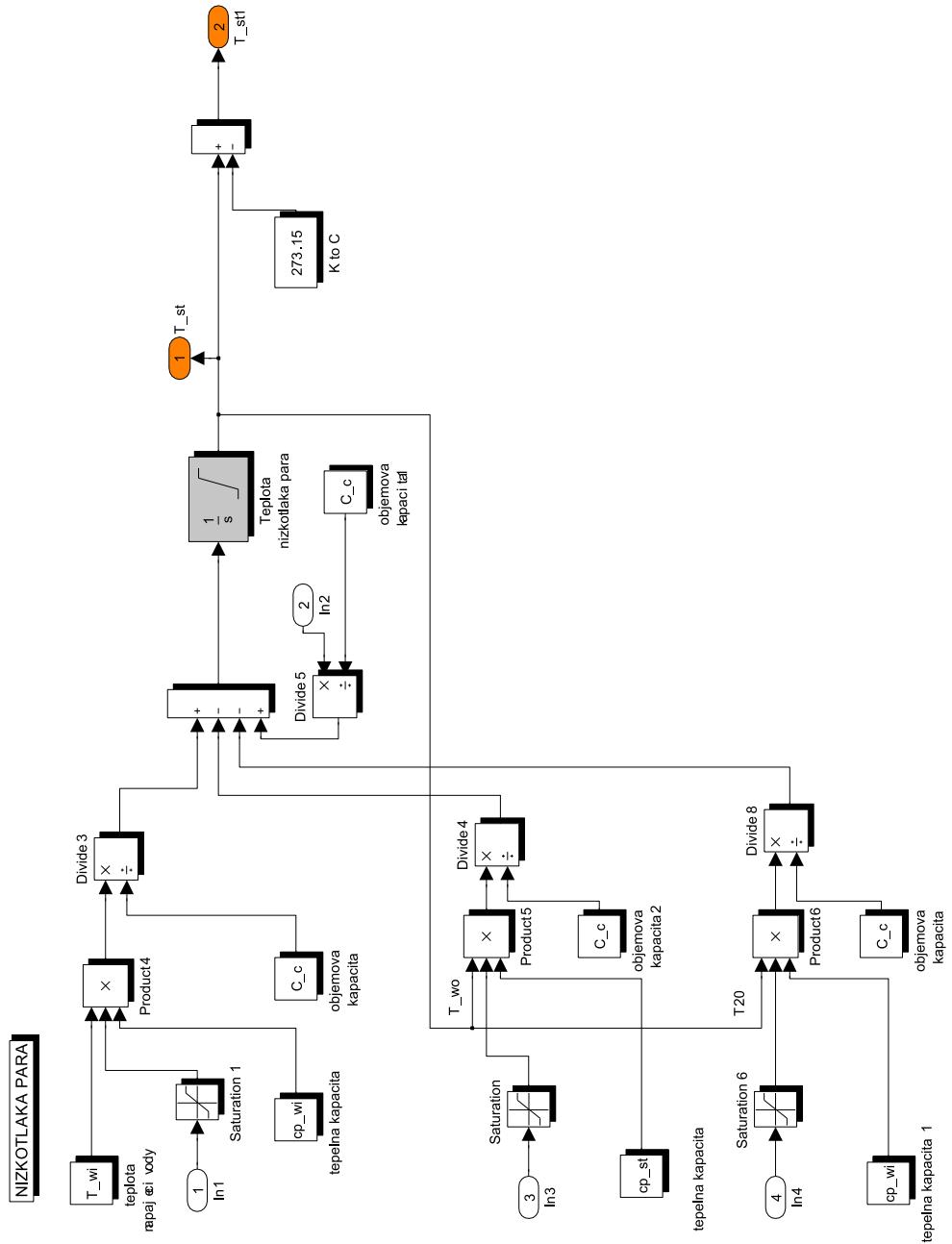
Seznam příloh - simulinková schémata

Nelineární model



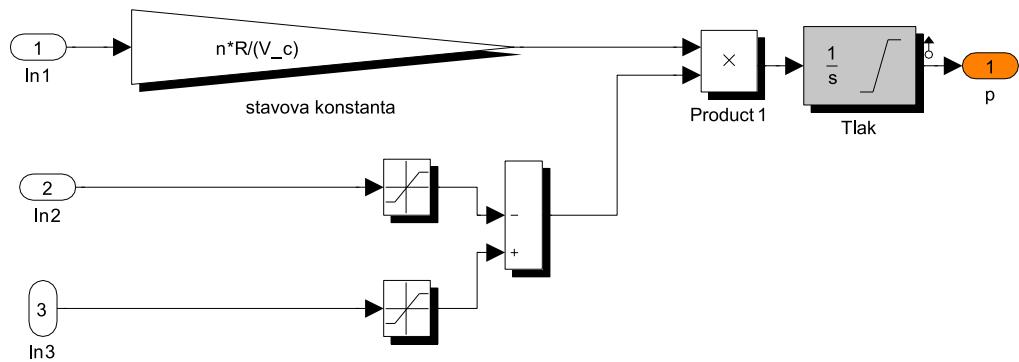
Obrázek 53: Část teplené dynamiky regenečního plynu

Nelineární model

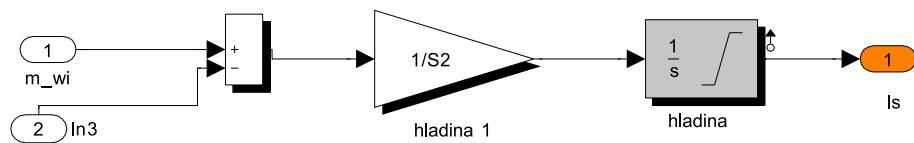


Obrázek 54: Část teplené dynamiky nízkotlaké páry

Nelineární model

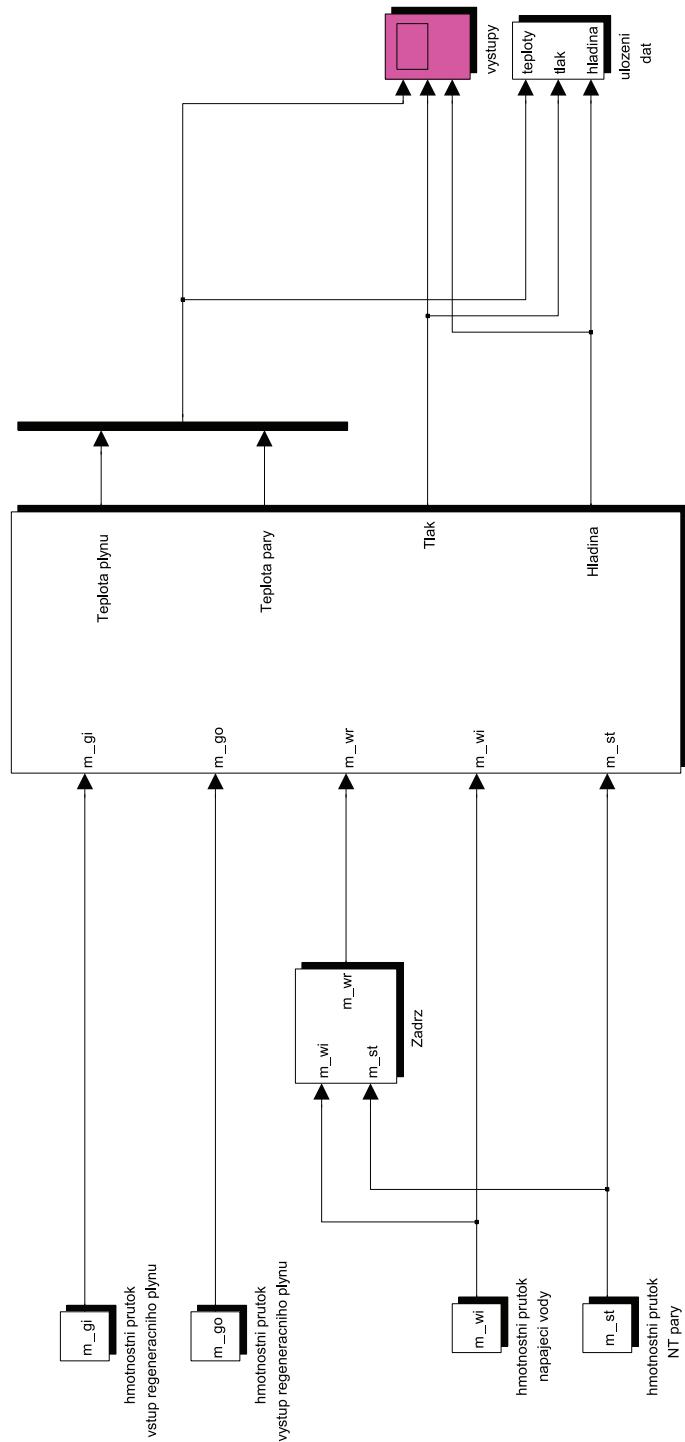


Obrázek 55: Část teplené dynamiky regenečního plynu



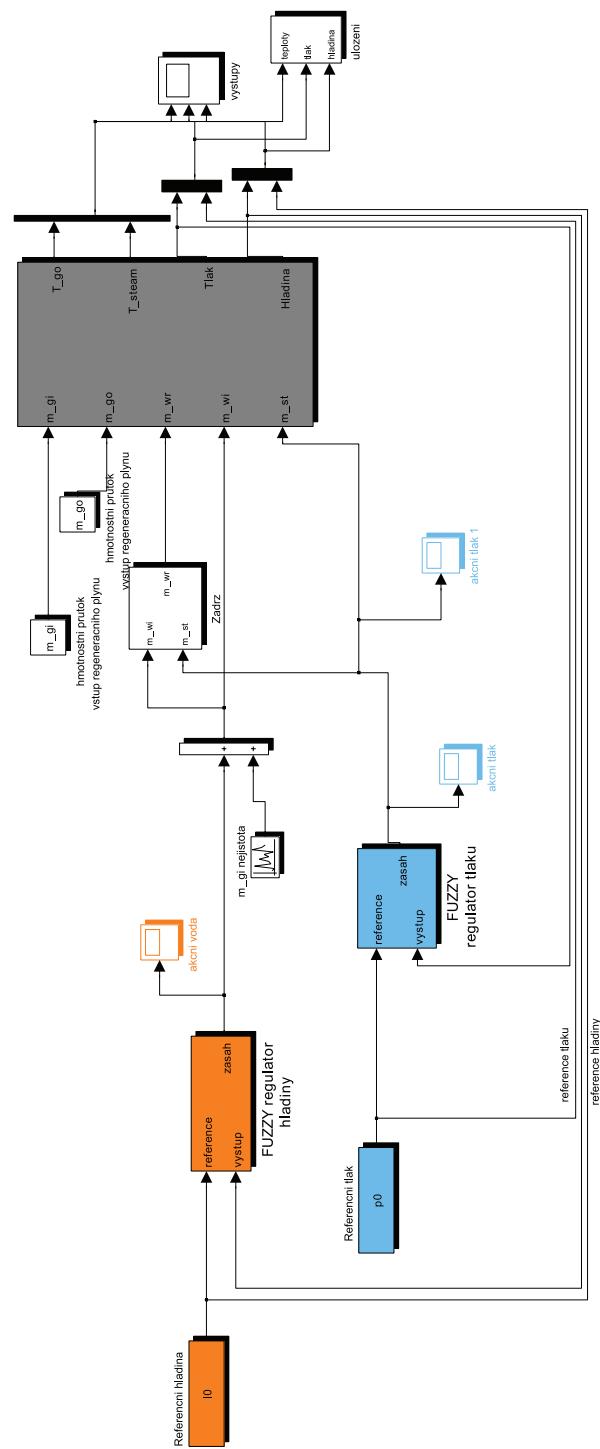
Obrázek 56: Část teplené dynamiky regenečního plynu

Lineární model



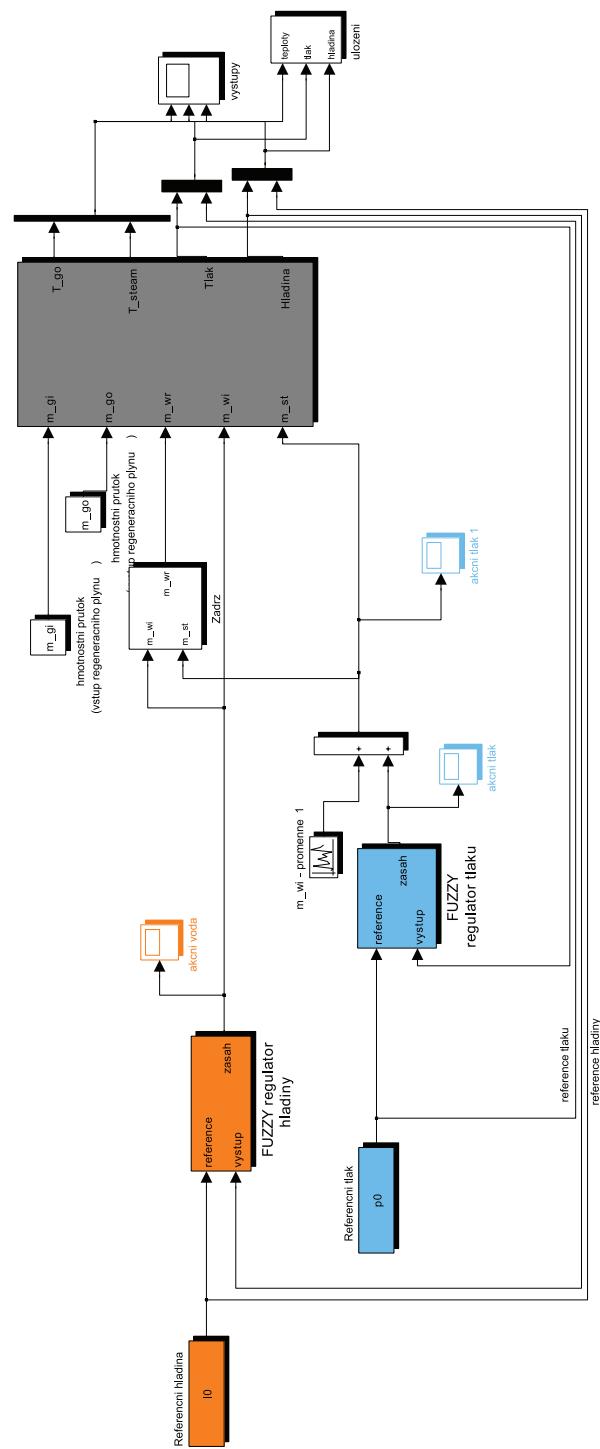
Obrázek 57: Lineární model v ustáleném stavu

Nelineární model - regulace



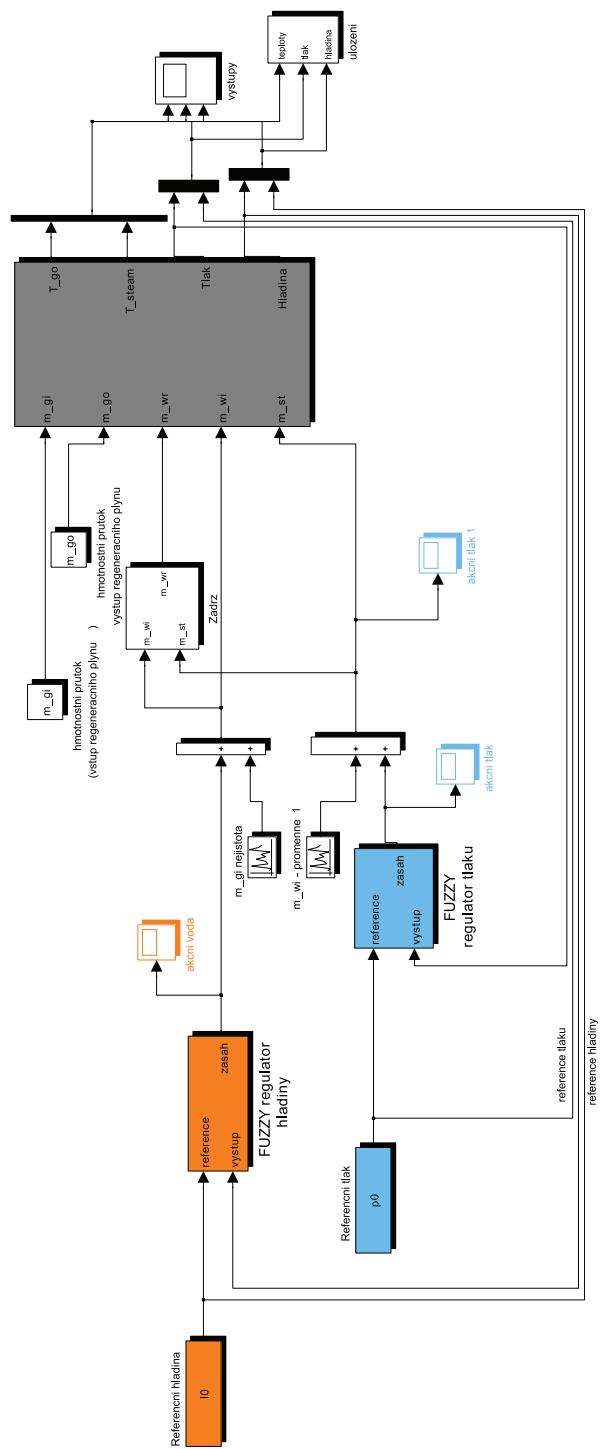
Obrázek 58: Nejistota na vstupu m_{wi}

Nelineární model - regulace



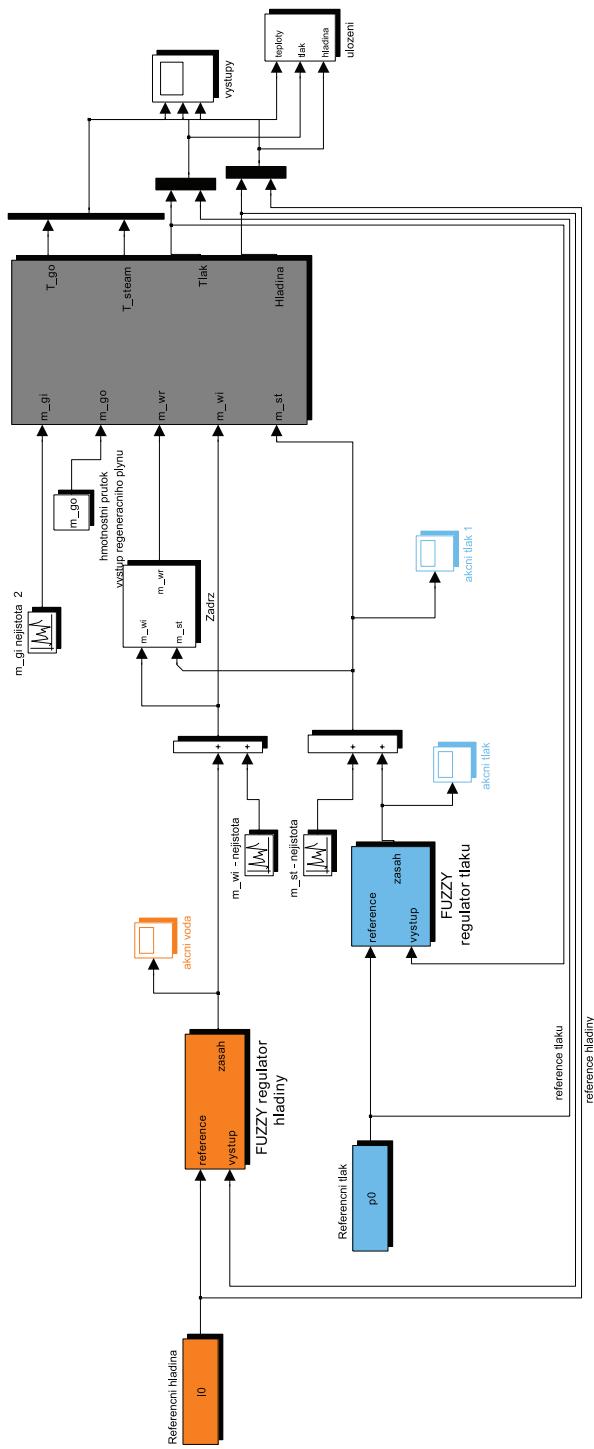
Obrázek 59: Nejistota na vstupu m_{st}

Nelineární model - regulace



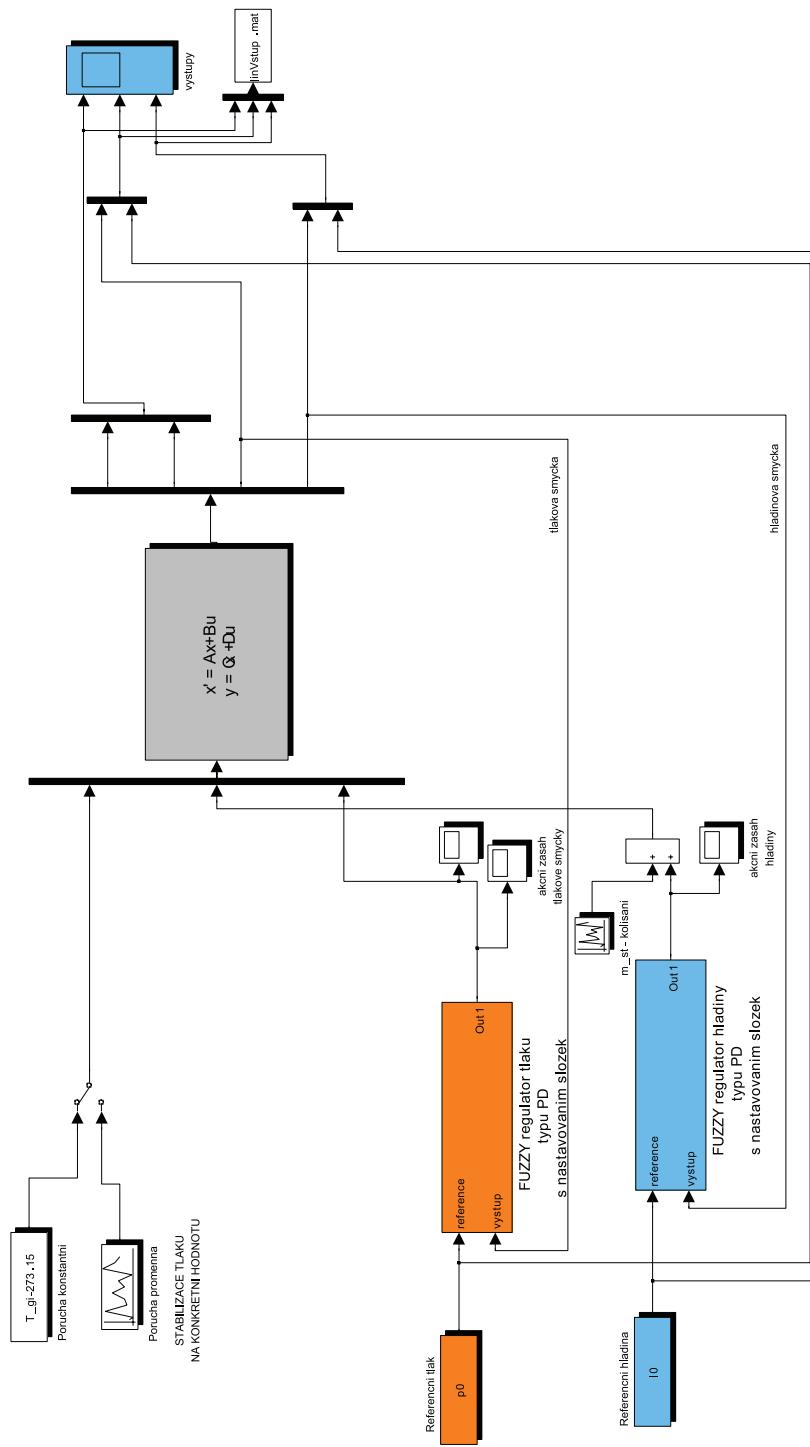
Obrázek 60: Nejistota na vstupu m_{wi} a m_{st}

Nelineární model - regulace



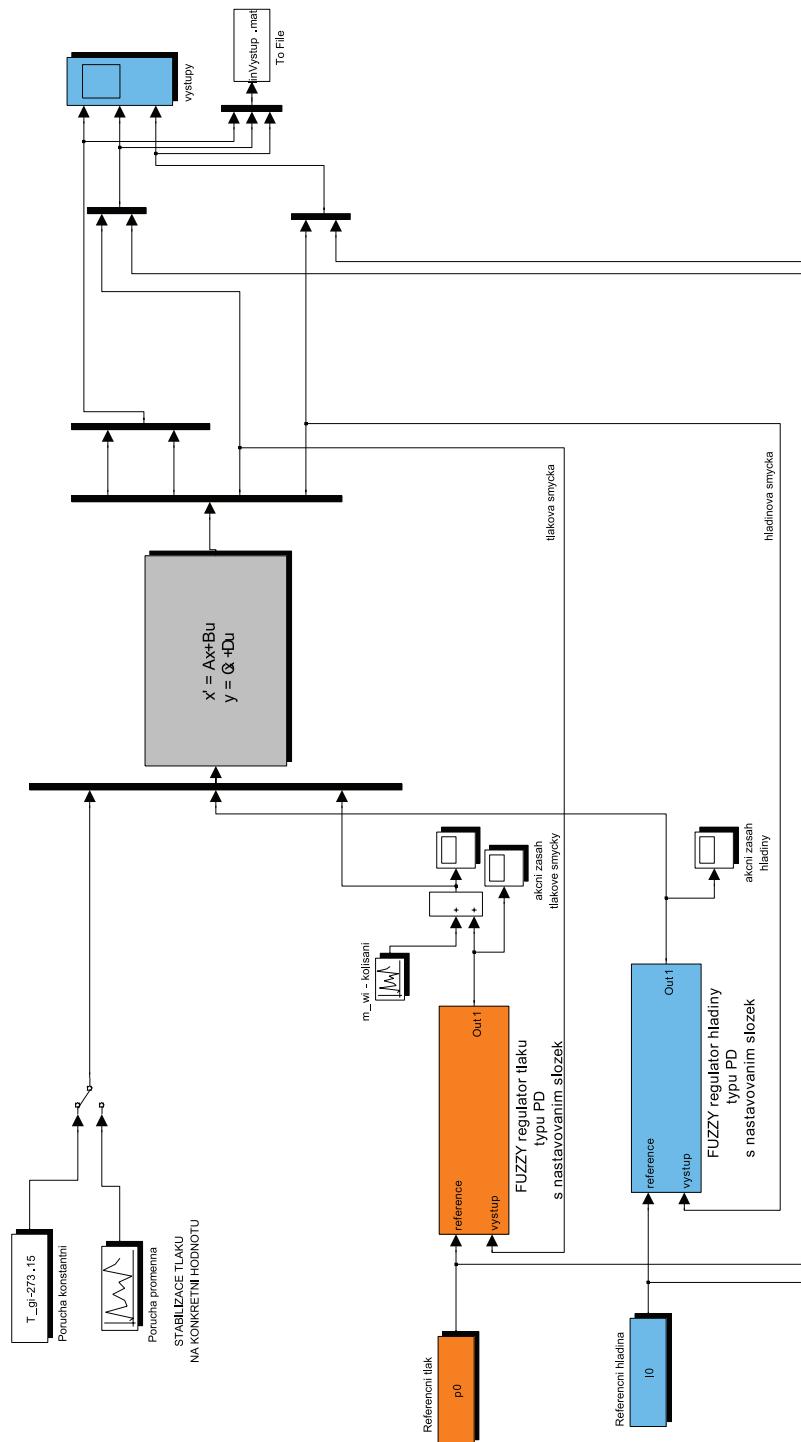
Obrázek 61: Nejistota na vstupu m_{wi} , m_{st} a vliv poruchy T_{gi}

Lineární model - regulace



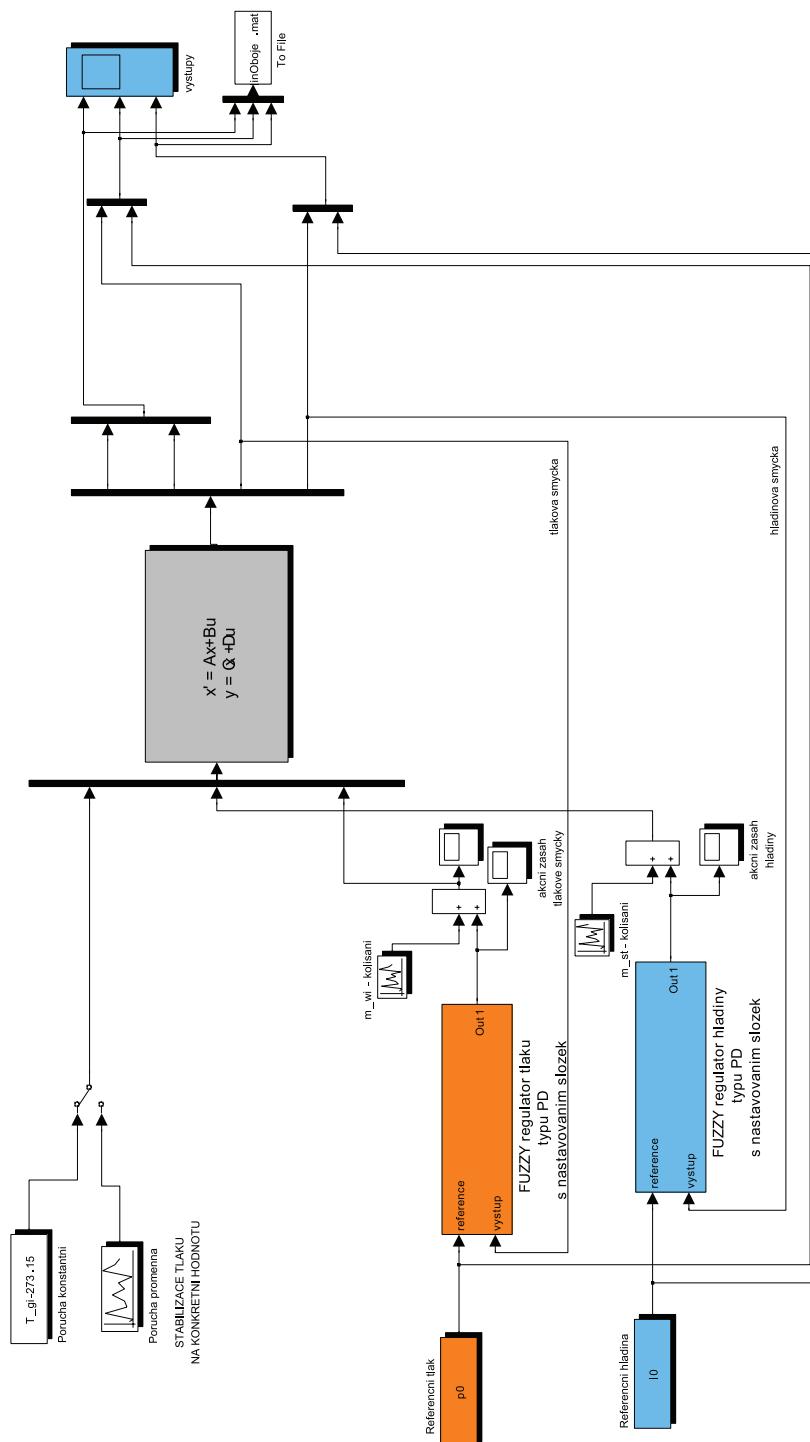
Obrázek 62: Nejistota na vstupu m_{wi}

Lineární model - regulace



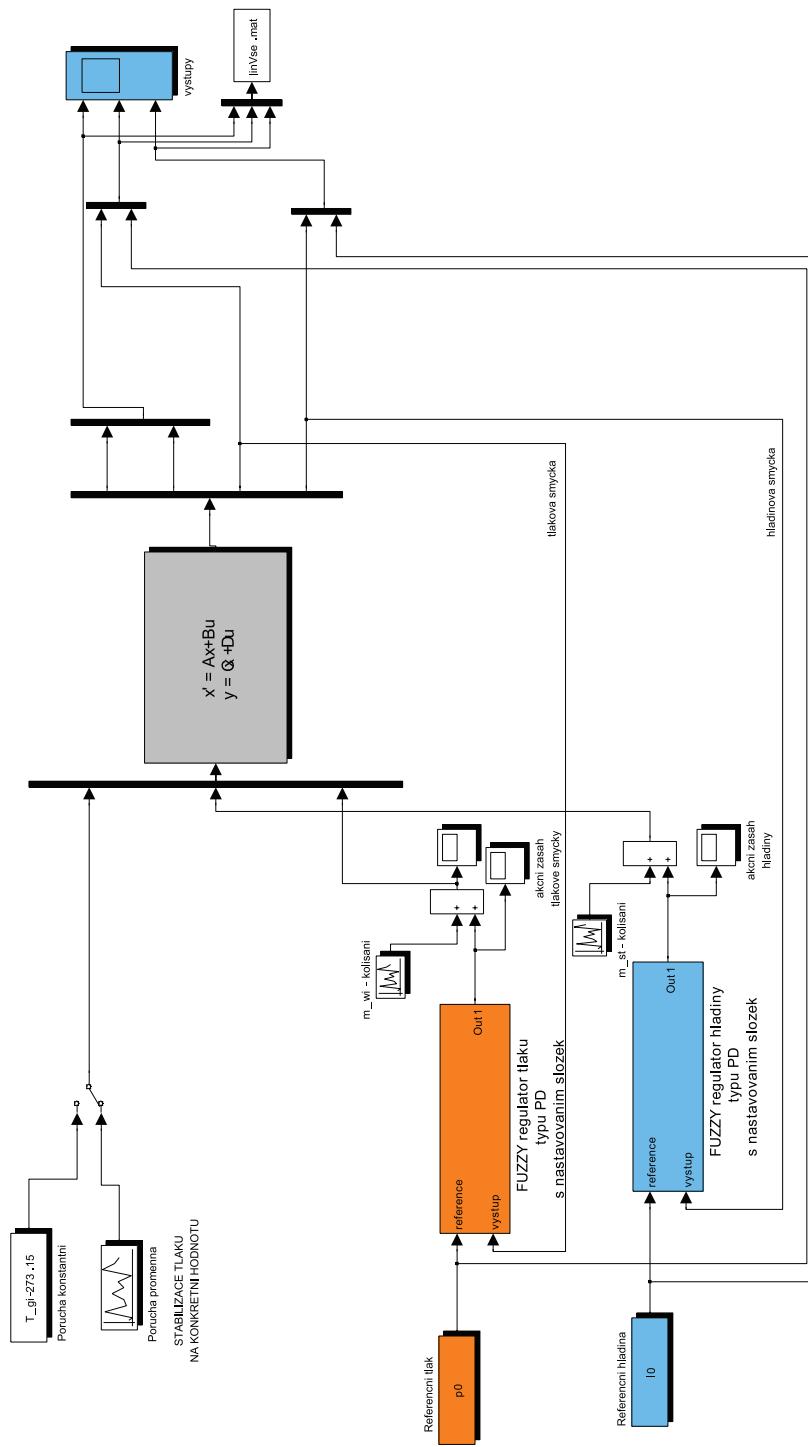
Obrázek 63: Nejistota na vstupu m_{st}

Lineární model - regulace



Obrázek 64: Nejistota na vstupu m_{wi} a m_{st}

Lineární model - regulace



Obrázek 65: Nejistota na vstupu m_{wi} , m_{st} a vliv poruchy T_{gi}

Obsah přiloženého CD

K diplomové práci je přiloženo CD s následující strukturou:

Adresář: DIPLOMOVÁ PRÁCE

- DP_Krajl_2008.pdf – diplomová práce ve formátu PDF

Adresář: LINEÁRNÍ

- linNejistotaVstup.mdl – lineární model, nejistota m_{wi}
- linNejistotaVystup.mdl – lineární model, nejistota m_{st}
- linNejistotaOboje.mdl – lineární model, nejistota m_{wi}, m_{st}
- linNejistotaVse.mdl – lineární model, nejistota m_{wi}, m_{st} , porucha T_{gi}
- hladina2.fis – FIS, fuzzy regulátoru hladiny
- tlak2.mdl – FIS, fuzzy regulátoru tlaku

Adresář: MODEL

- konstanty.m – konstanty modelu m_{wi}
- stavovypopis.m – stavový popis modelu

Adresář: NELINEÁRNÍ

- nelinearni_vstup.mdl – lineární model, nejistota m_{wi}
- nelinearni_vystup.mdl – lineární model, nejistota m_{st}
- nelinearni_ovoje.mdl – lineární model, nejistota m_{wi}, m_{st}
- nelinearni_vse.mdl – lineární model, nejistota m_{wi}, m_{st} , porucha T_{gi}
- hladina3.fis – FIS, fuzzy regulátoru hladiny
- tlak3.mdl – FIS, fuzzy regulátoru tlaku

Adresář: SIMULACE

- **fuzzytisk.m** – tiskne fuzzy struktury regulatoru
- **linOboje.m** – tiskne grafy lineárního systému, nejistota m_{wi} , m_{st}
- **linVse.m** – tiskne grafy lineárního systému, nejistota m_{wi} , m_{st} , porucha T_{gi}
- **linVstup.m** – tiskne grafy lineárního systému, nejistota m_{wi}
- **linVystup.m** – tiskne grafy lineárního systému, nejistota m_{st}
- **nelinOboje.m** – tiskne grafy nelineárního systému, nejistota m_{wi} , m_{st}
- **nelinVse.m** – tiskne grafy nelineárního systému, nejistota m_{wi} , m_{st} , porucha T_{gi}
- **nelinVstup.m** – tiskne grafy nelineárního systému, nejistota m_{wi}
- **nelinVystup.m** – tiskne grafy nelineárního systému, nejistota m_{st}
- **srovnaniOboje.m** – tiskne grafy srovnání nelineárního a lineárního systému, nejistota m_{wi} , m_{st}
- **srovnaniVse.m** – tiskne grafy srovnání nelineárního a lineárního systému, nejistota m_{wi} , m_{st} , porucha T_{gi}
- **srovnaniVstup.m** – tiskne grafy srovnání nelineárního a lineárního systému, nejistota m_{wi}
- **srovnaniVystup.m** – tiskne grafy srovnání nelineárního a lineárního systému, nejistota m_{st}
- **srovnej.m** – tiskne grafy srovnání nelineárního a lineárního systému, všechny varianty
- **srovnej.m** – tiskne grafy lineárního systému, všechny varianty
- **srovnej.m** – tiskne grafy nelineárního systému, všechny varianty
- **hladina2.mat** – datový soubor, lineární systém, fuzzy regulátor hladiny
- **hladina3.mat** – datový soubor, nelineární systém, fuzzy regulátor hladiny
- **tlak2.mat** – datový soubor, lineární systém, fuzzy regulátor tlaku

- **tlak3.mat** – datový soubor, nelineární systém, fuzzy regulátor tlaku
- **linOboje.mat** – datový soubor, lineární systém, nejistota m_{wi} , m_{st}
- **linVse.mat** – datový soubor, lineární systém, nejistota m_{wi} , m_{st} , porucha T_{gi}
- **linVstup.mat** – datový soubor, lineární systém, nejistota m_{wi}
- **linVystup.mat** – datový soubor, lineární systém, nejistota m_{st}
- **nelinOboje.mat** – datový soubor, nelineární systém, nejistota m_{wi} , m_{st}
- **nelinVse.mat** – datový soubor, nelineární systém, nejistota m_{wi} , m_{st} , porucha T_{gi}
- **nelinVstup.mat** – datový soubor, nelineární systém, nejistota m_{wi}
- **nelinVystup.mat** – datový soubor, nelineární systém, nejistota m_{st}

Adresář: USTÁLENÝ

- **ustaleny_stav.m** – lineární model, ustálený stav
- **ustaleny.mdl** – lineární model, schéma pro ustálený stav
- **ustaleni.mat** – datový soubor výsledků

Adresář: VÝPOČTY

- **cpPara.m** – graf, tepelná kapacita NT páry
- **cpPlynVstup.m** – graf, tepelná kapacita regeneračního plynu na vstupu
- **cpPlynVystup.m** – graf, tepelná kapacita regeneračního plynu na výstupu
- **cpVoda.m** – graf, tepelná kapacita napájecí vody
- **roPara.m** – graf, hustota NT páry
- **roPlynVstup.m** – graf, hustota regeneračního plynu na vstupu
- **roPlynVystup.m** – graf, hustota regeneračního plynu na výstupu
- **roVoda.m** – graf, hustota napájecí vody
- **tlak.m** – graf, tlak saturované páry

- **spust.m** – spustí simulace
- **cpPara.mat** – datový soubor, tepelná kapacita NT páry
- **cpPlynuVstup.m** – datový soubor, tepelná kapacita regeneračního plynu na vstupu
- **cpPlynuVystup.m** – datový soubor, tepelná kapacita regeneračního plynu na výstupu
- **cpVoda.m** – datový soubor, tepelná kapacita napájecí vody
- **roPara.m** – datový soubor, hustota NT páry
- **roPlynVstup.m** – datový soubor, hustota regeneračního plynu na vstupu
- **roPlynVystup.m** – datový soubor, hustota regeneračního plynu na výstupu
- **roVoda.m** – datový soubor, hustota napájecí vody
- **tlak.mat** – datový soubor, tlak saturované páry